

Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD)

Faculté des Sciences et Techniques

Institut des Sciences de la Terre

(IST)



N° D'ORDRE : 157/ I.S.T/2005

CARACTERISATION HYDROCHIMIQUE ET QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DU
PROJET HYDRAULIQUE VILLAGEOISE 310 FORAGES, DANS LA BOUCLE DU
MOUHOUN : PROVINCES DES BANWA, DES BALES, DU MOUHOUN ET DE LA KOSSI
(BURKINA FASO).

Mémoire de fin d'études d'ingénieur géologue I.S.T

Présenté par: Elie Serge Gaëtan SAURET

Pour l'obtention du grade D'INGENIEUR GEOLOGUE DE CONCEPTION

Soutenu publiquement le 31 juillet 2005 devant la commission d'examen

composée de :

MM.	A.	DIA	Président	I.S.T
	S.	DIOP	Rapporteur	I.S.T
	S.	SOME	Rapporteur	BUMIGEB (Burkina Faso)
	F.	DIOME	Examineur	I.S.T
	M.	KIENTGA	Examineur	EIER-ETSHER (Burkina Faso)
	A.	NDIAYE	Examineur	Ingénieur géologue
	A.	FAYE	Examineur	Dpt de Géologie (U.C.A.D)

Année académique 2004/2005

« Eternel, il n'y a point de Dieu semblable à toi, dans les Cieux et sur la Terre. Tu gardes l'alliance et la miséricorde envers tes serviteurs qui marchent en ta présence de tout leur cœur ».

2 Chroniques 6 : 14

DEDICACES

JE DEDIE CE TRAVAIL

- A mes défunts père, et grand-père
- A la Mission française des Assemblées de DIEU au Burkina Faso pour avoir assurée ma scolarité de 1992 à 1996,
- A ma mère pour son affection, et ses prières. Vous toujours été à mes cotés, pour me conseiller, et m'aider. Puisse le Tout Puissant prolonger votre vie afin que vous bénéficiiez des fruits de vos efforts.
- A mes grands-parents à Yilou pour leurs prières quotidiennes formulées pour moi.
- A mes Frères : *Amélie Kiswensida, Daniel Sidpassambé Eric, Evariste Boblewindé Guy, Ariane Pengwendé Eudoxie, Isabelle Catherine, Sanata, et Marc Bénéwendé.*
- A mon oncle *Mr. Arsène SONGNABA* et à toute sa famille pour leur soutien moral, matériel, spirituel et financier au quotidien.
- A mon tonton *Mr. Timothée SAWADOGO* et à toute sa famille pour m'avoir hébergé et soutenu ces cinq années.
- A mes camarades de promotion : *Mbacké, Niang, Khalla, Lamine, Beranrd, Tourki, Marie Jeanne, Seynabou, Mariame, Souley, Tall, Serigne, Soumano, Molah Faye, Arsène Mokoko et Keita.*
- A mon amie : *Léticia Bénéwendé SAKANA.*
- A tous mes cousins, cousines, neveux et nièces.
- A tous mes Amis.

Ce travail est le vôtre !

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail il m'est très agréable de remercier :

MM. Pascal Dienderé et Paul Ginet respectivement Directeur général du BUMIGEB (Bureau des Mines et de la Géologie au Burkina), et directeur général du Groupe des Ecoles EIER-ETSHER (Ecole Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Equipement Rural - Ecole des Techniciens Supérieurs en Hydraulique) qui m'ont offert des opportunités de stages dans leurs structures.

M. Abdoulaye Dia Professeur émérite de géologie fondamentale et appliquée, Directeur de l'I.S.T, et président du jury pour m'avoir donné l'envie de comprendre la géologie et avoir accepté de présider ce jury.

M. Seybatou Diop Phd. en hydrogéologie, enseignant à l'Institut des Sciences de la Terre à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD) principal encadreur de ce mémoire.

Grandement merci pour votre rigueur, votre grande disponibilité et le sérieux dans le travail.

M. Kiéntga Mathieu Docteur es science de l'environnement, responsable de la cellule SIG (Système d'Information Géographique) de l'EIER pour avoir co-encadrer ce travail et accepté de siéger dans ce jury.

M. Boureima Ouédraogo Docteur en hydrogéologie et directeur du Département Sondages et Forages (DSF) du BUMIGEB.

MM. Fary Diome, Alfred Sankara et Nébié respectivement Docteur-ingénieur, enseignant chercheur à l'I.S.T et Ingénieurs en pédologie au BUNASOLS (Bureau National des Sols du Burkina) pour le soutien dans l'analyse et l'interprétation des caractéristiques pédologiques des sols.

MM. Aziz Ndiaye et Corentin Somé respectivement Ingénieur géologue et assistant de SIG à la Cellule SIG de l'EIER pour leur grande simplicité, leur disponibilité leur assistance dans la réalisation et l'interprétation des cartes thématiques. M. Ndiaye vous avez accepté de siéger dans ce jury. Je vous en suis infiniment reconnaissant.

M. Abdoulaye Faye Docteur en hydrogéologie, maître de conférence et enseignant chercheur au département de géologie à l'UCAD, pour avoir voulu examiner mon travail.

M. Sylvain Somé Ingénieur hydrogéologue et chef de service du DSF du BUMIGEB, pour les précieux conseils, les matériels didactiques et l'appui inestimable dans la compréhension de la géologie et l'hydrogéologie Burkina Faso.

M. Charles Yaméogo et toute l'équipe de forage du BUMIGEB pour leur encadrement sur le terrain.

M. Abdoulaye Ouédraogo, Ingénieur Géophysicien (BUMIGEB) et **Mme Suzane Yaméogo** Doctorante en hydrogéologie pour m'avoir fourni la bibliographie nécessaire.

M. Omar Traoré hydrogéologue au Ministère des Mines de l'Energie et des Carrières pour son soutien tout azimut.

M. Grégoire Sissoko Professeur titulaire en physique à l' UCAD pour les précieux conseils et le soutien moral durant ces cinq années d'étude.

M. Pendaré Docteur en biologie animale, enseignant chercheur à l'UCAD pour les précieux conseils et les encouragements.

Mme Sam Sidnoma pour sa disponibilité et son soutien moral. Puisse Dieu vous accorder sa grâce au quotidien.

M. Kuiliga Zoma et à toute sa famille pour leur soutien constant. Trouvez ici l'expression de ma sincère gratitude.

M. Sidiki Ouégraogo et à toute sa famille pour leur sympathie envers la mienne.

M. Alexis Lourgo et à sa famille pour tout ce qu'ils font pour la mienne.

Les Pasteurs Jean Baptiste Sawadogo et **Abel Ouédraogo**, respectivement responsable des Eglises des Assemblées de Dieu de Cissin (Ouagadougou, Burkina Faso) et Pikine (Sénégal) et tous les fidèles de ces églises, pour leurs prières. Dieu saura vous le rendre selon l'immensité de sa grâce.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous ceux, qui de près ou de loin, ont apporté leur soutien à la réalisation de ce mémoire.

TABLES DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTES DES ABREVIATIONS

RESUME

Pages

PREMIERE PARTIE : PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE.....1

INTRODUCTION GENERALE.....2

Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude.....3

1.1. Caractérisation biophysique de la zone d'étude.....3

1.1.1. Situation géographique et découpage administratif.....3

1.1.2. Le climat.....6

1.1.3. La végétation.....6

1.1.4. Les sols.....6

1.1.5. Le relief et l'hydrographie.....7

1.1.5.1. Le Relief.....7

1.1.5.2. Le réseau hydrographique.....7

1.1.6. Contexte géologique.....10

1.1.6.1. Les formations du socle.....10

1.1.6.2. Les formations sédimentaires11

1.1.7. Contexte tectonique.....14

1.1.8. Contexte hydrogéologique.....	14
1.1.8.1. Les systèmes aquifères de la zone de socle.....	15
1.1.8.2. Les nappes des systèmes aquifères du sédimentaire ancien et du Continental terminal.....	19
1.2. Données sur la population.....	20

Chapitre 2 : Problématique et Approche méthodologique.....21

2.1. Problématique.....	21
2.2. Objectifs de l'étude.....	22
2.3. Méthodologie d'étude.....	22
2.4. Exposé des résultats.....	23

DEUXIEME PARTIE: EXPOSE DES RESULTAS DE L'ETUDE DE CARACTERISATION HYDROCHIMIQUE ET QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES.....	24
---	----

Chapitre 1 : Etude de caractérisation hydrochimique des eaux.....25

1.1. Caractéristiques physiques des eaux.....	25
1.1.1. Température.....	25
1.1.2. pH des eaux.....	25
1.1.3. Alcalinité et Dureté totale.....	26
1.1.4. Conductivité électrique.....	27
1.2. Caractérisation hydrochimique.....	28
1.2.1. Faciès chimiques des eaux.....	28

1.2.2. Echanges ioniques.....	30
Chapitre 2 : Qualité chimique des eaux.....	32
2.1. Teneurs anormales en fer et zinc.....	32
2.2 Teneurs élevées en azote.....	34
2.2.1. Concentration en nitrates.....	34
2.2.1. Concentration en nitrites.....	36
2.3. Caractéristiques pédologiques des sols.....	38
2.3.1. Interprétation des résultats d'analyses des sols.....	40
2.3.2. Incidences des caractéristiques des sols sur les mécanismes de pollution.....	42
TROISIEME PARTIE : COCNCLUSION ET RECOMMADATIONS.....	46
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	47
CONCLUSION.....	47
RECOMMANDATIONS.....	48
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	49
ANNEXES	

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude.....	5
Figure 2 : Répartition des isohyètes.....	8
Figure 3 : Carte de distribution des sols dans la zone d'étude.....	9
Figure 4 : Réseau hydrographique et principaux bassins versants du Burkina Faso.....	10
Figure 5 : Carte géologique simplifiée du craton Ouest Africain.....	12
Figure 6 : Carte géologique simplifiée du Burkina Faso.....	13
Figure 7 : Mode de gisement des eaux souterraines dans la zone de socle cristallin du Burkina Faso	17
Figure 8 : a) Profil type de l'altération des granites b) Structure schématisée d'un aquifère de fissure	18
Figure 9 : Carte de localisation des forages du projet hydraulique villageoise	21
Figure 10 : Comparaison des duretés moyennes dans les différentes formations aquifères....	27
Figure 11 : Faciès hydrochimique des eaux.....	29
Figure 12 : Processus des échanges ioniques.....	30
Figure 13 : Comparaison des moyennes des teneurs anormales en fer dans les formations Aquifères.....	32
Figure 14 : Comparaison des moyennes des teneurs anormales en zinc dans les formations aquifères.....	33
Figure 15 : Comparaison des teneurs en fer et en zinc dans les eaux à anomalies en zinc.....	33
Figure 16 : Histogramme de fréquence des teneurs en nitrates dans les forages.....	34
Figure 17 : Carte de zonalité des teneurs en nitrates dans le secteur d'étude.....	35
Figure 18 : Histogramme de fréquence des teneurs en nitrites dans les forages.....	36
Figure 19 : Carte de zonalité des teneurs en nitrites dans le secteur d'étude.....	37
Figure 20 : Représentation des échantillons moyens dans le diagramme des textures.....	39
Figure 21 : Évolution en fonction de la profondeur de la teneur en azote (N), carbone total (C) et du rapport C/N.	40
Figure 22 : Evolution en fonction de la profondeur de la capacité d'échange cationique (CEC), somme des bases échangeables (S) et taux de saturation en bases (V).....	41
Figure 23 : Production commercialisée de coton graine au Burkina Faso	42

Figure 24 : Comparaison des teneurs en fer, nitrates et nitrites dans les eaux des forages.....	43
Figure 25 : Comparaison des teneurs en fer, nitrates et nitrites dans les eaux des forages à teneur anormale en fer.....	44
Figure 26 : Comparaison des teneurs en NO_3 et NO_2 selon un tri décroissant des teneurs en nitrates.....	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Importance des systèmes aquifères dans les grandes unités hydrogéologiques ...	15
Tableau II : Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques des eaux dans les différentes unités hydrogéologiques.....	25
Tableau III : Classification des eaux de boisson en fonction de la conductivité.....	28
Tableau IV : Valeurs élevées de conductivité	28
Tableau V : Teneurs moyennes en nitrites dans les différents types d'aquifères.....	38
Tableau VI : Normes des paramètres S, CEC, et V du BuNaSols	41

ABREVIATIONS

BUMIGEB :	Bureau des Mines et de la Géologie au Burkina
BUNASOLS :	Bureau National des Sols
CRTO :	Centre Régional de Télédétection de Ouagadougou
EIER :	Ecole Inter- Etat d'Ingénieurs de l'Équipement Rural
ETSHER :	Ecole des Techniciens Supérieurs en Hydraulique et en Équipement Rural
DGM :	Direction Générale des Mines
MARH :	Ministère de l'Agriculture et des Ressources Halieutiques
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
SOFITEX :	Société des Fibres et Textiles

PREMIERE PARTIE

PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

INTRODUCTION

La répartition géographique des forages d'eaux sur l'étendue du territoire national du Burkina Faso est inégale : Les provinces du *Kadiogo*, de *Kouritenga*, et de l'*Oubritenga* concentrent respectivement 0.35, 0.22 et 0.20 forages par km². A l'opposé celles de la boucle du Mouhoun ont une densité de 0.02 à 0.05 forages par km²; ce qui, dans la province des *Banwa*, correspond à un ratio de 1 forage pour 1794 habitants (Nikiéma, 2002).

Cette situation particulière dans la boucle du *Mouhoun* a pu être améliorée grâce au projet hydraulique villageoise de réalisation de 310 forages dans les nouvelles provinces de la Kossi, du Mouhoun, des Balés, et des Banwa » entre 1998 et 2004. L'objectif de ce projet qui a été financé par la BADEA était d'accroître le nombre de forages villageois dans cette partie du pays et fournir une eau potable aux populations. Mais, les teneurs anormales en nitrites, fer et zinc relevées dans bon nombre de ces forages posent un problème de potabilité des eaux des aquifères captés, d'où le choix et l'intérêt du thème de ce présent mémoire intitulé:

« Caractérisation hydrochimique et qualité des eaux souterraines du projet hydraulique villageoise 310 forages dans la boucle du Mouhoun : Provinces des Banwa, des Balés, du Mouhoun et de la Kossi (Burkina Faso).

L'étude que nous présentons dans ce document s'articule en trois parties :

- Une première partie qui situe le contexte géographique, géologique et hydrogéologique du secteur d'étude et décrit la méthodologie d'étude.
- Une deuxième partie dans laquelle nous exposons les résultats d'analyses et d'interprétations des données (paramètre physico-chimiques des différents systèmes aquifères).
- Enfin une dernière partie dans laquelle nous concluons et formulons des recommandations.

Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude

1.1. Caractérisation biophysique de la zone d'étude

1.1.1. Situation géographique et découpage administratif

Les provinces de la Kossi, du Mouhoun, des Balés et des Banwa sont issues de la loi portant création et dénomination de 15 provinces, adoptée en conseil de ministre le 24 Avril 1996 (loi N° 09-96/ADP). Ces nouvelles provinces portent à 45 le nombre total des provinces du Burkina Faso.

Les provinces de la Kossi, du Mouhoun, des Balés et des Banwa ont été rattachées à la Boucle du Mouhoun par la loi N° 2001-013/AN du 02 juillet 2001 portant création des régions administratives du Burkina Faso.

La Boucle du Mouhoun compte en outre les provinces du Sourou et du Nayala (figure 1). Elle couvre une superficie de 23.606 km². Le chef lieu de région est la ville de Dédougou, qui est située à 230 km au Sud ouest de Ouagadougou. La Boucle du Mouhoun est limitée:

- A l'Ouest et au Nord, par la république du Mali et la région du Yatenga,
- Au Sud par la région de Gaoua et celle des Hauts Bassins (Bobo-Dioulasso),
- Et à l'Est par la région de Koudougou.

D'un point de vue administratif les quatre provinces intéressées par l'étude (provinces de la Kossi, du Mouhoun, des Balés et des Banwa) sont subdivisées en 33 départements et comptent au total 663 villages.

CARTE DE L'AFRIQUE



CARTE DU BURKINA FASO

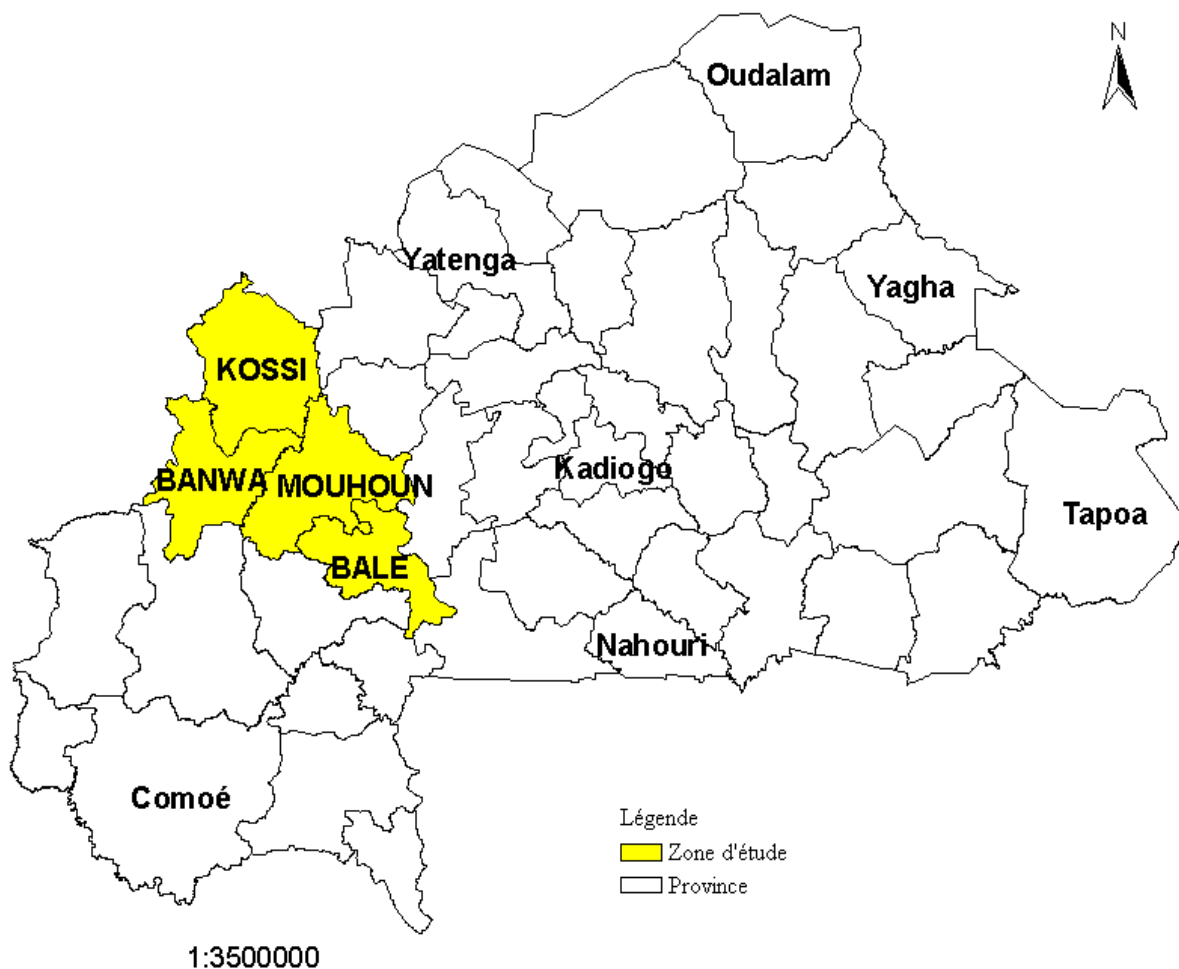


Figure 1: Carte de localisation de la zone d'étude

1.1.2. Le climat

On note une variation climatique entre le Sud et le Nord du Burkina Faso. La figure 2 montre un écart pluviométrique important entre le Sud (1400mm) et le Nord (500mm) correspondant à un passage de la zone soudano-guinéenne à la zone sahélienne.

Le secteur étudié est compris entre les isohyètes 800-900mm pour la province de la Kossi et 900-1100mm pour les provinces des Balés, Banwa et du Mouhoun.

On distingue deux saisons nettement différenciées au cours de l'année :

Une saison sèche de novembre à juin/juillet et une saison des pluies de juillet à octobre. Dans le secteur d'étude, la moyenne des températures tourne autour de 27° à 35°C.

L'évapotranspiration calculée sur la période 1961 à 1991 (Direction de la Météorologie Nationale) révèle que l'évapotranspiration est minimale au mois d'août (112.8mm) et maximale au mois de mars (232.2mm).

1.1.3. La végétation

Dans le secteur étudié, on rencontre une savane de type arboré à arbustif, avec un développement de tapis végétal (prairies) dès les premières pluies et de forêts galeries le long du fleuve Mouhoun (Ancienne Volta Noire), principal cours d'eau du Burkina Faso.

La strate arborée de la zone d'étude est dominée par des Parkii, des Combretacées, de *Parkia biglobosa*, de Terminaliacées, d'Acacias, d'Andropogonées, etc. La strate herbacée très variée est dominée par les familles des Andropogons des Pénisètum et des Schoenefeldine.

1.1.4. Les sols

Les sols du secteur d'étude de nature diversifiée et généralement propices aux activités agricoles et pastorales (figure 3). On distingue:

- Les *sols minéraux bruts* qui se développent sur des cuirasses latéritiques. On les rencontre dans la province des Banwa. Ils présentent une faible fertilité chimique à cause de leur forte capacité de drainage (bonne perméabilité).
- la classe des *sols peu évolués*, des *sols brunifiés* et des *vertisols*. On les rencontre en général dans les provinces des Balés du Mouhoun et de la Kossi. Ils présentent une bonne fertilité chimique (taux de saturation en base faible) et sont utilisés pour la culture du coton.
- la classe des *sols hydromorphes* développés sur les matériaux alluvionnaires et colluvionnaires et des *sols à sesquioxides de fer et de manganèse*. Ces deux types de sols constituent 75% des sols du secteur étudié et sont très sollicités pour la culture du coton et des oléagineuses.

1.1.5. Le relief et l'hydrographie

1.1. 5.1. Le Relief

La zone d'étude présente un relief caractérisé par deux domaines topographiques : une pénéplaine d'extension limitée et un massif gréseux. Cette configuration est due à la géologie et à l'histoire géomorphologique du pays (Boher et al., 1975).

Une pénéplaine monotone couvre uniquement la partie E et NE du Mouhoun et des Balés. Elle correspond à des terrains sableux, fins et pauvres en fer, qui résulte de l'altération des roches acides et siliceuses. On y rencontre par endroits des butes témoins cuirassées isolées, ou groupe des collines constituées de roches dures de type volcano – sédimentaires ou quartzitiques du Birrimien, ou encore d'inselbergs granitiques.

Les provinces des Banwa, de la Kossi et une partie des Balés (bordure occidentale) et du Mouhoun (partie centrale et occidentale) se caractérisent par un massif gréseux.

La pétrographie des grès varie de l'Est vers la frontière Malienne : on rencontre des "grès roses", des grès quartzeux et quartzitiques.

1.1.5.2. Le réseau hydrographique

La zone d'étude est parcourue par le plus grand fleuve du Burkina, le Mouhoun ou Volta Noire un cours d'eau pérenne qui se jette dans l'océan atlantique en passant par le Ghana. Le fleuve Mouhoun se rattache à l'un des quatre bassins versants que compte le pays : le bassin du Mouhoun qui à une superficie de 91.000km².

Les principaux affluents du fleuve Mouhoun sont : le Sourou, le Kossé, les Balés, le Poni, le Numbiel, le Bougouriba et le Bambassou (figure 4).

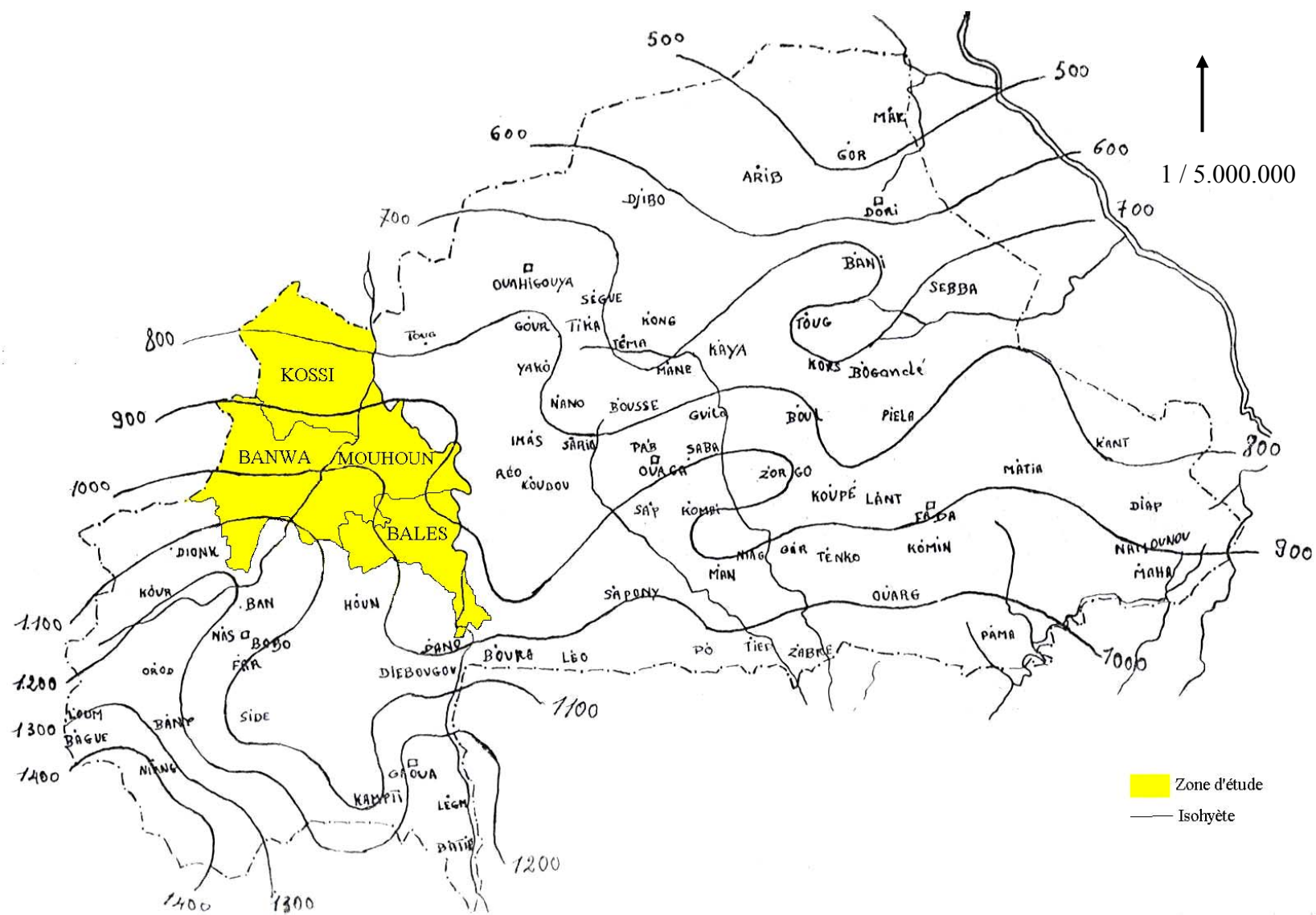


Figure 2 : Répartition des isohyètes (d'après des données de 1960)

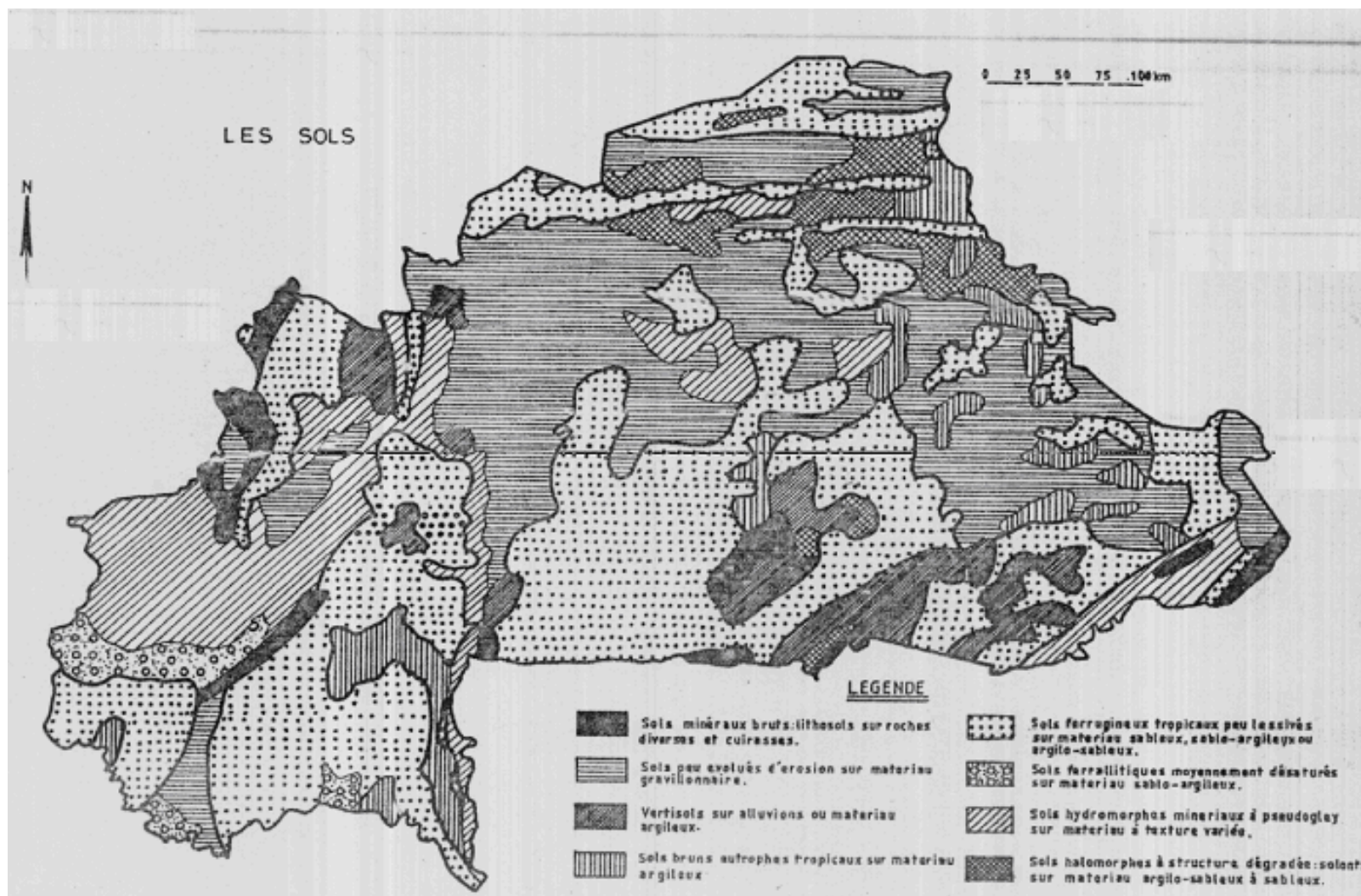


Figure 3 : Carte de distribution des sols dans la zone d'étude (d'après Nikiéma, 2002).

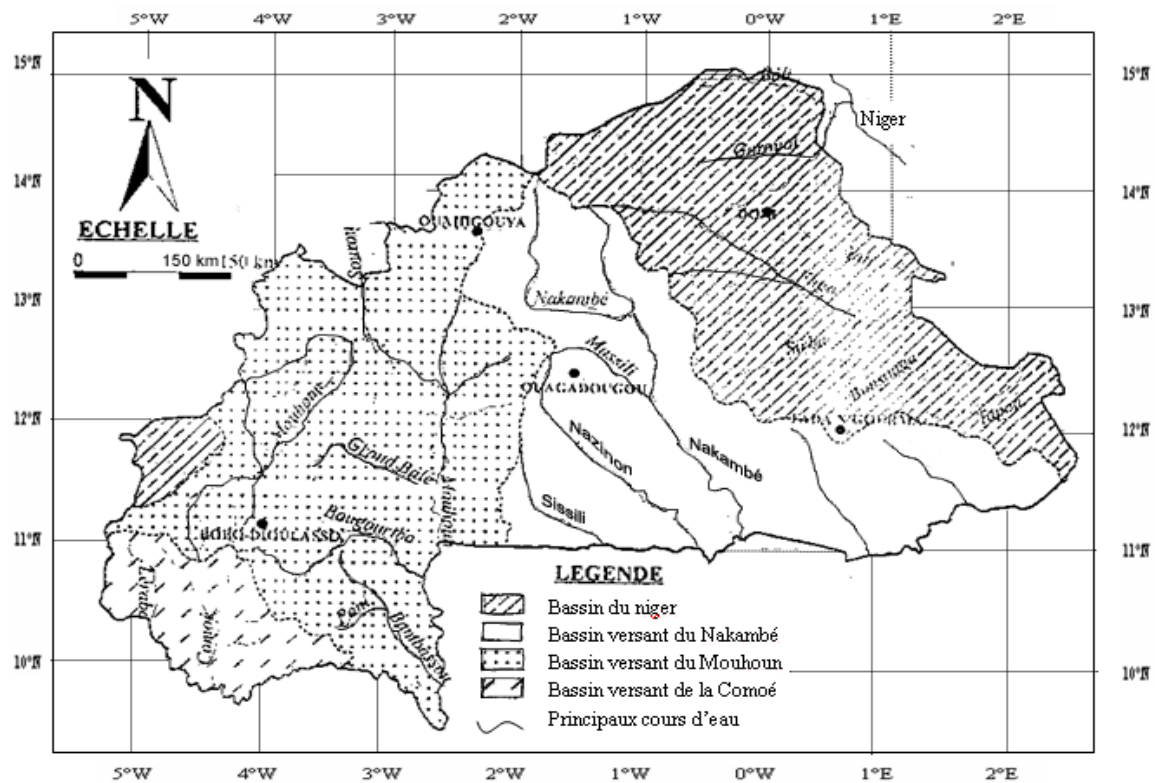


Figure 4 : Réseau hydrographique et principaux bassins versants du Burkina Faso (d’après Nikiéma, 2002).

1.1.6. Contexte géologique

On distingue deux ensembles géologiques dans le secteur étudié :

- La zone de socle constituée par les formations cristallines et métamorphiques d’âge Précambrien,
- La zone du sédimentaire ancien et récent, d’âges Néo-protérozoïque, Tertiaire et Quaternaire.

1.1.6.1. Les formations du socle

Au Burkina Faso, le socle est formé par des roches métamorphiques (Dabakaliennes ou Birrimiennes) et cristallines (Paléo- protérozoïque et Archéennes). Dans les provinces du Mouhoun et des Balés, on rencontre uniquement les formations cristallines constituées par les complexes granodioritiques et tonalites qui affleurent essentiellement au SW, au Centre et au NE du pays. Les faciès pétrographiques des complexes granodioritiques varient des termes leucocrates (SW), aux termes mésocrates (SW, Centre ouest et NW).

On note la présence de granites syn- à tardi-tectoniques constitués de granodiorites, granites à amphiboles, à biotites et parfois à muscovites, pegmatites et aplites, granites calco-alcalins dans la province des Balés. Dans la province des Balés au Sud, on rencontre également des roches basaltiques d'âge Paléo-protérozoïque.

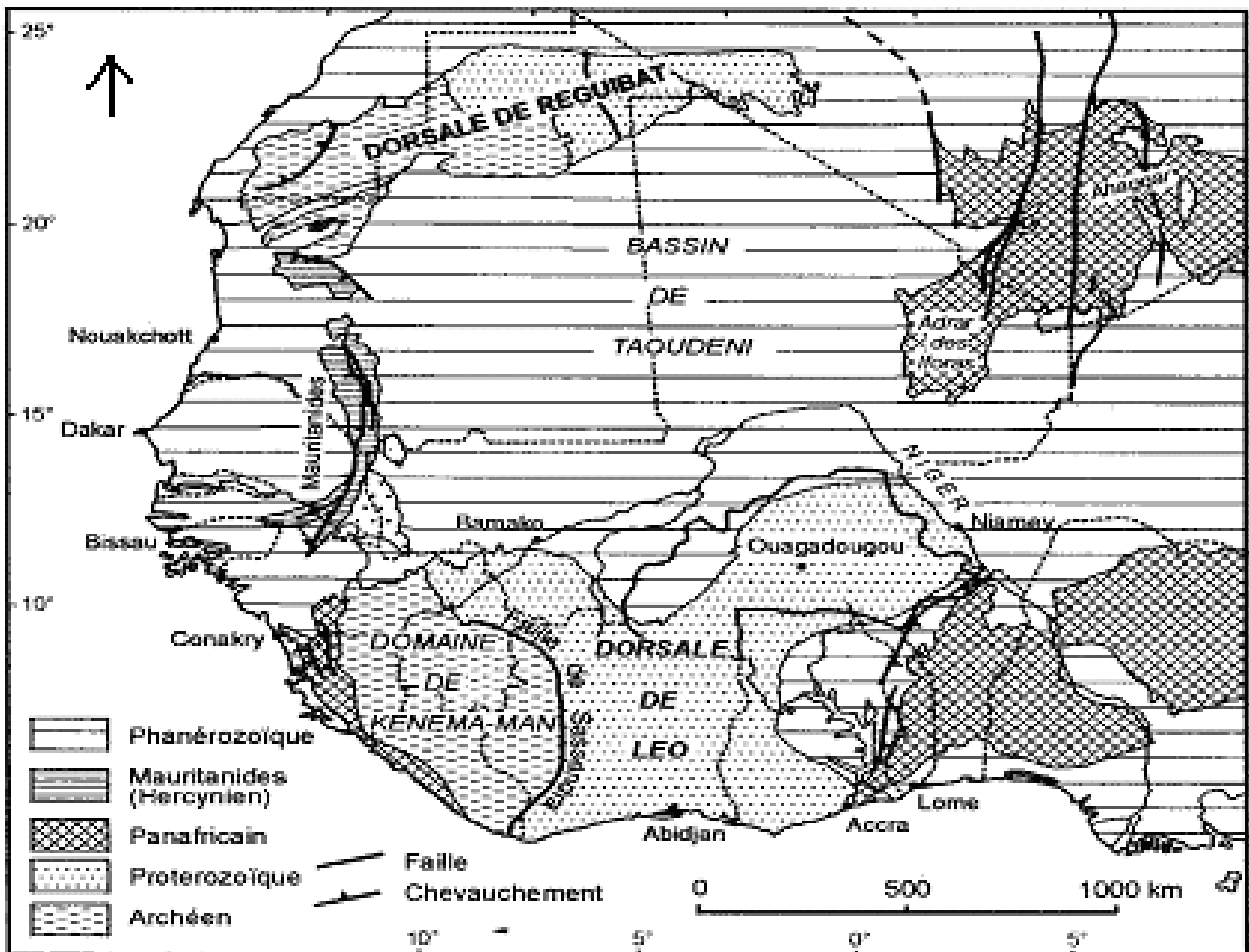


Figure 5 : Carte géologique simplifiée du craton Ouest Africain (d'après Boher et al., 1975)

1.1.6.2. Les formations sédimentaires

La zone d'étude et d'une manière générale les frontières W, NW et N du Burkina représentent la bordure SW du bassin de Taoudenni dont le remplissage a débuté vers 1,3 milliards d'années (voir figure 5).

La série représentant le Précambrien A est composé de grés et de schistes d'une puissance totale de 1500 mètres. La lithologie est à dominance de grés siliceux à ciment ferrugineux avec une texture plus ou moins fine. Ces formations constituent une bande orientée NNE, SSW qui occupe les provinces de la Kossi, des Banwa et la bordure occidentale du Mouhoun.

Elle repose en discordance sur les formations cristallines de la province des Balés (figure 6). Une formation alluviale d'une épaisseur considérable datant du Tertiaire recouvre la partie méridionale de la plaine de Gondo située le long de la frontière avec le Mali (NW), où le Continental Terminal se repose sur les formations du Précambrien A. Les alluvions sont constituées de limons argileux beiges et d'argiles grises ou noires (Barrère et Lansky, 1965 ; DGM, 1967).

Le manteau d'altération qui recouvre les formations cristallines se serait formé au cours des périodes anciennes beaucoup plus humides et a donné naissance à des fortes accumulations de fer à l'origine des accidents du relief. On retrouve sous les niveaux cuirassés un niveau d'argile latéritique d'étendant jusqu'à la zone de décomposition de la roche mère. La puissance de la cuirasse varie de cinquante centimètres à une dizaine de mètres. Dans le secteur étudié, ces niveaux cuirassés s'étendent sur la partie orientale de la province du Mouhoun et sur toute l'étendue de la province des Balés.

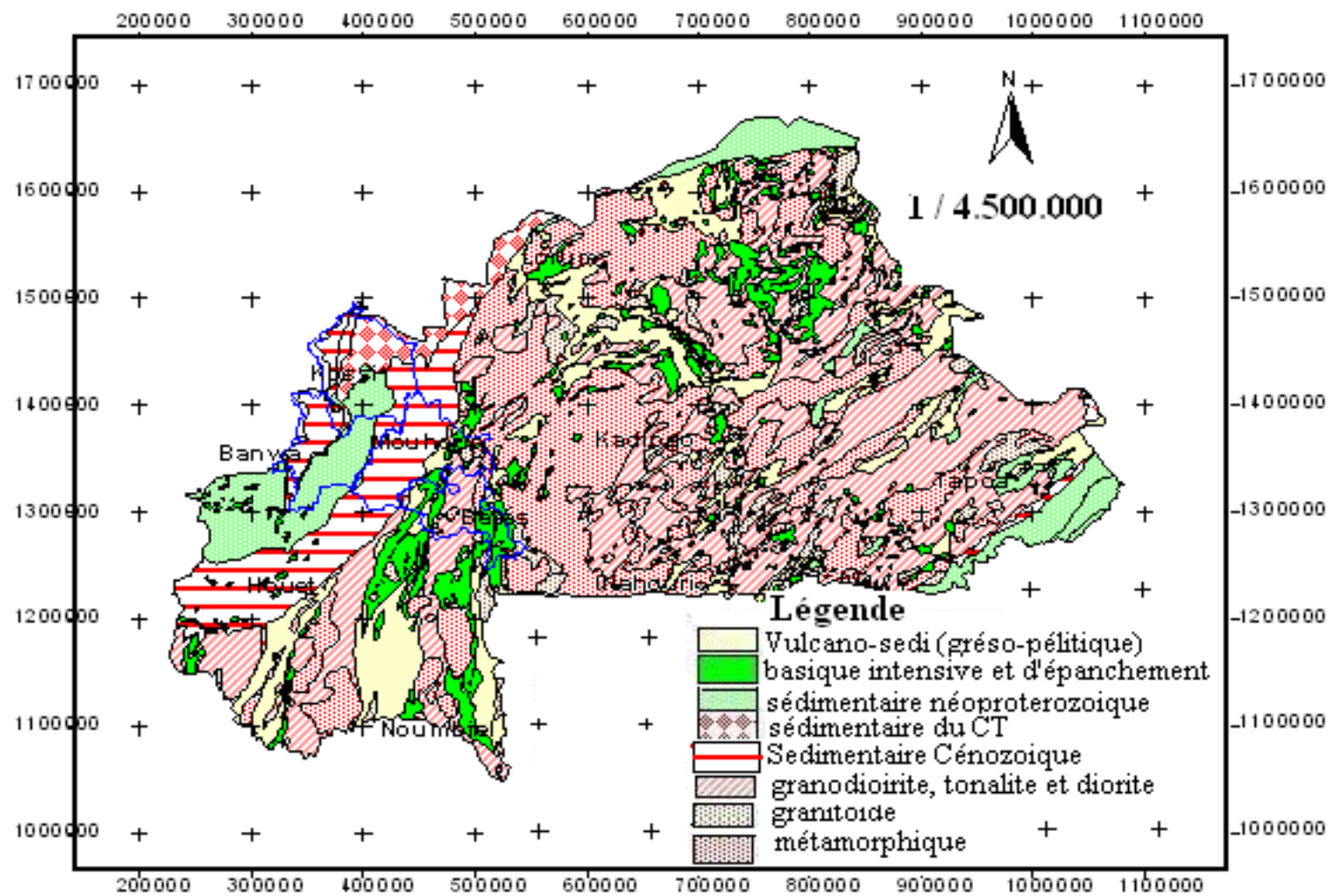


Figure 6 : Carte géologique simplifiée du Burkina Faso

1.1.7. Contexte tectonique

Du point de vue tectonique, les formations géologiques rencontrées au Burkina Faso ont subi plusieurs cycles orogéniques. Les plus marquants ayant été : les Orogenèses Libérienne, Eburnéenne et Panafricaine. Ces manifestations orogéniques se caractérisent par plusieurs phases de métamorphismes et intrusions de roches acides et basiques.

- L'Orogenèse Libérienne se caractérise par un épisode majeur situé autour de 2,6 milliards d'années (Hottin et Ouedraogo, 1975) marqué par des plissements et un métamorphisme de type méso à catazonal qui a affecté aussi bien les sédiments argileux à intercalations gréseuses, carbonatées ou manganésiennes, que les formations basiques à caractère plutonique ou volcanique.
- L'Orogenèse Eburnéenne (2,5 et 1,5 milliards d'années) s'est déroulée dans le domaine Baoulé Mossi. Elle se manifeste par une phase majeure de granitisation syntectonique, autour de 2 milliards d'années; ayant entraînée la fracturation du socle, la formation de plis isoclinaux, d'éléments structuraux de type écaillage et des phénomènes de charriage sur la bordure Nord de la zone d'étude. Du fait de l'intensité et de la complexité de l'orogénèse Eburnéenne, la tectonique de l'ensemble du socle anté-birrimien reste difficile à préciser. On note deux grandes directions de fracturations du socle anté-birrimien : NNE à NE, et N80°W à N60°W. Les dykes sont de direction identique aux fractures. Les granites migmatitiques et les granito-gneiss observés dans la zone d'étude de même que dans les régions du centre et du Nord sont foliés. Hottin et Ouedraogo (1975) signalent des plissements et des phénomènes de métamorphisme datant de 2,5 milliards d'années.
- L'Orogenèse panafricaine plus récente (500 millions d'années) n'est pas très marquée dans la zone d'étude. Elle touche beaucoup plus, l'extrême NE et SE du pays où l'on note l'existence de formations plissées et métamorphisées.

1.1.8. Contexte hydrogéologique

On distingue dans la zone d'étude le système aquifère de la zone de socle et le système aquifère de la zone du sédimentaire ancien et récent (Continental Terminal). En fonction de la porosité, ces systèmes aquifères sont classés en:

- *Aquifère discontinu* : La ressource est localisée et circule à travers les failles/fractures des roches massives du socle: granites, dolérites, calcaires, silexites, grès, ou dans les roches plastiques,

- *Aquifère semi continu* : La ressource est localisée dans le milieu poreux et circule dans les fractures et les joints de liage de grès, de roches carbonatées, des cuirasses, et des schistes et
- *Aquifère continu* : Les eaux circulent à travers les pores intergranulaires et microfissures issus de l'altération : altérites surmontant le socle, alluvions, sables, grès friables.

Le tableau I donne un aperçu de l'importance relative de productivité des différents systèmes aquifères dans les différentes formations aquifères.

Grandes unités hydrogéologiques	Systèmes Aquifères		
	Milieu fissuré	Zone altérée	Latérites
Socle :			
Granito gneissique	A	A	A
Sédimentaire ancien:			
Gréseuse	A	A	C
Schisteuse	A	A	B
Calcaro-dolomitique	A	A	C

Tableau I : Importance de productivité des systèmes aquifères dans les grandes unités hydrogéologiques (Ministère de l'eau (septembre 1993), rapport 60.451/29) : A = Importance grande, B= Importance moyenne, C= Importance faible)

1.1.8.1. Les systèmes aquifères de la zone de socle

Les aquifères de socle, tributaire de l'altération et des phénomènes tectoniques, sont discontinues et d'extension limitée. A l'état sain les roches cristallines sont dépourvues de porosité. Elles ne constituent des aquifères importants qu'à la suite de phénomènes secondaires de fracturation et d'altération.

Les réseaux aquifères dans les formations cristallines sont : les zones fracturées et broyées et les horizons d'altérations. Les fractures jouent le rôle de drains et les couches altérées celui de réservoir (emmagasinement). On distingue deux types de systèmes aquifères en zone de socle (figure 7 et 8):

- Un système aquifère superficiel résultant des facteurs géomorphologique externe (altération et érosion), et

- Un système aquifère profond lié à la tectonique.

● *Le système aquifère superficiel*

Il est constitué par la cuirasse latéritique et l'horizon alluvionnaire sous-jacents (Figure 7 et 8a).

La présence des cuirasses latéritiques est plus marquée dans les provinces des Balés et dans la bordure orientale de la province du Mouhoun où l'altération des granites, granodiorites, pegmatites et aplites favorise leur formation.

La figure 8b présente une autre variante d'aquifère superficiel où le réservoir est constitué par un horizon d'altération fissuré. Ce genre d'aquifère constitue la frange la plus productrice des horizons supérieurs du profil d'altération.

En général, les nappes d'eau contenues dans ces horizons sont exploitées par les populations locales à l'aide de puits traditionnels à grands diamètres. Tributaires des aléas climatiques ces puits tarissent plus ou moins rapidement après la période hivernale.

● *Le système aquifère profond*

Il comprend deux niveaux :

- Un horizon fissuré surmontant directement la roche saine. Il doit son existence aux différentes phases de déformations tectoniques ayant entraîné la fracturation du socle anté-birrimien.
- L'arène grenue sus-jacent résultant des processus d'altération de la roche mère.

A cause de leur caractère confiné ces horizons constituent en principe des aquifères moins vulnérables à la pollution de surface que les premiers. Ils constituent des aquifères d'assez bonne qualité avec des débits moyens de 0.5 à 5m³/h (cas de forages localisés dans certains départements dans la province du Mouhoun).

On rencontre dans les provinces des Balés et du Mouhoun les trois principaux aquifères ci-dessous :

- les aquifères des cuirasses latéritiques,
- les aquifères du socle altéré et
- les aquifères du socle fissuré et/ ou fracturé.

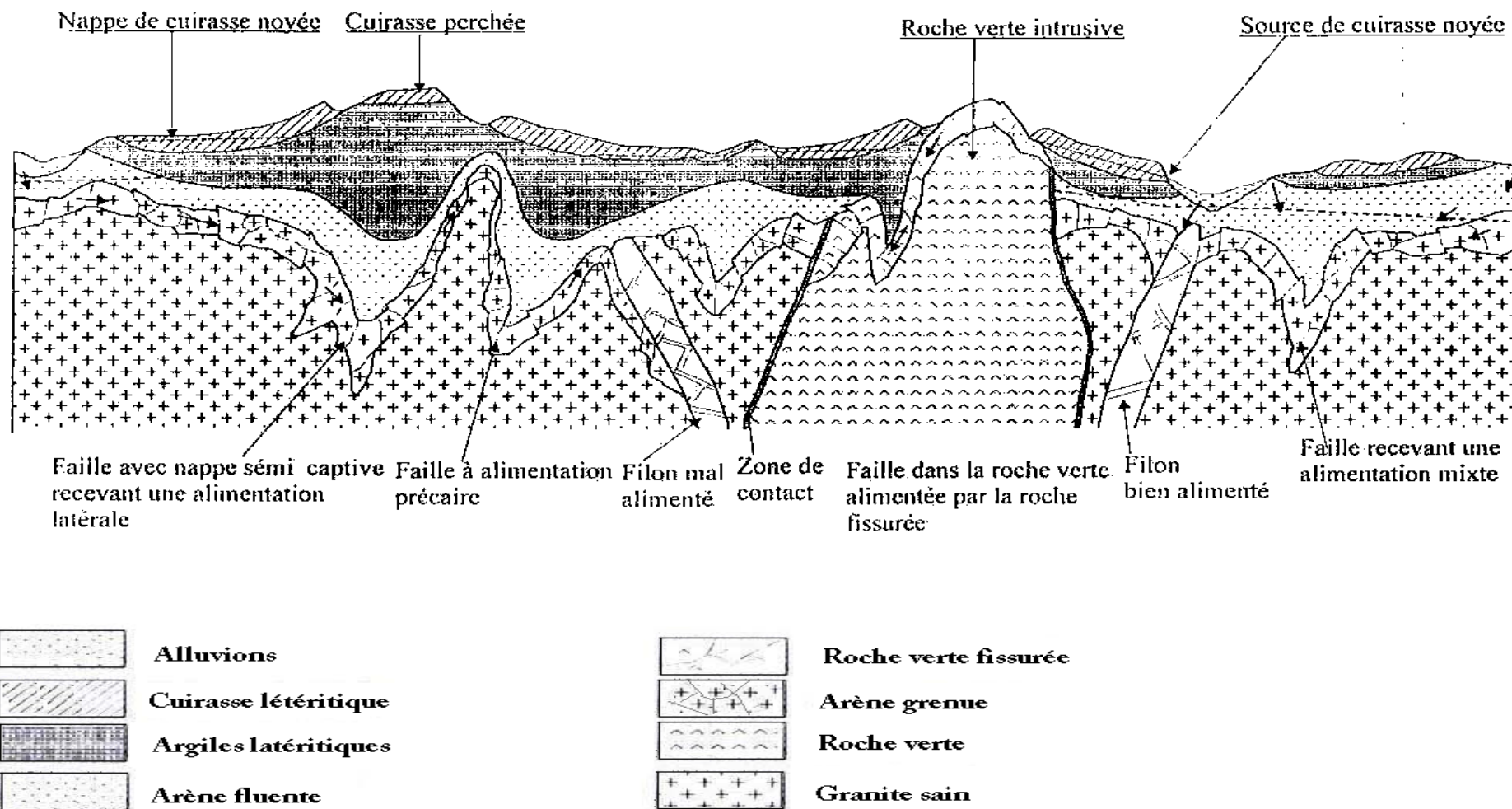


Figure 7 : Mode de gisement des eaux souterraines dans la zone de socle cristallin du Burkina Faso (Savadogo, 1984)

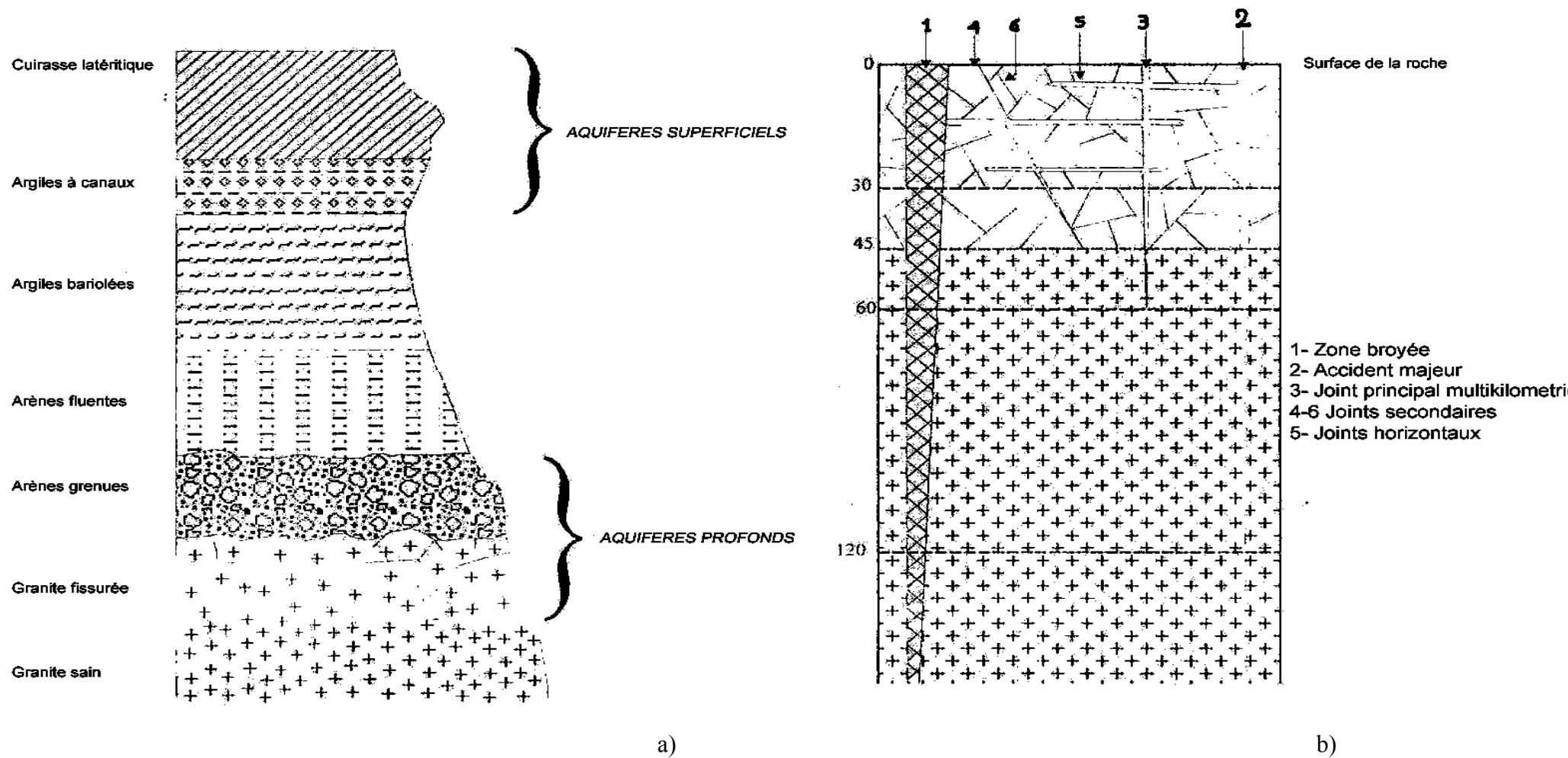


Figure 8 : a) Profil type de l'altération des granites

b) Structure schématisée d'un aquifère de fissure (Savadogo, 1984)

1.1.8.2. Les nappes des systèmes aquifères du sédimentaire ancien et du Continental terminal

D'une manière générale les aquifères des formations sédimentaires anciennes sont pourvus d'une porosité et d'une perméabilité importantes. A ce titre, ils sont plus productifs. On distingue la même superposition des niveaux aquifères que dans le socle, avec du bas vers le haut :

- la roche saine ou dure,
- la zone altérée, et
- l'horizon latéritique.

Tout comme en zone de socle, ces trois niveaux différencient deux types de systèmes aquifères : un système superficiel et un système profond.

● *Le système aquifère superficiel*

Il est représenté par le complexe fluvio-lacustre du Continental terminal qui forme une nappe très régulière et de grande extension située au Nord du bassin sédimentaire de Taoudéni. Son épaisseur varie de 10 à 30 mètres. Dans sa partie Burkinabé, cette nappe est exploitée par les populations à l'aide de puits traditionnels qu'on retrouve ces puits dans la partie Ouest de la province des Banwa. Dans cette même province, on rencontre également des aquifères perchés qui ont une importance temporaire.

● *Le système aquifère profond*

Il correspond à la partie fissurée et fracturée par un réseau de mégalinéaments traversant les grès, calcaires, silexites et les schistes.

Les grès présentent un aspect et une couleur variée liées à la nature du ciment qui peut être argileux, argilo limoneux ou glauconneux. Ils sont compartimentés par des réseaux de failles ouvertes (perméables) de direction NW –SE et de failles étanches de direction SW-NE. A ce titre, ils sont considérés comme des aquifères discontinus. Au niveau de l'ensemble gréseux du bassin sédimentaire, les "*grès de Bobo*" (grès à galets de quartz) et les grès de base se sont révélés être des aquifères de bonne transmissivité ($1,4 < T < 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$; Nikiéma (2002)) rapporte des débits spécifiques avoisinant $1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. Dans les grès, la productivité des forages n'est pas fonction de l'épaisseur de l'altération.

La profondeur des forages varie entre 65 et 85 m dans la partie centrale du bassin sédimentaire (Mouhoun), entre 85 et 100 m dans sa partie périphérique (parties E et S), dans la bordure occidentale des Balés et dans la province de Bobo Dioulasso.

Les calcaires et les silexites des séries gréso-schisto-dolomitiques forment un horizon continu. Ces formations sont considérées comme de véritables drains au sein des formations qui les bordent. Ils constituent une large bande continue orientée NE-SW et désignée sous le terme de "*Formations de Guéna-Bouroukoudinga* " avec une épaisseur est estimée entre 30 et 40 m. La profondeur moyenne des forages implantés dans ces formations varie entre 65 et 85 m. Ce sont les aquifères les plus productifs avec des débits avoisinant 200 m³/h; les débits spécifiques sont supérieurs à 1m³/h/m.

1.2. Données sur la population

Selon le recensement général de 1996, la population des quatre provinces d'étude est estimée à 849550 habitants avec 51% de femmes. La densité moyenne est de 36 habitants/km² et varie entre un minimum de 29 habitants / km² (province de la Kossi), et un maximum de 41 habitants /km² (province du Mouhoun).

Les différentes ethnies rencontrées sont:

- Les Bobos, les Bwabas, les Dafings qui se concentrent autour d'habitats exigus et serrés.

Autour de ces maisons s'accumulent des tas d'immondices résultants des activités ménagères et agropastorales.

- Les Samos, les Nounis, les Kô vivent dans des habitats dispersées contrairement aux premiers.

- Les Mossis et surtout les Peulhs s'organisent en quartiers, autour de concessions beaucoup plus éloignées les unes des autres. Toutes ces ethnies pratiquent l'agriculture et l'élevage.

Les principales productions agropastorales sont :

- Les productions végétales : céréales (sorgho, mil, maïs, riz, fonio), cultures de rente (coton, arachide, sésame, nébié) et cultures vivrières (patate, soja, fruits et légumes). Pour l'ensemble de ces cultures, les paysans utilisent différentes sortes de techniques agricoles, d'intrants et engrais agricoles dont la qualité et le dosage posent problème.

- Les productions animales sont : les ovins, les bovins, les caprins, les porcins, les arins, et les volailles.

En raison des problèmes de déficits céréaliers dus à la mauvaise pluviométrie des cinq dernières années, cette population jadis constitués d'agriculteurs (85%) développe de nos jours des activités annexes génératrices de revenus que sont : le commerce, et l'artisanat.

Chapitre 2 : Problématique et Approche méthodologique

2.1. Problématique

Le projet d'hydraulique villageoise de réalisation de 310 forages financé par la BADEA entre 1998 et 2004 constitue une opportunité pour les populations des communautés rurales des provinces du Mouhoun, des Balés, de la Kossi, et des Banwa pour s'approvisionner en eau potable. Nous rappelons ici que sur les 376 forages réalisés, 310 ont été positifs, 54 négatifs et 12 abandonnés pour des raisons techniques (figure 9).

Sur 310 forages échantillonnés pour analyse chimique et de qualité des eaux, 305 disposent d'analyses complètes dont 179 ont montré des eaux potables (valeurs des paramètres physico-chimiques inférieures aux normes fixées par l'OMS, Annexe 1) et 126 forages des "*eaux non potables*" (c'est-à-dire, présentant des concentrations en fer, en zinc et en nitrites supérieures à la norme). Leur consommation en absence de tout traitement correctif présente un risque sanitaire pour les populations concernées.

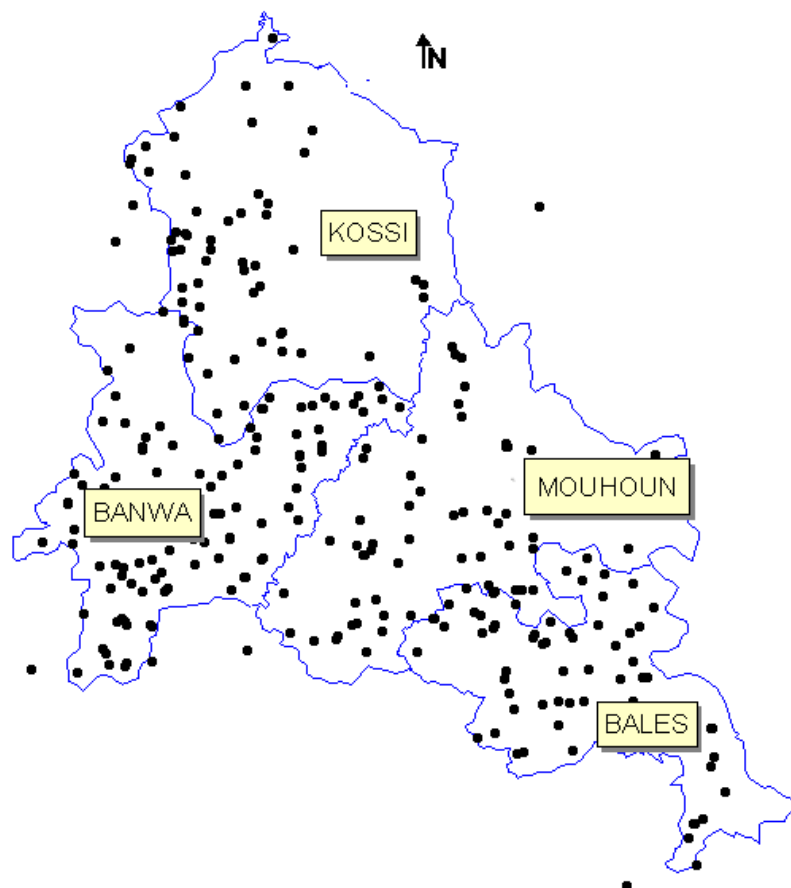


Figure 9 : Carte de localisation des forages du projet hydraulique villageoise 310 forages

2.2. Objectifs de l'étude

L'objectif recherché dans cette étude de caractérisation hydrochimique et de qualité des eaux des aquifères captés par les forages du projet en question est de déterminer :

- comprendre le chimisme des eaux, l'origine et les mécanismes des différents types de pollution identifiés ;
- de proposer des recommandations et définir des mesures à prendre pour remédier à cette situation.

2.3. Méthodologie d'étude

Pour conduire cette étude, nous avons collecté des données d'analyses physico-chimiques des eaux de 310 forages implantés dans la zone d'étude et les données d'analyses de sols rencontrés dans le même secteur.

Les analyses d'eau ont porté sur les paramètres suivants :

- Paramètres physiques : Température, pH, Conductivité Electrique, Alcalinité Totale (ou Alcalinité-m, considérée comme l'expression de la teneur en ions HCO_3^- et ions CO_3^{2-}), la Dureté Totale (essentiellement liée aux ions calcium et magnésium, voir remarque ci-après).
- Ions majeurs : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} .
- Eléments mineurs et indicateurs de pollution : NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , F^- , PO_4^{2-} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} .

Les analyses chimiques ont été réalisées dans le laboratoire du *BUMIGEB* et dans un laboratoire privé.

Remarque :

Obtenu par dosage titrimétrique à l'EDTA, *La dureté totale* d'une eau (où titre hydrotimétrique) traduit la présence d'ions Ca^{2+} , Mg^{2+} associés aux ions CO_3^{2-} et HCO_3^- et SO_4^{2-} . Elle est exprimée en degré français ($1^\circ\text{F} = 4\text{mg/l Ca}$ ou $2,35\text{mg/l Mg}$) et est donnée par la formule suivante :
Dureté totale (DT) = dureté calcique + dureté magnésium = dureté carbonatée (DC) + dureté sulfatée (DS) .

La Dureté carbonatée est aussi appelée Dureté permanente tandis que la Dureté sulfatée est également appelée Dureté Temporaire ou Non Carbonatée et doit son existence à l'association des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} à SO_4^{2-} .

Selon Matthes (1994), il peut arriver que la dureté carbonatée soit supérieure à la dureté totale. Auquel cas on admet l'existence d'une *dureté alcali-bicarbonatée* essentiellement liée aux ions Na^+ . $\text{DC} = \text{dureté totale} + \text{dureté alcali carbonatée}$.

Les données d'analyses de sols concernent des échantillons relevés tous les 20 cm entre 0 et 1,20 m et portent sur les teneurs en matière organique, azote (total et assimilable), potassium, phosphore (total et assimilable), bases échangeables (S), sur la capacité d'échange cationique (CEC), le taux de saturation (V) et le pH des eaux d'imbibition.

2.4. Exposé des résultats

Pour apprécier la qualité des analyses chimiques sur les éléments majeurs, nous avons évalué l'erreur d'analyse sur chaque échantillon à partir de la formule du bilan chimique :

$$|e| = \frac{\sum r_{anions} - \sum r_{cations}}{\sum r_{anions} + \sum r_{cations}}, \text{ (r représentant la concentrations ionique en méq/l)}$$

L'erreur d'analyse calculée varie entre -10,9 et 74,14. Mais puisque les eaux étudiées présentent en générale une faible minéralisation, nous avons considéré dans nos interprétations toutes les analyses pour lesquelles l'erreur d'analyse était inférieure ou égale 15, comme le suggère certains auteurs (comme Matthes, 1994).

En se basant sur les résultats analytiques obtenus, nous avons déterminé les faciès hydrochimiques des aquifères et identifié deux types de pollution pouvant compromettre la potabilité des eaux de forages :

- Pollution par les métaux lourds, et
- Pollution par les nitrates et nitrites.

Nous avons utilisé différentes méthodes d'interprétation des données :

- Diagramme de Piper pour caractériser et classer les eaux,
- Traitement statistique avec calcul des moyennes et études de corrélation pour voir/identifier les relations entre certains paramètres.
- Etablissement de cartes de répartition spatiales des paramètres indicateurs de pollution des eaux de forages.

DEUXIEME PARTIE

EXPOSE DES RESULTATS
DE
**EXPOSE DES RESULTATS
DE**

L'ETUDE DE CARACTERISATION HYDROCHIMIQUE ET QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES
L'ETUDE DE CARACTERISATION HYDROCHIMIQUE ET QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES

Chapitre 1 : Etude de caractérisation hydrochimique des eaux

1.1. Caractéristiques physiques des eaux

Les résultats des analyses physiques et chimiques des eaux sont donnés dans l'annexe 4.

1.1.1. Température

La température des eaux varient entre 20.6°C et 34.10°C. Les eaux de forages ont des températures supérieures à la norme de 25°C exceptés dans les forages implantés dans les schistes métamorphiques et méta volcaniques (tableau II, colonne 2). Ces valeurs ne reflètent pas la température réelle des eaux souterraines dans les aquifères, mais plutôt l'effet du rayonnement solaire journalière sur l'équipement des ouvrages de captage.

Ces températures élevées favorisent un développement de l'activité microbologique souvent à l'origine d'une pollution, de processus d'oxydoréduction des oxydes et hydroxydes.

Unités hydrogéologiques	Valeurs moyennes					
	Temp (°C)	TDS	IR	Cond. Elect μS/cm	pH	Dureté Tot. (°F)
Schistes	24.35	874.58	6.88	568.48	7.83	37.05
Granite/gneiss	29.25	413.27	8.85	268.63	7.49	18.38
Socle	26.08	643.92	7.865	418.555	7.60	27.70
Argilite / Siltites / Calcaire	28.19	955.91	7.7275	621.345	7.71	57.305
Grès	27.95	209.64	11.97	136.27	6.96	12.26
Dolérites	25.33	577.26	7.265	375.22	7.40	42.44
Sédimentaire ancien	27.12	580.93	8.9875	377.61	7.33	37.33

Tableau II : Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques des eaux dans les différentes unités hydrogéologiques

1.1.2. pH des eaux

Les valeurs de pH mesurés sur le terrain et celles mesurées au laboratoire sont légèrement différentes (voir Annexe 4). En général, les eaux issues des formations granitiques ou gneissiques et celles des formations gréseuses ont un caractère neutre ($6.85 < \text{pH} < 7.35$). Seul le forage *03BADEA237 de wédo-école, à Douma (département de Tansila, province de Banwa)* présente un pH fortement acide (de l'ordre de 2.2). Ce forage capte les formations gréseuses (grès roses) et pose un problème de potabilité vis-à-vis du pH.

Les eaux des formations calcaires, siltites, des argilites, et métamorphiques présentent un pH neutre à légèrement basique ($7.5 < Ph < 8.7$). Les eaux à pH supérieurs à 8.5 montrent une couleur beige.

1.1.3. Alcalinité et Dureté totale

- Alcalinité

Les résultats d’analyses physico chimiques des eaux (Annexe 4) montrent que le titre alcalimétrique (TA) est nul. Ce qui traduit l’absence d’ions CO_3^{2-} dans les eaux des forages. Le titre alcalimétrique complet (TAC) des eaux tourne autour d’une moyenne de 115mg/l. Ce qui est conforme à la norme OMS ($10 < TAC < 350$ mg/l).

- Dureté

On constate d’après la figure 10 que :

Les eaux sont de nature douce dans les aquifères gréseux et granito-gneissique. Ces formations présentent des duretés faibles, moyennes de l’ordre de 12,26°F dans les premiers et 18,38°F dans les seconds.

Les eaux sont dures dans les schistes métamorphiques et les dolérites. La dureté moyenne des eaux varie entre 37 et 43°F. Les valeurs de dureté les plus élevées sont rencontrées dans les aquifères constitués d’argilites, de calcaires et de siltites avec une moyenne de 57,305°F, largement supérieur à la norme de 35°F. Par conséquent ces eaux posent un problème de potabilité et pourraient être à l’origine d’un entartrage des ouvrages de captage.

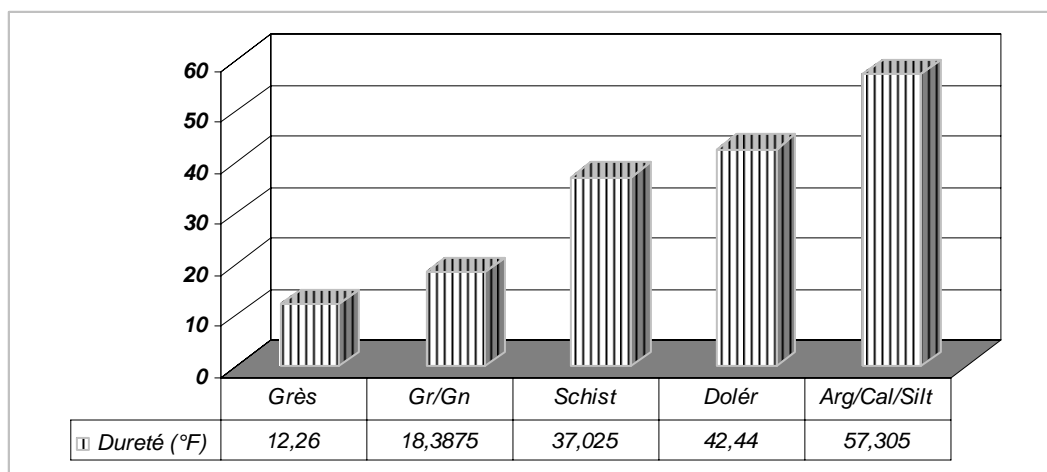


Figure 10 : Comparaison des duretés moyennes dans les différentes formations aquifères (nota : Gr/Gn : Aquifères granito-gneissiques; Schist : Schistes; Dolér : Dolérites; Arg/Cal/Silt : Argilites, Calcaires et Siltites)

1.1.4. Conductivité électrique

Dans la plupart des cas, la conductivité mesurée sur le terrain diffère de celle mesurée au laboratoire. Les différences peuvent être positive (variation maximale +1900) ou négative (variation maximale -1581). Ce qui indiquerait donc le déroulement de réactions de précipitation /dissolution durant la conservation des échantillons et expliquerait les erreurs d'analyses constatées lors de l'établissement du bilan ionique des échantillons d'eau.

Le tableau II compare les valeurs moyennes de conductivité électrique mesurée dans les différentes formations aquifères. La conductivité des eaux des formations gréseuses et cristallines sont respectivement de 268.63 µS/cm et 136.27 µS/cm. Ces eaux sont faibles à moyennement minéralisées (tableau III).

Les valeurs de Teneurs en Sels Dissous (TDS) rencontrées dans ces eaux sont aussi faibles. La moyenne tourne autour de 413.27 pour les eaux des formations gréseuses et 209.64 pour les eaux des formations cristallines. Les eaux des aquifères schisteux et aquifères constitués d'argilites, de calcaires ou siltites apparaissent beaucoup plus minéralisées; la valeur moyenne du TDS étant de 874.58 pour les premiers et 955.91 pour les derniers.

Conductivité (µS/cm)	Degré de Minéralisation	Qualité de l'eau
C<100	Très faible	Excellente
100<C<200	Faible	Excellente
200<C<400	Peu accentue	Excellente
400<C<600	Moyenne	Bonne
600<C<1000	Importante	Utilisable
C>1000	Excessive	Utilisable

Tableau III : Classification des eaux de boisson en fonction de la conductivité D'après Potelon et Zysman, (1993)

Certains forages qui présentent des valeurs de conductivité supérieure à la norme de 1250 µS/cm, posent un problème de potabilité (tableau IV).

N° de forage	Province	Département	Village (Quartier)	Cond/Terrain µS/cm	Cond/Labo µS/cm	Unité lithologique
99BADEA84	Bale	Pa	Didie (Bieneyie)	1953	973	Andesite
00BADEA146	Banwa	Sanaba	Moussankuy (Ecole)	4300	6000	Gres calacire
00BADEA178	Banwa	Solenzo	Dissankuy (Pehoun)	1555	1675	Argilite
01BADEA206	Kossi	Barani	Pampakuy (Pampakuy)	1317	1814	Gres quartziques
01BADEA209	Banwa	Sanaba	Kossoba Mossi (yadsé)	1778	1910	Gres fin fissure
01BADEA215	Kossi	Barani	Bangassikoura (Gorokin)	1879	1680	Gres grossier
01BADEA241	Kossi	Sono	Bankoumana (Pannabe)	2300	-	Gres
04BADEA300	Banwa	Kouka	Houna (Bobo-mossi)	25510	1000	Gres fin fissure

Tableau IV: Valeurs élevées de conductivité électrique

1.2. Caractérisation hydrochimique

1.2.1 Faciès chimiques des eaux

Les analyses chimiques dont l'erreur $|e|$ est inférieure à 15% (soit 194 sur les 305 forages) ont été reportées sur le diagramme de Piper (figure 11). Ce diagramme a permis de définir le faciès hydrochimique de chaque échantillon d'eau et montre que l'anion dominant dans les eaux analysées est l'ion HCO_3^- . Ce qui veut dire que toutes les eaux sont toutes du *type bicarbonaté*.

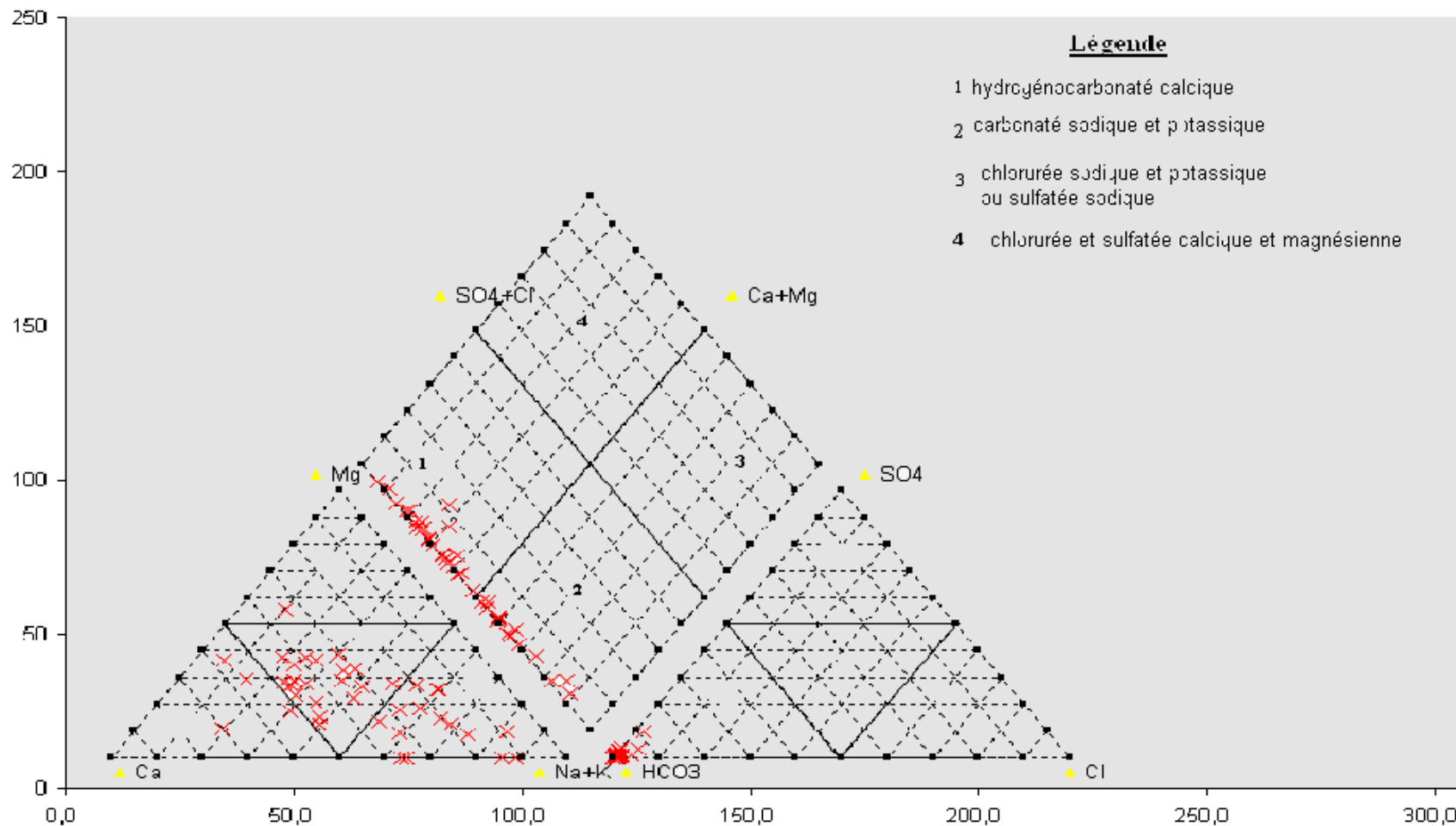
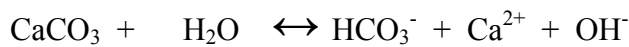
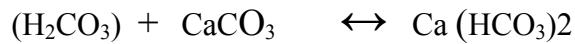


Figure 11: Faciès hydrochimique des eaux

Chez les cations, on remarque que dans 92.3% des cas il n'y a pas d'ions dominants (faciès mixte). Ca^{2+} est le cation prédominant dans 2% des cas, Mg^{2+} dans 0.5% (soit dans un seul cas) et $[Na^+ + K^+]$ dans 8.2%. Par conséquent les eaux peuvent être attribuées aux faciès :

- "bicarbonaté calco-magnésien" et,
- "bicarbonaté sodi-potassique".

Le caractère prédominant des bicarbonates dans les eaux est le résultat des réactions du type :



1.2.2 Processus d'échanges ioniques

L'enrichissement des eaux bicarbonatées en ions Na (processus d'alcalinisation) serait le résultat de phénomène d'échange ionique entre Ca^{2+} de l'eau et Na^+ des argiles (figure 12).

Ce phénomène se déroule en général au contact des argiles et conduit à l'évolution du chimisme de l'eau du pôle bicarbonaté calco-magnésien vers le pôle bicarbonaté sodi-potassique.

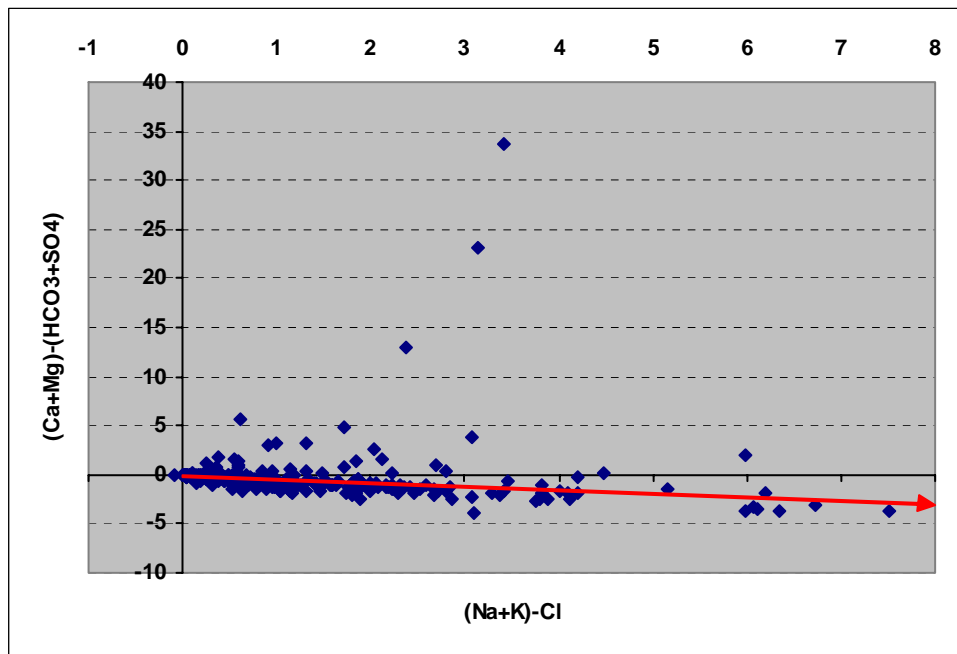


Figure 12: Processus des échanges ioniques

L'observation de la figure 11 permet de distinguer un cadran supérieur droit où la somme $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ est supérieure à la somme $(HCO_3^- + SO_4^{2-})$ et un cadran inférieur où elle est inférieure. Dans ce dernier cas l'excès de $HCO_3^- + SO_4^{2-}$ exprime l'existence d'une dureté *alcali-bicarbonatée* (voir remarque page 20) liée aux ions Na^+ et K^+ .

Dans la zone d'étude, 75% des aquifères sédimentaires ont un toit constitué d'argiles dont la présence favorise les échanges d'ions. C'est le cas des aquifères gréseux à ciment argileux, et les aquifères constitués d'argilites rencontrés dans les Banwa (départements de *kouka* et *sanaba*) et le Mouhoun (*kona* et *bomboronkuy*).

Chapitre 2 : Qualité chimique des eaux

2.1. Teneurs anormales en fer et zinc

Parmi les métaux lourds analysés, le fer et le zinc ont révélé des teneurs anormales.

2.1.1. Teneurs anormales en Fer

Au total 63 sur les 305 forages (soit 20.65 %) présentent des teneurs supérieures à la norme des 0.3mg/l. Ces forages (voir Annexes 4) posent donc un problème de potabilité de leurs eaux.

La figure 13 compare la valeur moyenne des teneurs anormales en fer dans les différents types d'aquifères. La moyenne la plus élevée est notée dans les aquifères cristallins, suivis des aquifères gréseux et schisteux. Comme nous le verrons plus tard (voir page 42, paragraphe 2.4), l'accumulation du fer à des teneurs beaucoup plus importantes dans les eaux des formations cristallines et gréseuses d'âge précambrien, serait le résultat de processus de réduction microbologique des oxydes et hydroxydes de fer rencontrés dans ces milieux.

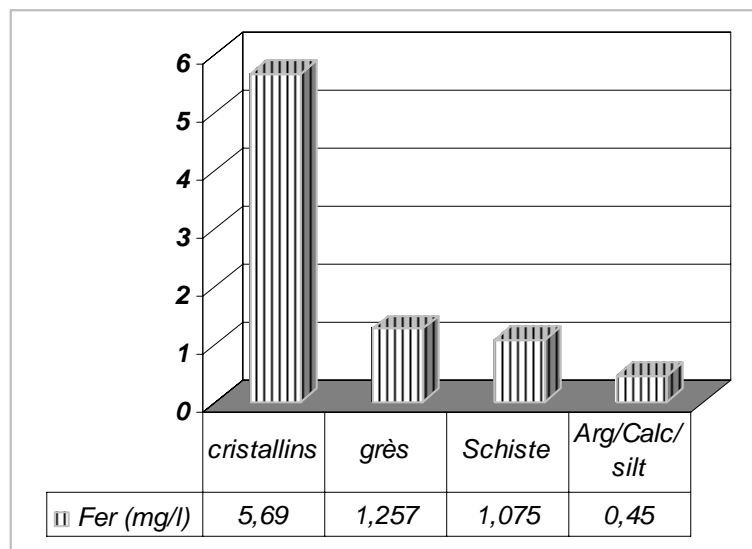


Figure 13 : Comparaison des moyennes des teneurs anormales en fer dans les formations aquifères

Les aquifères constitués d'argilites et siltites présentent d'après cette figure les teneurs en fer les plus faibles. Ce qui pourrait s'expliquer par le rôle de « *barrière géochimique* » que peut jouer la nature du substratum de ce genre d'aquifère vis-à-vis des métaux lourds.

2.1.2. Teneurs anormales en zinc

Dans l'ensemble, les concentrations en zinc dans les eaux étudiées varient de 0 à 39.6 mg/l ; les teneurs les plus faibles ayant été rencontrés dans les réservoirs argileux et schisteux à cause de leur rôle de « *barrière géochimique* ».

La figure 14 compare la moyenne des teneurs en zinc dans les différents types d'aquifères où des anomalies en zinc (teneur > 5 mg/l) ont été notées. Au total 14 forages ont été identifiés (voir Annexe 4). La moyenne la plus élevée des teneurs anormales en zinc a été observée dans les aquifères gréseux (moyenne de l'ordre de 13.950 mg/l suivis des aquifères schisteux (9.10 mg/l) et cristallins (6.95 mg/l).

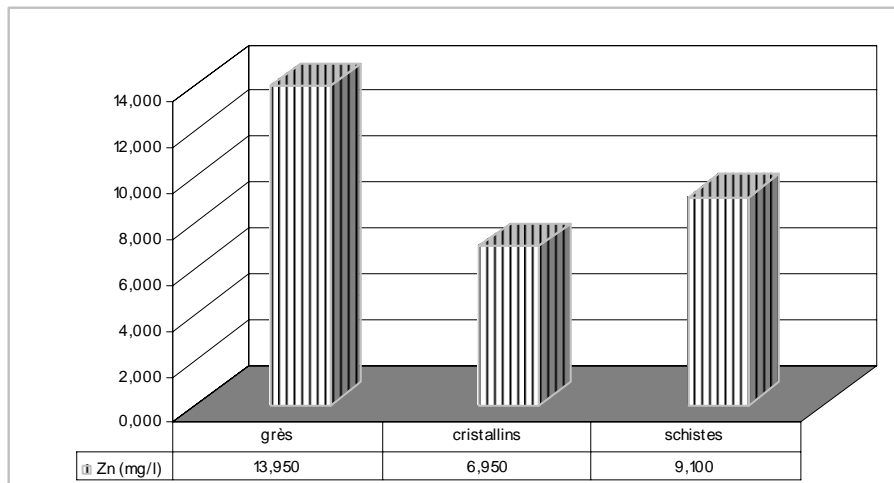


Figure 14 : Comparaison des moyennes des teneurs anormales en zinc dans les formations aquifères

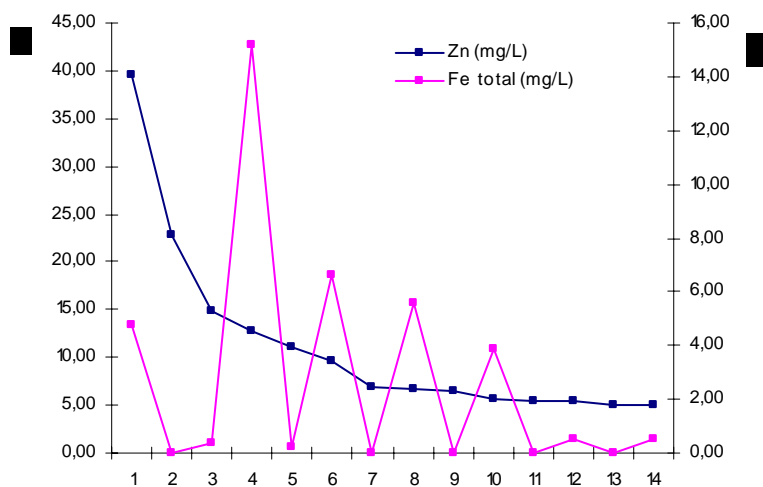


Figure 15 : Comparaison des teneurs en fer et en zinc dans les eaux à anomalies en zinc

La figure 15 confronte les teneurs en fer et en zinc dans les forages avec anomalies en zinc selon un tri décroissant. Elle montre de façon générale que là où les teneurs en zinc sont élevées, celles du fer le sont également. D'après Potelon et Zysman, (1993), les eaux riches en zinc sont à l'origine de dépôt de granules de zinc au fond des récipients ; ce qui donne à l'eau une saveur déplaisante.

2.2 Teneurs élevées en azote

2.2.1. Concentration en nitrates

Dans l'ensemble, les résultats d'analyses chimiques montrent que les teneurs en nitrates des eaux de forages varient de 0 à 21.56 mg/l et sont donc conformes à la norme OMS des 50mg/l.

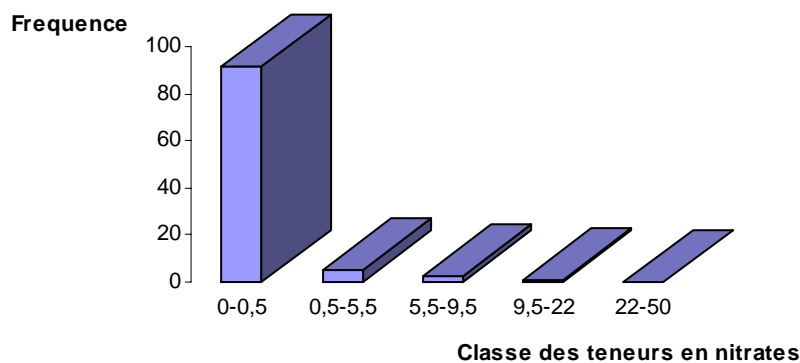


Figure 16 : Histogramme de fréquence des teneurs en nitrates dans les forages

D'une manière générale, on voit à travers la figure 16 que les teneurs en nitrates sont inférieures à 0.5 mg/l dans la plupart des forages (91.25 % des cas). Les teneurs en nitrates comprises entre 0.5 et 5.5 mg/l ont été notées dans 5.5 % des forages. Celles comprises entre 5.5 et 9.5 mg/l concernent 2.5 % des forages, tandis que les teneurs supérieures à 9 mg/l intéressent moins de 1% des forages.

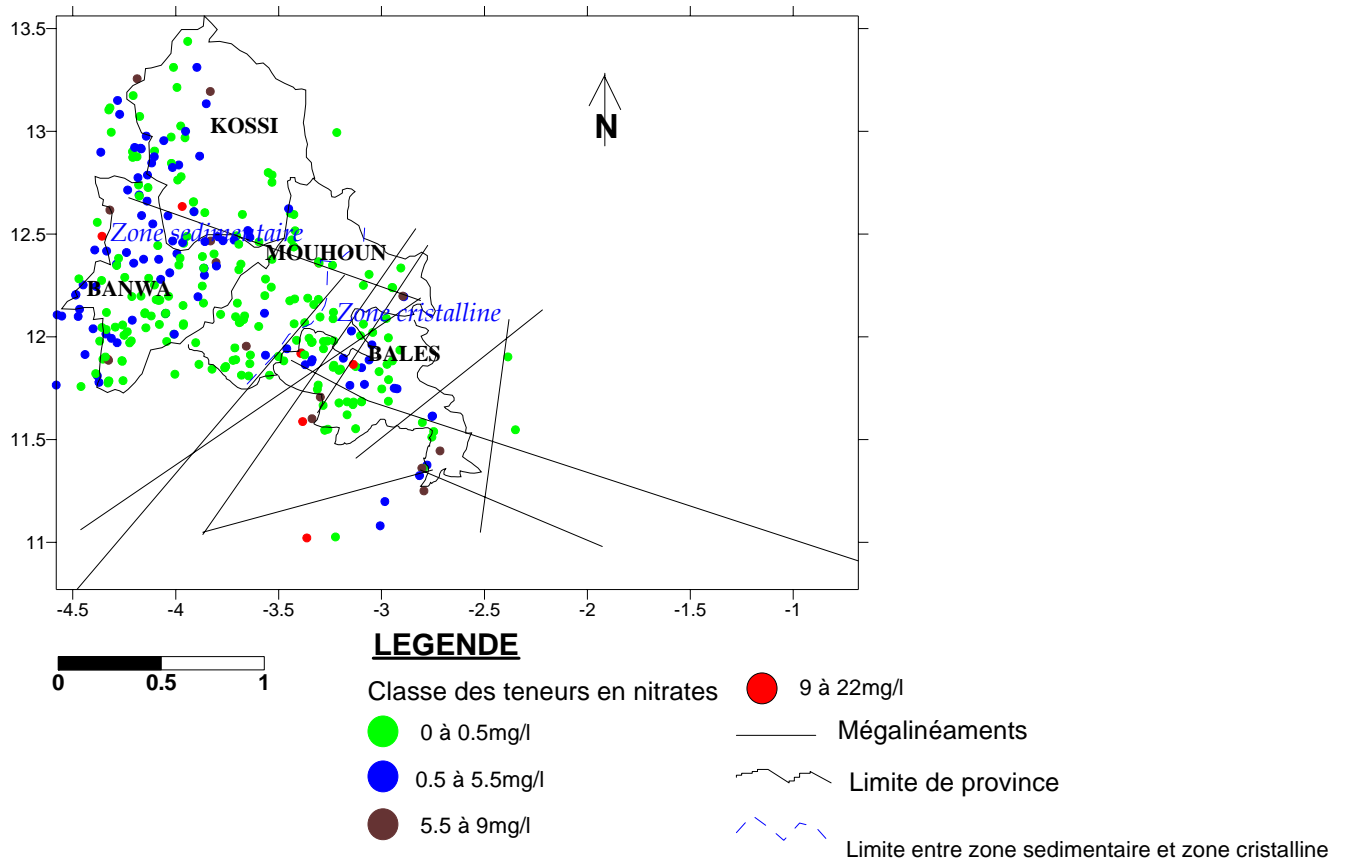


Figure 17 : Carte de zonalité des teneurs en nitrates dans le secteur d'étude

La figure 17 montre la distribution spatiale des teneurs en nitrates dans la zone d'étude où l'on relève la présence de 8 méga linéaments parcourant la province des Balés et un de direction N°120 reliant les provinces de la Kossi, du Mouhoun et des Balés. Cette figure montre que :

- Dans les provinces du Mouhoun et des Banwa, les eaux de forages présentent des concentrations faibles en nitrates : Dans la province du Mouhoun, la teneur moyenne en nitrates relevée est de 0.19mg/l (cas des forages, des départements de *Ouarquoise*, *Bodokuy* et *Tchériba* dans la province du Mouhoun). Cette moyenne tourne autour de 1.0345mg/l dans la province des Banwa (notamment dans les départements de *Kouka*, *Sanaba*).
- Dans la province de la Kossi, la teneur moyenne en nitrates est voisine de 1.35mg/l. Elle est légèrement supérieure dans les départements de *Bomboronkuy*, *Dokuy* et *Nouna* (1.5mg/l).
- Les forages rencontrés dans la province des Balés présentent les concentrations les plus élevées en nitrates. Dans cette province, la teneur moyenne en nitrates tourne autour de 3.5mg/l. Elle est dépassée dans la plupart des forages rencontrés dans les départements de *Fara*, *Oury* et *Bana*, avec des valeurs supérieures à 7 mg/l. Ce qui s'explique par la présence

des mégalinéaments qui constituent en général des couloirs préférentiels de circulations des eaux d'infiltration.

2.2.2. Concentration en nitrites

Les teneurs en nitrites varient de 0 mg/l à 10.56 mg/l. Au total, *49 sur les 305 forages étudiés (soit environ 16 % des cas, voir Annexe 4)* présentent des teneurs en nitrites dépassant la norme des 0.1mg/l fixée par l'OMS.

Remarque : D'après Potelon et Zysman, (1993), la consommation d'eaux riches en nitrites peut provoquer chez les nourrissons l'oxydation de l'hémoglobine en méthémoglobine, qui est une substance inapte aux transferts de l'oxygène des poumons vers les tissus. Les nourrissons dont les mères ont consommé des eaux riches en nitrates et nitrites durant la grossesse seraient prédisposés selon ces auteurs à cette maladie. Chez l'adulte la consommation de ces eaux peut provoquer une inflammation des muqueuses intestinales. Ces eaux peuvent être à l'origine de la formation dans l'appareil digestif de composés N-nitrosés (nitrosamines et nitrosamides), suspectés être cancérigènes.

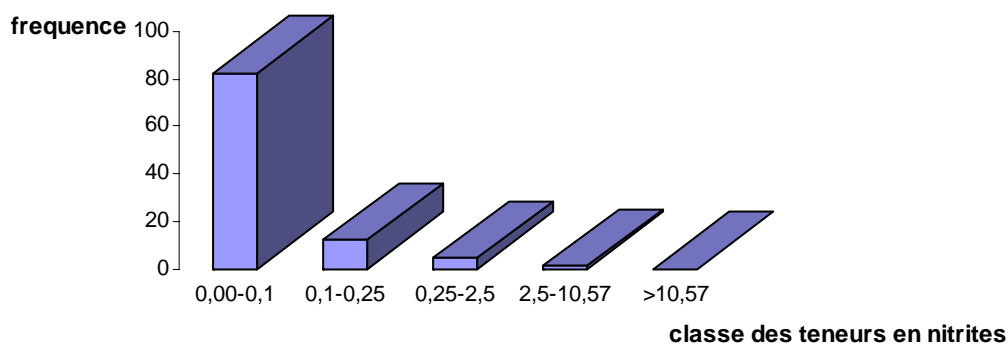


Figure 18 : Histogramme de fréquence des teneurs en nitrites dans les eaux de forage

L'histogramme de fréquence (figure 18) montre que les teneurs en nitrites sont inférieures à 0.1 mg/l dans la plupart des cas (83 % des forages étudiés). Les teneurs en nitrites comprises entre 0.1 et 0.25 mg/l ont été notées dans 12% des forages. Celles comprises entre 0.25 et 2.5 mg/l représentent 4.5% des forages, tandis que les teneurs supérieures à 2.5 mg/l intéressent près de 0.5 % des forages.

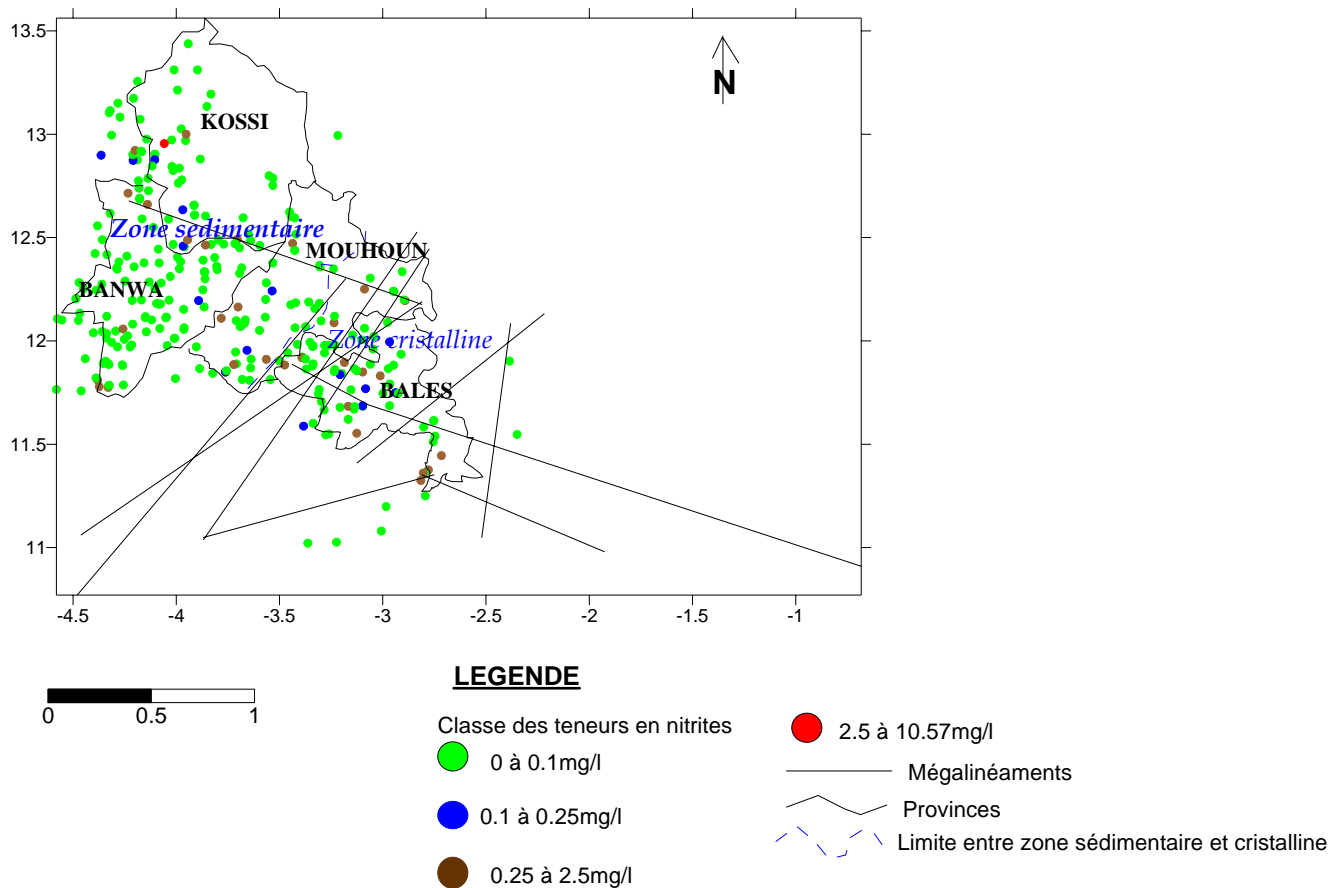


Figure 19: Carte de zonalité des teneurs en nitrites dans le secteur d'étude

La figure 19 montre la distribution spatiale des teneurs en nitrites dans la zone d'étude. On remarque sur cette figure que les teneurs anormales en nitrites sont surtout localisées dans les zones parcourues par les mégalinéaments (c'est-à-dire dans les provinces des Balés, du Mouhoun et de la Kossi). Les forages réalisés à l'intersection de ces mégalinéaments fournissent de bons débits (près de 20 m³/h) mais apparaissent comme étant très vulnérables à la pollution par les nitrites. C'est le cas de certains forages réalisés dans le département *de Oury, Fara, Boromo et de Bagassi* dans la province des Balés.

Comme on peut relever sur le tableau V, que les aquifères de type fissuré présentent les teneurs en nitrites les plus élevées. Toutefois, on note des poches à teneurs anormales en nitrites dans des aquifères gréseux et schisteux de type altéré. C'est le cas notamment dans la province des Banwa et le long de sa bordure avec la province du Mouhoun.

Les différents types de pollutions évoqués ci-dessus trouve leur origine à travers différents mécanismes que nous allons développer dans le paragraphe 2.4 (page 42), après avoir abordé les caractéristiques pédologiques des sols du secteur étudié.

Zone géologique	Unités lithologiques hydrogéologiques	Systèmes aquifères	Concentrations moyennes en nitrites (mg/l)
Socle cristallin	Socle cristallin	Milieu fissuré	0.1193
		Zone altérée	0.0639
Domaine sédimentaire	Gréseuse	Milieu fissuré	0.26
		Zone altérée	0.1038
	Schisteuse	Milieu fissuré	0.07539
		Zone altérée	0.01664
	Argilites/calcaire dolomitique	Milieu fissuré	0.0185
		Zone altérée	0.01747

Tableau V: Teneurs moyennes en nitrites dans les différents types d'aquifères

2.3. Caractéristiques pédologiques des sols

Les sols rencontrés dans la zone étudiée sont rangés en unités taxonomiques regroupant plusieurs classes de sols (voir figure 3, page 7) que sont : les *sols minéraux bruts*, les *sols peu évolués*, les *sols brunifiés*, les *vertisols*, les *sols à sesquioxydes de fer et de manganèse* et les *sols hydromorphes*. L'annexe 3 reproduit les analyses physico-chimiques des échantillons de sols des quatre provinces étudiées.

2.3.1. Interprétation des résultats d'analyses des sols

- *Texture des sols*

Pour connaître la texture des sols, nous avons fait un plot les proportions relatives des différentes fractions granulométriques dans le diagramme ternaire de texture des sols.

Les sols étudiés se répartissent en *trois classes texturales* (figure 20) : (1) la texture limono-argileuse qui concerne 50% des sols, (2) la texture limono-sableuse avec 33.33% des sols et (3) la texture limono-argilo-sableux avec 16,66% des sols.

Dans l'ensemble ces sols sont d'assez bonne porosité et à drainage normal, à l'exception des *sols minéraux bruts* (rencontrés dans la province des Banwa) et des *sols à sesquioxydes de fer et de manganèse* (représentant 75% des sols rencontrés dans le secteur étudié) qui sont à drainage légèrement excessif. La fraction grossière des sols à texture limono-sableuse

(constituée de graviers ferrugineux, des débris d'altération de roches et nodules calcaires) est plus abondante en profondeur (jusqu'à 30%) qu'en surface.

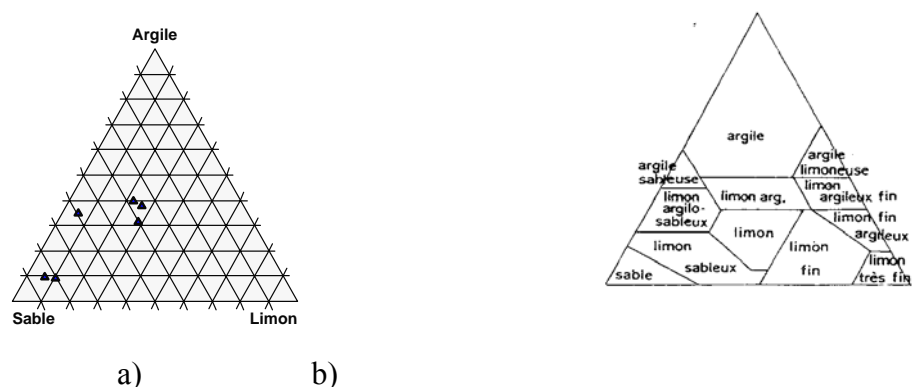


Figure 20 : Représentation des échantillons moyens (a) dans le diagramme des textures (b).

- *Structure des sols*

La structure d'ensemble des sols est polyédrique sub-angulaire moyennement développée dans les 30 premiers cm et polyédrique sub-angulaire faiblement développée au-delà. Cette structure favorise l'infiltration des eaux de surface.

- *Matière organique :*

La figure 21 montre que : la teneur en azote et carbone total des sols diminuent avec la profondeur (120cm).

Le rapport C/N montre une variation avec la profondeur. Il diminue vers 60 et 120 cm de profondeur. Ce qui traduit une bonne minéralisation de l'azote à ces profondeurs et une décomposition lente de la matière organique à 40 et 80 cm.

Dans les sols *minéraux bruts, brunifiés eutropes ferrugineux, ferrugineux tropicaux lessivés hydromorphes à concrétions ou à taches et concrétions et les vertisols vertiques*, la teneur en azote totale dans l'horizons profond sableux ou limoneux (120 cm) reste inférieure à 0.017%. Ces sols sont bien lessivés et bien drainés. C'est le cas des sols minéraux bruts de *Kouka, Balavé, Solenzo* (province des Banwa), *Bondokuy* (province du Mouhoun) et des sols à sesquioxydes de fer et manganèse de *Barani, Nouna, Doumbala, Solenzo, Sanaba, Safané, Kona, Bondokuy* (provinces de la Kossi, des Banwa et du Mouhoun).

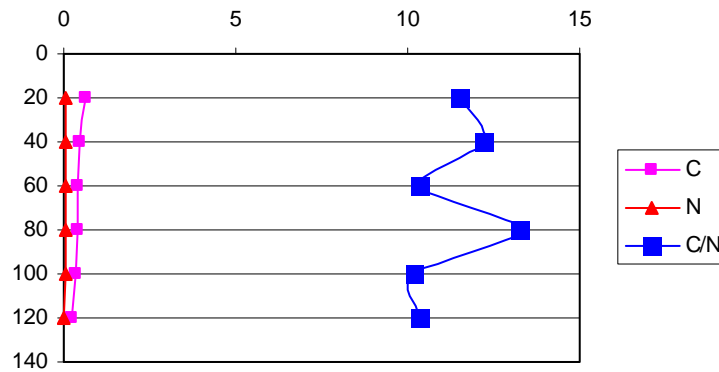


Figure 21 : Évolution en fonction de la profondeur de la teneur en azote (N), carbone total (C) et du rapport C/N. (NB : C est donnée par la formule : $C = MO/K$ avec $1.7 < K < 1.72$; avec MO = Matière organique en %)

- *Capacité d'Echange Cationique, Somme des bases échangeables et Taux de saturation en bases*

La figure 22 montre une évolution similaire de la *capacité d'échange cationique (CEC)* et de la *somme des bases échangeables (S)*. Les valeurs sont plus élevées à 60 et 120 cm de profondeur. Les normes de CEC et S du BuNaSols (tableaux VI) indiquent une rétention moyenne des éléments nutritifs aux horizons intermédiaires et un lessivage élevé à 60 et 120 cm de profondeur.

Ce lessivage est plus marqué dans les *sols minéraux bruts, brunifiés et les sols à sesquioxydes de fer et de manganèse*. Les valeurs de CEC sont en moyenne de l'ordre de 23.92 méq/100g en surface et 27.968 en profondeur. Dans les sols développés sur des matériaux gréseux et cristallins (basiques), les valeurs de S sont faibles (en moyenne de l'ordre de 3.53 méq/100g en surface et de 4 méq/100g vers 120 cm de profondeur). C'est le cas des *sols ferrallitiques faiblement désaturés et de type modal* (sols pour lesquels une des fractions représente plus de 50% du total.), *des sols hydromorphes peu évolués à pseudo-gley de surface* (sols à engorgement temporaire). Ces sols sont faiblement lessivés. On les rencontre dans les départements de *Tchériba* dans (province du Mouhoun), *Sanaba, Kouka* (province des Banwa), *Bourasso, Dokuy* (province de la Kossi)

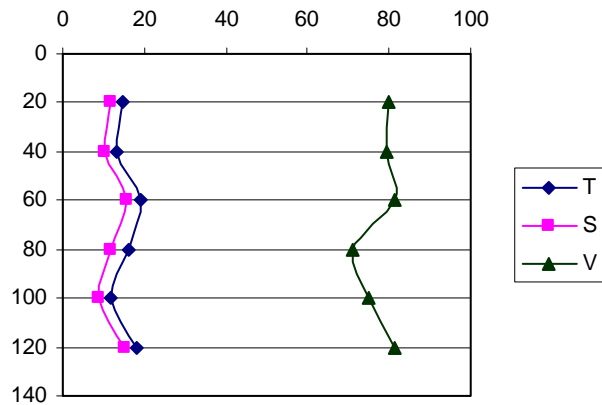


Figure 22: Evolution en fonction de la profondeur de la capacité d’échange cationique (CEC), somme des bases échangeables (S) et taux de saturation en bases (V).

La figure 22 montre également que le rapport V ($V = \frac{CEC - Acidité\ Totale}{CEC}$) diminue vers 60 cm de profondeur pour atteindre un minimum vers 80 cm et augmenter par la suite. Ce qui indique un lessivage important des sols à ces profondeurs. Au regard des normes du BuNaSols (tableau XIII) les valeurs de V supérieures à 80% indiquent des sols très lessivés. Dans les sols brunifiés tropicaux, à sesquioxides de fer et de manganèse et les lithosols, les échanges ioniques et le lessivage des éléments sont plus marqués. La valeur de S est en moyenne de l’ordre de 23.22 méq/100g en surface et de 24.76 méq/100g en profondeur (100 cm). Ce qui confirme un fort lessivage de ses sols par les eaux d’infiltrations.

Bases échangeables dans le sol (S)					
Classe d’interprétation	Très bas	bas	moyen	Elevé	Très élevé
Intervalle	<1méq/100g	1-6	6-11	11-16	>16méq/100g
Capacité d’Echange Cationique (CEC)					
Classe d’interprétation	Très bas	bas	moyen	Élevé	Très élevé
Intervalle	<5méq/100g	5-10	10-15	15-20	>20méq/100g
Taux de saturation en bases (V)					
Classe d’interprétation	Très bas	bas	moyen	Élevé	Très élevé
Intervalle	<20%	20-40	40-60	60-80	>80%

Tableau VI: Normes des paramètres S, CEC, et V du BuNaSols (Bureau National des Sols du Burkina Faso)

2.3.2. Incidences des caractéristiques des sols sur les mécanismes de pollution

A travers l'analyse des caractéristiques physico-chimiques des sols rencontrés dans la zone étudiée nous pouvons retenir ce qui suit :

- Les sols présentent dans l'ensemble une texture limono-argileuse, ou limono sableuse favorisant un lessivage et un drainage des solutés dissous.
- Le taux de saturation en bases reste supérieur à 75% sur l'ensemble de profil pédologique indiquant une faible capacité de rétention des éléments nutritifs et la présence d'échanges ioniques entre les eaux d'infiltrations et la fraction fine (argiles et limons) qui occupe l'horizon inférieur de certains sols.

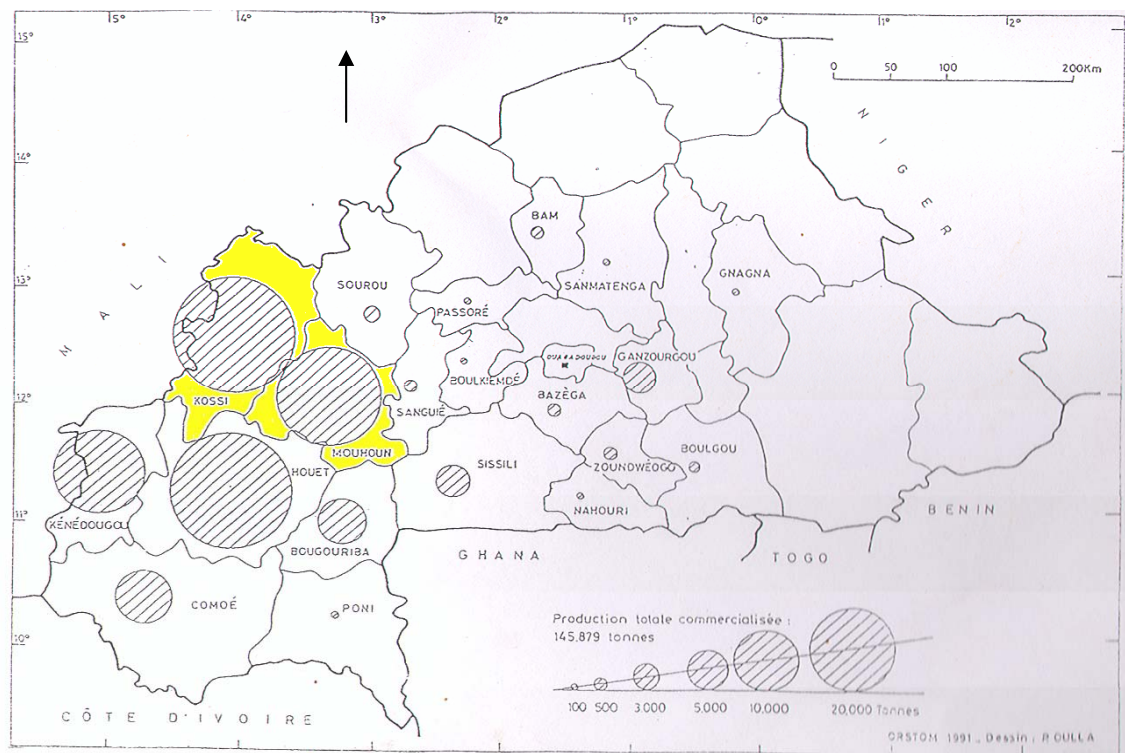


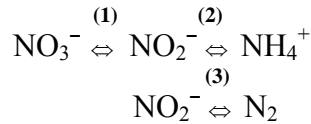
Figure 23: Production commercialisée de coton graine au Burkina Faso (Campagne 1988-1989 ; MARH).

2.4. Origine de la pollution par les nitrates et nitrites

La présence des nitrates et nitrites dans les eaux de forage trouve son explication essentiellement à travers les pratiques agricoles et culturelles : utilisation de fertilisants azotés (NPK : mélange de 14% d'azote, de 23% de phosphore et 14% de potassium et l'urée de formule $H_2N-CO-NH_2$ renfermant 46% d'azote), brûlis des résidus cotonniers, pratique de fosses fumiers,) et infiltration des eaux rejetées après traitement industriel du coton. La figure 23 donne une idée sur l'importance de la production cotonnière dans la zone d'étude.

Un aspect non négligeable pourrait être l’infiltration au voisinage immédiat des forages d’eaux polluées résultant du parcage du bétail et des activités ménagères.

Le devenir des composées azotées peut être schématisé par les réactions « aller » et « retour » suivantes:



C'est-à-dire :

- Le processus de dénitrification (réduction des nitrates) conduisant successivement à la formation de nitrites, de l’ammoniac et/ou à la libération d’azote (réactions « aller » (1), (2) et (3)).
- Le processus de nitrification (oxydation de l’ammoniac et de l’azote libre) qui conduit aussi à la formation des nitrites et des nitrates (réactions « retour » (1), (2) et (3)).

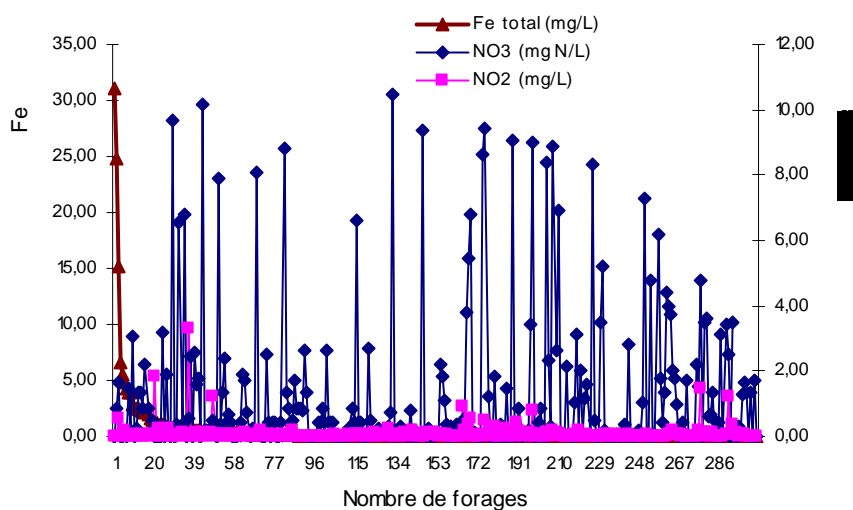


Figure 24 : Comparaison des teneurs en fer, nitrates et nitrites dans les eaux des forages

La figure 24 confronte les teneurs en fer, nitrates et nitrites selon un tri décroissant de la gauche vers la droite des teneurs en fer dans les eaux des forages étudiés. A priori, l’observation de cette figure ne permet pas de voir les relations existant entre ces 3 paramètres à cause de la densité des points représentatifs. Mais, on peut entrevoir sur la partie gauche de cette figure une certaine tendance d’appauvrissement en nitrates et nitrites dans les forages à teneurs en fer élevées.

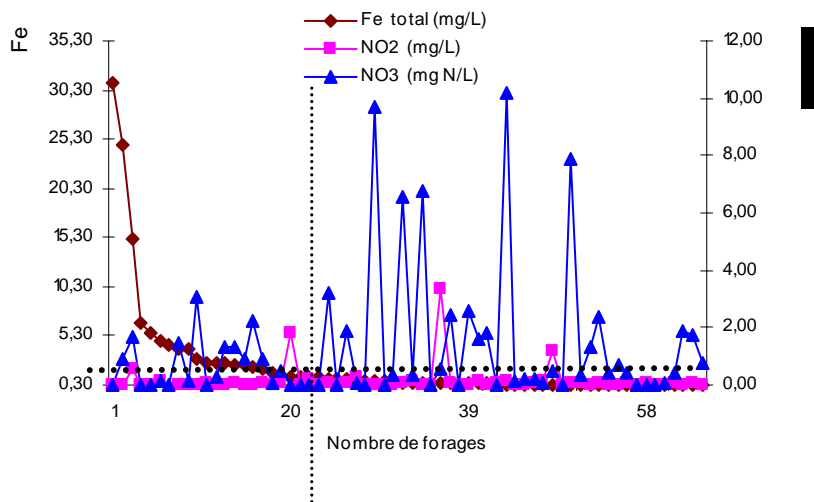


Figure 25 : Comparaison des teneurs en fer, nitrates et nitrites dans les eaux des forages à teneur anormale en fer (> 0.3 mg/l).

La figure 25 représente le même plot pour ces 3 paramètres en prenant uniquement en considération les forages à teneurs en fer supérieures à la norme OMS des 0.3 mg/l. Elle montre nettement que les forages les plus enrichis en fer (teneurs voisines de 1 mg/l) présentent simultanément les teneurs en nitrates et nitrites les plus faibles. Ce qui laisse supposer une intense activité microbologique de réduction des oxydes et hydroxydes de fer et des composés azotés.

Aux teneurs en fer faibles (< 1mg/l) correspondent généralement des teneurs en nitrates et nitrites importants (figure 24, 25 et 26). Ce qui pourrait être le résultat à la fois d’une activité microbologique de réduction moins intense et des processus de nitrification des fertilisants azotés.

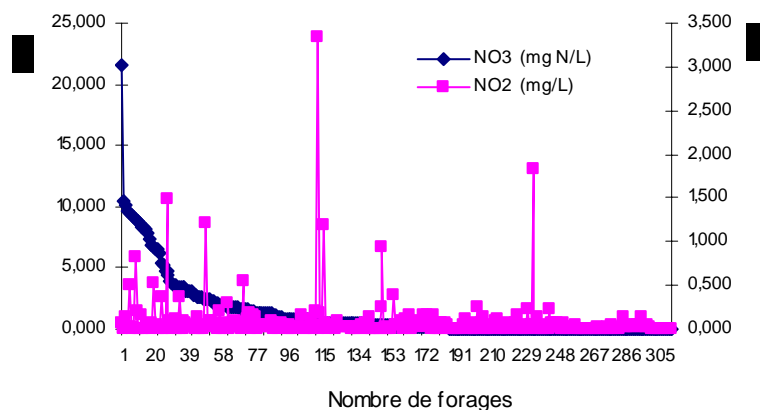


Figure 26 : Comparaison des teneurs en NO₃ et NO₂ selon un tri décroissant des teneurs en nitrates.

Les graphiques des plots Fe versus NO₃ et Fe versus NO₂ selon un tri décroissant des teneurs en fer sont fournis en Annexes 2.

TROISIEME PARTIE

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Conclusion

Le projet hydraulique villageoise dont a été bénéficiaire les provinces des Banwa, du Mouhoun, de la Kossi, et des Bales a permis de réaliser 310 forages entre 1998 et 2004. Cette opportunité offerte aux communautés rurales de la Boucle du Mouhoun est salubre au regard des difficultés d'alimentation en eau potable des populations de la région.

Toutefois, l'occurrence de fer, zinc et nitrites dans les eaux de forages à des concentrations supérieures aux normes admises par l'OMS indique un réel problème de potabilité.

Au total, 63 forages présentent des anomalies en fer (teneurs > 0.3mg/l) et 14 forages des anomalies en zinc (teneurs > 5 mg/l). Les forages à teneur anormale en nitrites (teneurs > 0.1 mg/l) sont au nombre de 49.

La plus grande majorité des forages à teneurs anormales en fer sont implantés dans les aquifères cristallins et gréseux de type fissuré (notamment dans les provinces des Balés et sur sa bordure avec la province du Mouhoun). Les aquifères constitués de schistes et argilites semblent beaucoup moins affecté par ce type de pollution. Le fer et le zinc montre une même dynamique d'accumulation dans les eaux de forages. Cette accumulation serait liée à des processus de réduction par les microorganismes.

Les formations cristallines et gréseuses de type fissuré rencontrées dans les zones parcourues par les mégalinéaments (province des Balés, du Mouhoun et de la Kossi) constituent les types d'aquifères les plus affectés par la pollution des nitrites résultant des pratiques agricoles et culturales (utilisation de fertilisants azotés, brûlis des résidus cotonniers, pratique de fosses fumiers). Des poches de pollution par les nitrites ont été identifiées dans les systèmes aquifères gréseux et schisteux de type altéré (province des Banwa et bordure orientale de la province du Mouhoun). Elles seraient liées à l'infiltration des eaux rejetées par l'unité industrielle de traitement du coton localisée dans le département de *Solenzo* (province des Banwa où les sols présentent un bon drainage : sols minéraux bruts et à sesquioxydes de fer et manganèse).

Recommandations

A l'issue de cette étude nous pouvons formuler les recommandations suivantes :
A défaut d'interdire l'utilisation des eaux des forages pollués qui posent un risque de santé publique :

- Utiliser les méthodes habituelles de traitement pour les eaux présentant des teneurs anormales en fer (technique de déferrinisation), zinc (précipitation par la soude ou le lait de chaux). Dans le cas spécifique de la pollution par les nitrites il est techniquement difficile d'y remédier par un traitement peu onéreux. A cet égard, il faudra sensibiliser davantage les paysans et les cotonculteurs sur l'emploi et le dosage des engrais chimiques utilisés dans la culture du coton et des céréales et sur les conséquences parfois néfastes des fosses fumiers et techniques de brûlis qui peuvent libérer d'importantes quantités de nitrates dans les sols.
- La solution la plus envisageable et la simple pour pallier à ces pollutions seraient de diluer les eaux pour ramener les teneurs en dessous de la norme.
- Il faudra désormais procéder à des études d'implantation pour évaluer la vulnérabilité des nappes et définir des périmètres de protection rapproché (périmètre II) et éloigné (périmètre III) particulièrement dans les aquifères de type fissuré.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Banton , O. et L.M. Bangoy.,** (1997). Multiscience environnementale des eaux souterraines. Presse de l'Université du Québec/ AUPELF, 460p.
- Castany, G.** (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod, Paris, 238p.
- Foucault, A. et J.F. Raoul.,** (1997). Dictionnaire de géologie. Masson, Paris.
- Jankovic, S.** (1974). Manuel de chimie de l'environnement.
- Millot, G.** (1964). Géologie des argiles. Masson et Cie., 490p.
- Jenny, F.** Sols et problèmes de fertilité en Haute Volta.
- Hem, H.J.** (1970). Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water. 363p.
- Nikièma, J.** (2002). Caractérisation des forages à haut rendement en zones de socles cristallins du Burkina Faso. DEA de Géologie appliquée. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 77p.
- Perritaz, N. et Ghinet.,** (1993). La santé de l'environnement genevois. Direction de la santé publique.90p.
- Potelon, J.L et Zysman, K.,** (1993). Guide des analyses d'eau potable, 155p.
- Robert, M.** (1990). Le sol: Interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Masson., 244.p.
- Schwitzguébel, J.P.** (1997). Phytoremédiation : composés organiques et métaux lourds. Institut de génie de l'environnement. Laboratoire de Génie Biologique. 25p.
- Vuillemenot, P. et P. Toulhoat** (1992). Evolution chimique des eaux de la partie orientale du bassin de l'odève (Hérault, France). Editions du B.R.G.M., p.177-179.

