

**HYDROGÉOLOGIE ET CONTAMINATION  
DE LA NAPPE PHRÉATIQUE ALIMENTANT  
LA VILLE DE BAMAKO (MALI)**

**HYDROGÉOLOGIE ET CONTAMINATION  
DE LA NAPPE PHRÉATIQUE ALIMENTANT  
LA VILLE DE BAMAKO (MALI)**

**Rapport des travaux réalisés  
dans le cadre d'une subvention du**

**Centre de Recherches pour le Développement  
International du Canada (CRDI)**

**Ottawa, Canada**

**Mai 1991**

**par**

**Aboubacrine Alpha  
Amadou Zanga Traoré  
Adama Mariko**

**Ecole Nationale  
d'Ingénieur de Bamako  
DER de Géologie  
Bamako, Mali**

**Olivier Banton  
Jean-Pierre Villeneuve  
Lahcen Ait-Ssi**

**Institut National de la  
Recherche Scientifique  
INRS-Eau  
Ste-Foy, Québec Canada**

CHAPITRE 1 INTRODUCTION .....	1
1.1- PROBLEMATIQUE .....	1
1.2- CADRE GÉNÉRAL (Figure 1.1) .....	3
1.3- DESCRIPTION DU PROJET .....	3
 CHAPITRE 2 LA CONSOMMATION D'EAU A BAMAKO .....	 5
CHAPITRE 3 CADRE GÉOLOGIQUE .....	9
3.1- CADRE RÉGIONAL .....	9
3.2- FORMATIONS GÉOLOGIQUES (Figure 3.1) .....	11
3.3- EXQUISSE GÉOLOGIQUE ET STRATIGRAPHIQUE .....	17
3.4- TECTONIQUE .....	18
3.5- INVESTIGATIONS GÉOPHYSIQUES .....	19
 CHAPITRE 4 HYDROGÉOLOGIE DE LA CUVETTE DE BAMAKO .....	 28
4.1- AQUIFERE DES FORMATIONS GRÉSEUSES .....	28
4.2- AQUIFERE DES FORMATIONS QUATERNAIRES .....	28
4.3- CARACTÉRISTIQUES DE L'AQUIFERE DE LA VALLÉE DU NIGER .....	30
4.4- PIÉZOMÉTRIE .....	35
4.5- HYDROGÉOCHIMIE .....	45
 CHAPITRE 5 MODÉLISATION MATHÉMATIQUE DE LA NAPPE .....	 62
5.1- INTRODUCTION .....	62
5.2- DISCRÉTISATION ET TOPOGRAPHIE DU DOMAINE .....	62
5.3- CALCUL DES CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES .....	65
5.4- CALCUL DU BILAN HYDRIQUE .....	65
5.5- CONDITIONS AUX LIMITES .....	68
5.6- MODÉLISATION .....	68
5.7- RÉSULTATS ET DISCUSSION .....	70
5.8- CONCLUSION .....	75
 CHAPITRE 6 POLLUTION DE LA NAPPE DE BAMAKO .....	 77
6.1- INTRODUCTION .....	77
6.2- PRINCIPAUX TYPES DE POLLUANTS .....	78
6.3- LE MOUVEMENT DES POLLUANTS .....	80
6.4- LA PERSISTANCE DES CONTAMINANTS .....	82
6.5- LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES A BAMAKO .....	83

CHAPITRE 7 RECOMMANDATIONS .....	96
7.1- TRAITEMENT DES EAUX DES PUIITS .....	96
7.2- TRAITEMENT DES EAUX CONSOMMÉES .....	97
7.3- DISPOSITIONS DES EAUX USÉES ET DES EXCRÉMENTS .....	97
7.4- CONSTRUCTION DES PUISARDS .....	98
7.5- CONSTRUCTION DES LATRINES .....	99
7.6- CONSIDÉRATIONS SUR LES PUISARDS ET LATRINES .....	99
CHAPITRE 8 CONCLUSION .....	102
BIBLIOGRAPHIE .....	104

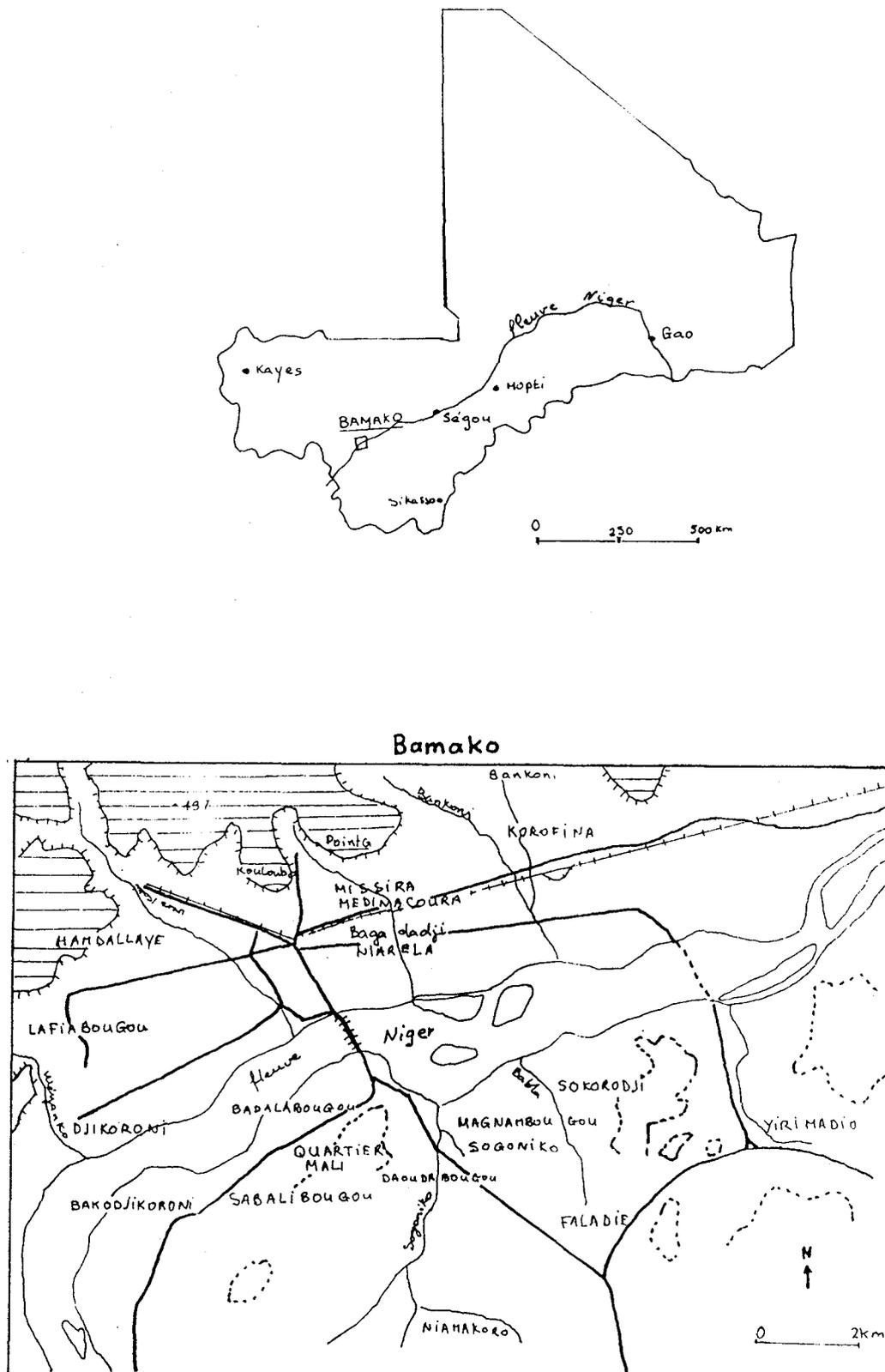
## **CHAPITRE 1 INTRODUCTION**

### **1.1- PROBLEMATIQUE**

Le Mali est un pays très vaste (1 240 700 km<sup>2</sup>) dont la population était évaluée en 1985 à 8 200 000 habitants, soit une densité moyenne de 6.6 habitants/km<sup>2</sup>. La population est cependant inégalement répartie, et seule la région sahélo-soudanienne arrosée par le Niger est économiquement viable. Avec un PNB per capita de 140 \$ US en 1984, le Mali est l'un des trois pays les plus pauvres au monde et la situation économique est encore plus difficile depuis le retour de la sécheresse. L'emploi salarié est rare (pas plus de 140 000 personnes, dont la moitié dans la fonction publique). Vingt pour cent de la population est nomade et vingt pour cent citadine. Les autres pratiquent une agriculture de subsistance.

La capitale du Mali, Bamako, a une population d'environ 700 000 habitants. Seul le centre ville de Bamako est desservi par un réseau de distribution d'eau potable. Le lent développement du réseau est lié au coût très élevé de la mise en place des conduites et du raccordement des usagers aux conduites. Ces coûts sont selon des données de l'office de l'Energie du Mali de l'ordre de 200 000 F.CFA (1 000 Can\$) par concession lorsque le quartier est viabilisé, c'est-à-dire lorsque les conduites d'amenée d'eau sont déjà installées dans les rues. Notons que l'installation des conduites n'est réalisée qu'à partir de financement extérieur au pays. Le salaire moyen annuel de 30 000 F.CFA (150 \$) et le coût de l'eau 100 F.CFA (0.50 \$) le mètre-cube (m<sup>3</sup>) expliquent certainement pourquoi seulement 20 000 concessions sont abonnées (37 000 le sont à l'électricité). La majorité de la population de Bamako s'alimente en eau potable à partir de puits domestiques, ce qui présente un danger pour la santé puisque il n'existe aucun système de captage et de transport des eaux usées domestiques. Chaque concession dispose d'une fosse septique souvent à proximité d'un puits. Il y a donc risque évident de contamination des puits par l'infiltration de substances pathogènes depuis les fosses situées à proximité. Cette contamination a un impact important sur la santé publique pour les personnes qui s'alimentent à partir des puits.

Figure 1.1 Situation de l'étude



## 1.2- CADRE GÉNÉRAL (Figure 1.1)

La nappe qui s'étend sous l'agglomération de Bamako n'est pas délimitée. On suppose qu'elle s'étend depuis le Niger jusqu'au pied des collines environnantes. Dans la direction parallèle au Niger, il n'y a pas de limite déterminée à l'amont ou à l'aval. La zone de l'étude doit donc s'étendre sur toute la ville et couvrir à la fois la rive gauche et la rive droite du Niger. Sur la rive gauche, la zone reçoit plusieurs petits affluents venant du Nord. La région est soumise à un climat de type soudanien (régime tropical) et reçoit en moyenne une précipitation de 1050 mm (données 1960 à 1970). Le déficit d'écoulement calculé selon la formule de Turc est de l'ordre de 1000mm. Les précipitations sont réparties entre mai et octobre. La température moyenne annuelle est de 27,8° C. On observe des maximums supérieurs à 40°C pendant la période chaude (mars, avril, mai). La durée d'insolation varie de 2500 à 3000 heures (Travi et Oller, 1980).

## 1.3- DESCRIPTION DU PROJET

Le projet subventionné par le Centre de Recherches pour le Développement International du Canada (CRDI) devait conduire à une meilleure connaissance de la nappe phréatique de la ville de Bamako et à une caractérisation de son état actuel de contamination. Les principales activités qui ont été réalisées dans ce cadre sont donc brièvement décrites dans la section ci-après.

### 1.3.1- *Connaissance de la nappe et de son comportement*

#### Etude de la structure géologique de la nappe de Bamako

- synthèse des données géologiques existantes et des études déjà réalisées
- étude de la stratigraphie des formations de la nappe de Bamako à partir:
  - d'un réseau prédéterminé de puits existants
  - des puits creusés au cours de la présente étude
- détermination de la profondeur et de la fracturation des grès à l'aide de la méthode géophysique de résistivité électrique

#### Etude hydrogéologique

- synthèse des données hydrogéologiques existantes et des études déjà réalisées
- caractérisation hydrodynamique de l'aquifère
  - par essais de pompage sur 8 puits
  - par infiltromètre sur 14 sites

- suivi piézométrique sur 180 puits

#### Etude hydrochimique

sur 50 puits, en haute et basse eaux

- caractéristiques physiques des eaux (température, conductivité, turbidité, pH)
- analyses des éléments majeurs (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>)

#### Modélisation à grande échelle de la nappe.

### 1.3.2- Détermination de l'état actuel de la pollution de la nappe

#### Inventaire des sources de pollution

#### Analyses de la qualité de l'eau

- suivi temporel sur 30 puits des critères de qualité suivants:
  - Nitrates (NO<sub>3</sub>)
  - Nitrites (NO<sub>2</sub>)
  - Ammonium (NH<sub>4</sub>)
  - Germes totaux
  - E-Coli
  - Autres coliformes
  - Streptocoques fécaux

#### Compréhension de la problématique de la contamination de la nappe

- recommandations sur les éléments suivants:
  - construction des puits;
  - utilisation des puits;
  - construction des fosses septiques;

## CHAPITRE 2 LA CONSOMMATION D'EAU A BAMAKO

Avec une population estimée entre 600,000 et 700,000 habitants, Bamako croît à un rythme annuel supérieur à 40% (Ballo et al., 1990). Ce rythme est dû pour deux tiers à la croissance démographique naturelle, et pour un tiers à l'exode rural. Alors que les besoins théoriques en eau devraient être d'au moins 100 litres par jour par personne, les résultats de l'enquête de ces auteurs montrent que les volumes consommés (rapportés) sont de beaucoup inférieurs à ce chiffre, avec une moyenne d'environ 50 à 60 litres par jour par personne. Cette valeur moyenne conduit à un volume quotidien utilisé à Bamako de l'ordre de 40,000 m<sup>3</sup>.

Actuellement, la population s'approvisionne en eau à partir de trois types de provenances différentes. Certains habitants sont raccordés au réseau d'adduction d'eau de la ville pompant l'eau du fleuve en amont de Bamako. Cette eau est décantée, filtrée, son pH est corrigé, puis l'eau est stérilisée à l'hypochlorite de sodium "eau de Javel" (4 g/m<sup>3</sup>). Cette eau est donc sensée avoir une bonne qualité de potabilité. Malheureusement, l'étendue actuelle du réseau est limitée, et les branchements privés sont peu nombreux.

Le mode principal d'alimentation est le puits, presque présent dans toutes les concessions. Ces puits sont généralement peu profonds, de 2 à 10 mètres, d'environ 80 centimètres de diamètre et creusés à la main par un puisatier. Ces puits ne sont pas cimentés, ni généralement équipés d'une margelle. Le puits n'est donc pas protégé latéralement, ni isolé du ruissellement depuis la surface du sol.

Finalement, une faible part de la population s'approvisionne directement à partir du fleuve ou des ruisseaux.

Parmi les utilisations de l'eau, on peut distinguer l'eau servant à l'alimentation, celle servant à la vaisselle, la lessive et la toilette, et celle destinée à l'arrosage. Les problèmes de qualité affectant principalement et primordialement le premier usage de l'eau, il est intéressant de connaître la répartition des sources d'eau servant donc à l'alimentation des habitants de Bamako.

**Tableau 2.1: Provenance de l'eau consommée dans les différents quartiers**

	réseau	puits	autre	volume total litres/jour/pers.
<u>Quartiers tramés anciens</u>				
Médina-Koura	96%	23.5%	1% (forage)	76 l.
Ouolofobougou- Bolibana	100%	0%		16 l.
<u>Quartiers tramés récents</u>				
Hippodrome	74%	75%		150 l.
Liafabougou	83.5%	92.5%		40l.
<u>Quartiers spontanés</u>				
Banconi plateau	0%	100%		17 l.
Flabougou	0%	100%		49 l.
Djankimebougou	0%	80%	20% (forage)	42 l.
Magnambougou	46.6%	83.1%		
Djikoroni-Para	58.5%	84%	22% (fleuve)	

**Tableau 2.2: Modes d'évacuation des eaux usées dans les différents quartiers**

	collecteur	caniveaux	puisards	rue
<u>Quartiers tramés anciens</u>				
Médina-Koura	8%	65%	30.5%	33.5%
Ouolofobougou- Bolibana	-	73.6%	2.7%	22.3%
<u>Quartiers tramés récents</u>				
Hippodrome	-	-	95%	60%
Liafabougou	-	-	50%	96.5%
<u>Quartiers spontanés</u>				
Banconi	-	-	67%	77.5%
Magnambougou	-	-	84.5%	18%
Djikoroni-Para	-	-	64.5%	69.5%

L'enquête réalisée par Ballo et al. (1990) permet de dresser un tel inventaire pour différents quartiers de Bamako. Le Tableau 2.1 résume cette information. Ces quartiers ont été classés suivant leur urbanisation et leur âge. Il est à remarquer que le pourcentage indiqué représente la fraction de la population utilisant un type d'eau. Certaines personnes pouvant utiliser à la fois plusieurs sources d'approvisionnement, les pourcentages dépassent généralement 100%. Ces pourcentages ne se rapportent qu'à l'eau destinée à la consommation. Par contre, les volumes totaux représentent la consommation totale moyenne que les habitants ont dit utiliser pour leur alimentation et les besoins du ménage.

Comme on le constate, les eaux souterraines prélevées par les puits ou les forages constituent une ressource importante pour l'approvisionnement en eau d'alimentation des Bamakois. Cette ressource n'est cependant pas à la disposition de tous, et surtout pas en tout temps, puisque plusieurs puits s'assèchent au cours de la saison de basses eaux (étiage).

Par ailleurs, la presque inexistence d'infrastructures d'évacuation des eaux usées font que celles-ci sont généralement jetées dans les puisards, dans les caniveaux voire directement dans la rue. Les modes d'évacuation des eaux usées pratiqués dans les différents quartiers sont résumés au Tableau 2.2.

Comme on le voit, les collecteurs sont inexistantes sauf à Médina-Koura, et les eaux usées finissent souvent dans la rue (caniveaux compris). De plus les puisards pour des questions économiques ne sont généralement pas vidangés selon les règles, et leurs contenus sont généralement vidés dans le caniveau ou directement dans la rue. L'infiltration de toutes ces eaux au travers du sol jusqu'à la nappe d'eau souterraine généralement peu profonde, ne peut donc que constituer un risque considérable d'altération de la qualité de ces eaux souterraines.

Par ailleurs, la population ne traite pas toujours l'eau qu'elle consomme malgré les recommandations prodiguées par différents organismes. Ainsi, l'enquête de Ballo et al. (1990) permet de dresser le Tableau 2.3.

**Tableau 2.3: Modes de traitement des eaux de puits dans les différents quartiers**

	décantée	filtrée	javélisée	bouillie
<u>Quartiers tramés anciens</u>				
Médina-Koura		pas de données compilées		
Ouolofobougou- Bolibana		pas de données compilées		
<u>Quartiers tramés récents</u>				
Hippodrome	8%	10%	22.5%	0%
Liafabougou	1%	36%	42.5%	2%
<u>Quartiers spontanés</u>				
Banconi	50%	61.5%	50%	2%
Magnambougou	9.4%	36.4%	9.4%	12.8%
Djikoroni-Para	8%	8%	22%	1%

## **CHAPITRE 3 CADRE GÉOLOGIQUE**

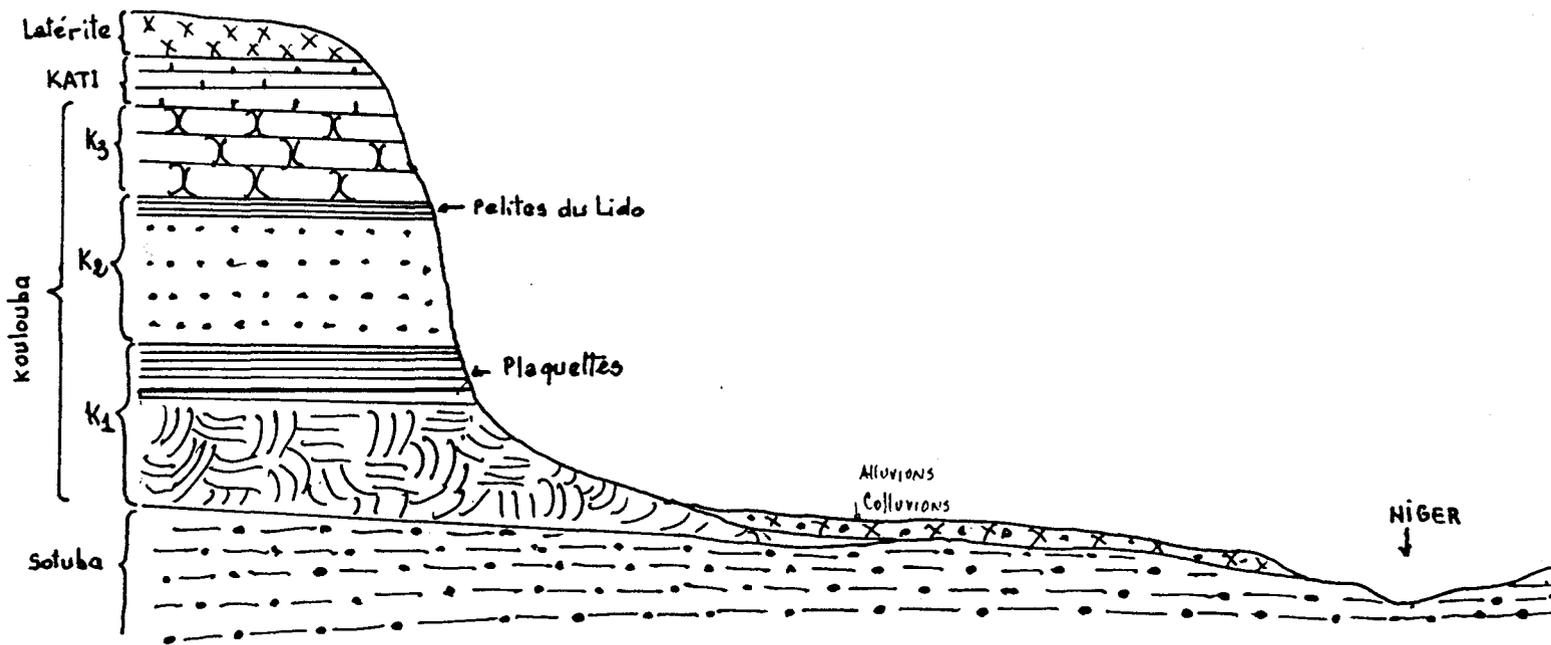
La géologie de Bamako et de ses environs est principalement connue grâce aux travaux de Dars (1961), Carrère (1975) et Travi (1980), ainsi qu'à différents travaux de stage des étudiants ingénieurs de l'E.N.I. Ces études ont surtout porté sur les formations sédimentaires précambriennes. Quant aux formations quaternaires, elles ont été peu étudiées.

### **3.1- CADRE RÉGIONAL**

L'ossature de l'Afrique de l'Ouest est constituée par un vieux craton (bouclier éburnéo-libérien). Ce socle profondément érodé, depuis l'antécambrien, a pu être recouvert en de nombreux endroits par des dépôts sédimentaires. L'évolution de la couverture sur le craton est sous la dépendance des mouvements épirogéniques qui ont pu perturber la sédimentation, provoquant des discontinuités servant de repères et même de coupures stratigraphiques. A l'époque de l'orogénie hercynienne, la structuration ébauchée au précambrien supérieur est à son maximum et s'étend à tous les dépôts. Une vaste dépression, le synclise de Taoudéni, apparaît à la faveur de ces mouvements orogéniques.

En forme de bassin globalement circulaire d'un diamètre de 1200 km, cette dépression englobe tout le sud-ouest du Sahara, couvrant les territoires du Mali et de la Mauritanie. Des conditions climatiques uniformes ont provoqué sur l'Afrique de l'Ouest une glaciation à l'éocambrien. La tillite qui en a résulté recouvre en discordance les formations antérieures. Ce contact anormal est adopté comme une coupure stratigraphique déterminant la base du cambro-ordovocien. Les formations qui se trouvent aux environs de Bamako appartiennent à la bordure Sud du synclise de Taoudéni, et font partie du grand ensemble géomorphologique des Monts Mandingues situés entre les fleuves Baoulé et Niger. L'épaisseur des formations peut atteindre 795m. Ce sont les vestiges d'un immense plateau (plateau Mandingues), qui devait s'étendre très loin au Sud sur les régions de socle, ainsi qu'en témoignent de nombreuses buttes témoins existant au bord du fleuve Niger.

Figure 3.1 Coupe géologique schématique des formations de Bamako



L'âge de ces formations n'a pas pu être déterminée jusqu'à présent de façon certaine du fait de l'absence de fossiles et de l'impossibilité d'observer la tillite. Suivant les auteurs, il est considéré anté-cambrien (Bense, 1964; Palausi, 1958), cambro-ordovicien (Dars, 1961) ou précambrien supérieur (Carrère, 1975). Toutes ces formations sont recouvertes par les dépôts du quaternaire.

### 3.2- FORMATIONS GÉOLOGIQUES (Figure 3.1)

Dars (1961) a individualisé deux grandes formations, celle de Koulouba et celle de Sotuba. Carrère (1972) distingue de plus un ensemble supérieur. Les formations reposent en discordance sur le socle birrimien. Ce socle granité n'affleure qu'à 50 km au Sud de Bamako à Siby. Il est recouvert par les grès de base qui sont également absents aux environs de Bamako. Actuellement, il est admis que la géologie des environs de Bamako est constituée des trois séries gréseuses (de bas en haut) de Sotuba, de Koulouba, et de Kati.

#### Série de Sotuba (Figure 3.2)

La série de Sotuba forme les collines en rive droite du Niger, face à la ville de Bamako. Le fleuve y a creusé les rapides de Sotuba. C'est une série essentiellement détritique, à granulométrie transgressive, légèrement feldspathique, micacée, glauconieuse, à ciment siliceux ou argilo-ferrugineux (Dars, 1961). La division en bancs est généralement bien visible, mais les grès peuvent être massifs. Les stratifications entrecroisées sont rares ou de faibles amplitudes quand elles existent. On observe également des riple-marks et des figures de dessiccation. La glauconie constitue l'indicateur sédimentologique et de faciès. Son altération donne des oxydes ferriques qui sont responsables de la teinte violacée très courante.

On y distingue schématiquement trois niveaux de bas en haut (Travi, 1980):

- des grès fins à grossiers à débit fréquent en plaquettes, contenant des galets mous et des passées pélitiques.
- une passée de grès grossiers à lentilles graveleuses et conglomératiques, très glauconieux, précédant un ensemble fin micassé, silicifié, contenant encore localement des lentilles graveleuses et conglomératiques;
- un horizon discontinu et discordant sur le précédent d'épaisseur variable (1 à 10 m), constitué essentiellement de grès fins argileux lités ou d'aspect brêchique, auxquels s'associe souvent un banc quartzitique.

La série de Sotuba est un dépôt marin de plateforme. Sa puissance est estimée à 250 m à Bamako (Carrère, 1975). Une mesure d'âge absolu sur la glauconie de Sotuba a donné 990 Millions d'années (Trofimov, 1970)

Figure 3.2 Coupe géologique schématique de la formation de Sotuba

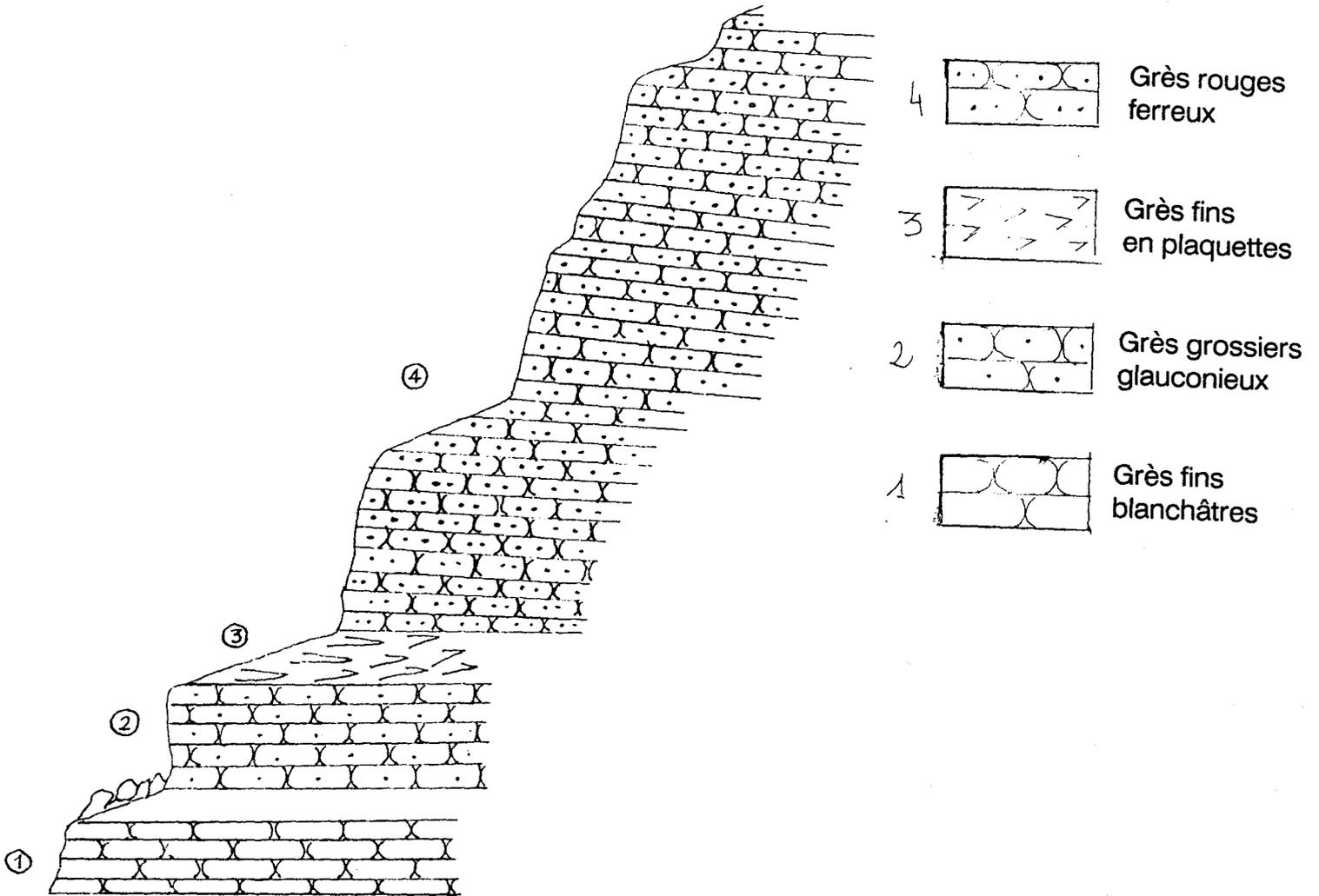
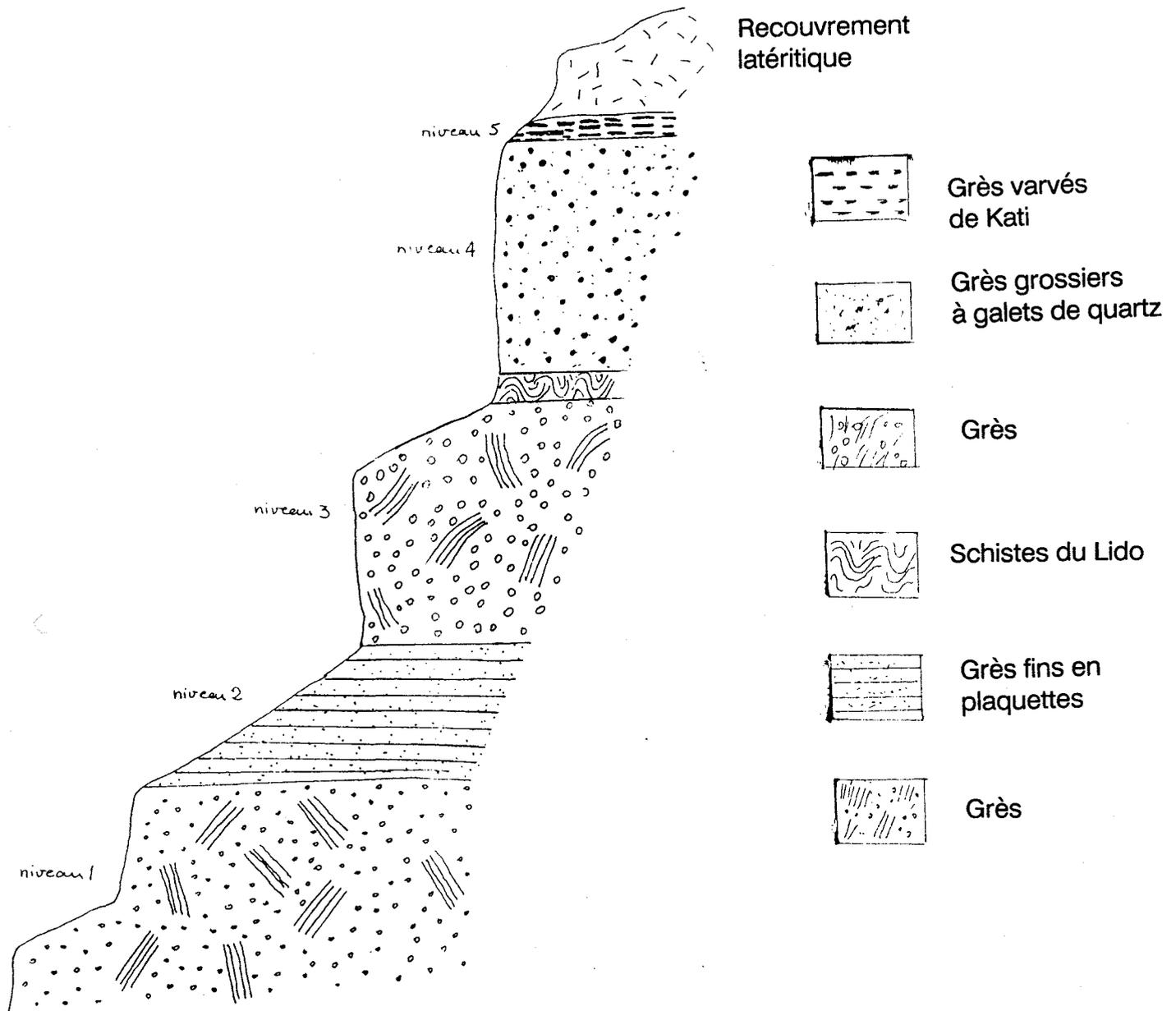


Figure 3.3 Coupe géologique schématique de la formation de Koulouba



### Série de Koulouba (Figure 3.3)

La série de Koulouba repose sur celle de Sotuba par l'intermédiaire d'un conglomérat souligné par une discontinuité de ravinement. L'ensemble de la série est essentiellement gréseux hétérogranulaire, et comporte trois niveaux:

- des grès moyens à grossiers, mal cimentés, se terminant très souvent par un petit niveau de grès fin à débit en plaquettes; cet ensemble discordant sur les précédents est épais d'environ 40 m à l'ouest de Bamako et se réduit à 1-2 m à l'est;
- des grès grossiers, peu cimentés plus ou moins microconglomératiques débutant par un conglomérat et passant progressivement à des grès fins quartzitiques;
- un ensemble de grès hétérogranulaires microconglomératiques à ciment siliceux coupé par une intercalation de shales micassés; il se termine par un microconglomérat compact à hématite.

Les formations du Koulouba affleurent généralement en falaises de pentes abruptes. Un palier correspondant aux shales est nettement marqué sur la topographie. Les phénomènes de stratification entrecroisées et de riple-marks y sont bien développés. Ce seraient des dépôts marins de plateforme. L'épaisseur de la série serait de 100 à 150 m.

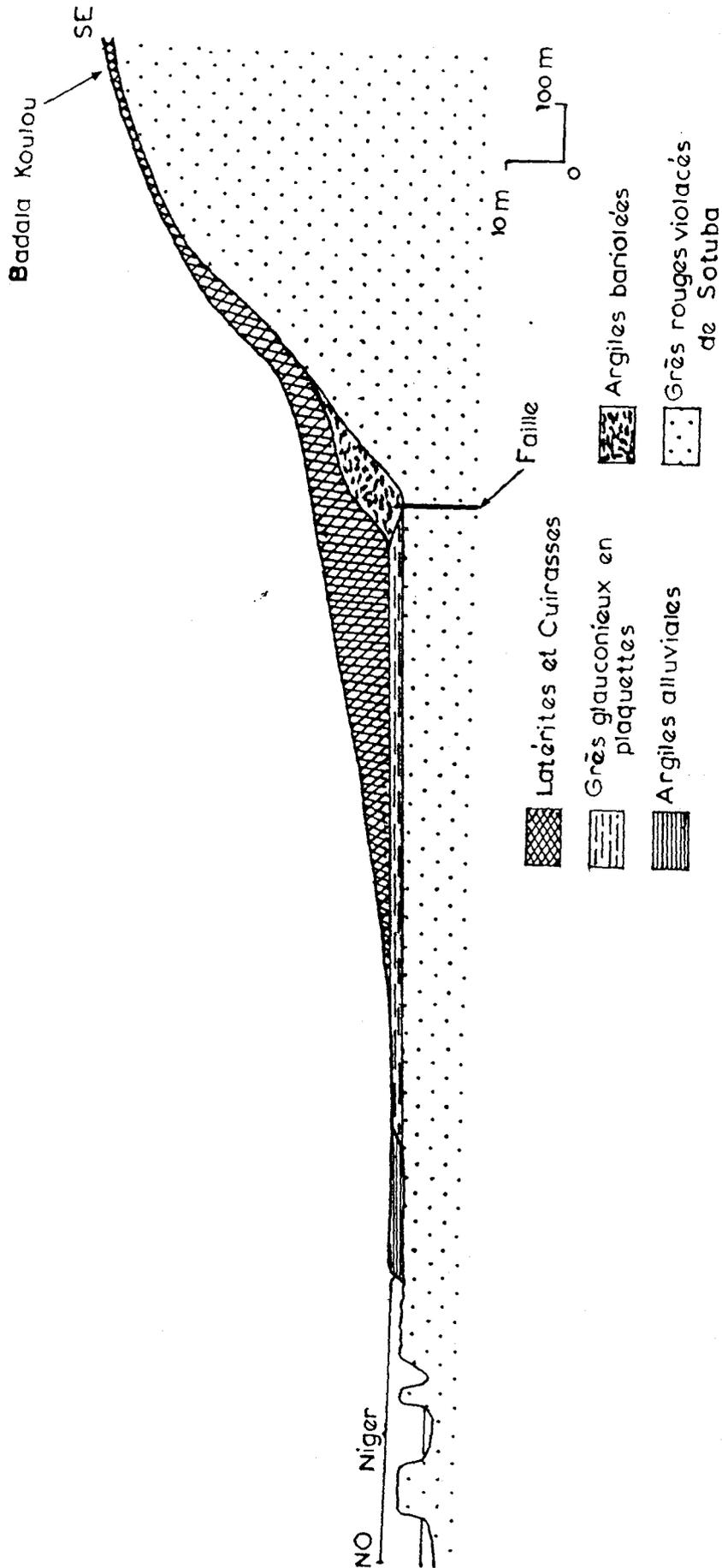
### Série de Kati

Cet ensemble est défini à Kati, localité située à une quinzaine de kilomètres au Nord de Bamako. Ce sont des grès varvés décrits par Dars (1961) comme étant constitués soit de lits fins argileux enrichis en magnétite et formant alors des bandes noires, soit de lits plus grossiers quartzo-feldspathiques formant des lits clairs. La série de Kati semble être la base de la série de Koula-Nonsombougou définie plus au Nord (Traoré, 1985). Cette série est constituée par une alternance de séquences schisteuses et de bancs gréseux, dans laquelle s'intercale un niveau de calcaires surmonté de jaspes.

### Formations quaternaires (Figure 3.4)

Le recouvrement quaternaire au niveau de Bamako intervient de façon prépondérante à la fois dans la forme du relief (ce qui est le cas dans toute la zone tropicale) et comme formation poreuse où se développe la nappe phréatique. Il est constitué par les cuirasses et éboulis latéritiques liés au plateau supérieur, ainsi que les alluvions, colluvions et formations latéritiques de la vallée du Niger. Les divisions classiques telles qu'alluvions, éluvions, etc... n'ont pas ici l'individualité qu'on peut leur attribuer dans d'autres régions.

Figure 3.4 Coupe géologique schématique des formations quaternaires



La formation de glacis d'érosion très étendus, liée aux conditions climatiques s'est faite aux dépens des formations récentes et on peut facilement observer que chaque glacis débutant sur des formations de pente ou de piedmont se poursuit dans des éluvions ou dans des alluvions.

Le déplacement d'oxydes de fer, véhiculés à partir des cuirasses latéritiques sommitales a provoqué postérieurement à la formation du glacis une cimentation des éléments assez grossiers situés à la base du glacis, dans la zone de circulation des eaux d'infiltration. Simultanément, les éléments les plus fins surtout argileux ont été entraînés par percolation jusqu'aux roches formant le substratum. On distingue plusieurs types de formations dont la nature est souvent en relation avec leur position géomorphologique .

### Latérites

L'altération ferralitique est provoquée par l'hydrolyse des minéraux primaires conduisant à l'individualisation de tous les éléments chimiques de ces minéraux, au lessivage des alcalins et alcalino-terreux, au lessivage partiel ou total de la silice et au maintien en place des autres éléments tel que le fer, l'aluminium et le titane, sous forme d'oxydes et d'hydroxydes. L'élimination totale, par lessivage, d'un certain nombre d'éléments, exige simultanément que le volume des précipitations soit suffisant pour pouvoir dissoudre les minéraux primaires et individualiser les constituants chimiques, et que le drainage interne des profils soit suffisant pour pouvoir entraîner les produits ainsi individualisés et dissous.

Outre ces deux facteurs, de nombreux autres éléments interviennent dans le processus d'altération:

- la composition minéralogique (l'abondance des feldspaths plagioclases et ferromagnésiens favorise l'altération);
- le degré de fissuration (favorise la pénétration des eaux );
- la texture de la roche (les roches à gros grains sont plus facilement altérées);
- l'amplitude des variations du niveau hydrostatique; dans les zones de fluctuation, l'équilibre physico-chimique n'est pas atteint, les réactions chimiques contribuant à la décomposition de la roche sont fréquentes. La vitesse de ces réactions est activée par la température, le pH et la concentration en sel.

Ces latérites peuvent s'indurer et donner lieu à des horizons cuirassés. Cette induration se produit par destruction des complexants organiques non renouvelés en saison sèche, par oxydation du milieu ou par dessiccation (Dars, 1961). A Bamako, les latérites sont omniprésentes, et se retrouvent à différents niveaux topographiques. Sur les plateaux gréseux, on observe une latérite primaire sous

forme de cuirasse très compacte, alvéolaire, de couleur rouge foncée à noire. En rive gauche, elle se situe entre les altitudes 475 et 550 m, tandis qu'en rive droite elle se développe entre 350 et 375 m. Ces latérites constituent les vestiges d'une paléopénéplaination. Sur les pentes on observe une latérite intermédiaire se moulant sur le relief, ou constituant de petites buttes. Elle est rose à rouge, pisolitique d'aspect plus ou moins microconglomératique, et plus argileuse. Son épaisseur peut atteindre 10 m. Au fond des vallées, sous les alluvions et colluvions, se trouve une latérite assez compacte, gravillonnaire, rouge ocre à jaune ocre selon le degré de lessivage et de ferralitisation. On peut observer plusieurs niveaux ne dépassant pas 2 m.

#### Alluvions - Colluvions

On y distingue:

- des sédiments argileux gris compacts, et argilo-sableux contenant localement des lentilles de galets. Ces sédiments occupent la partie basse de la plaine en bordure du Niger. L'épaisseur est généralement de 3 à 4 m. Il semble que la puissance de ces argiles dépasse 10 m en rive gauche (13 m au niveau du sondage de l'ITEMA dans la zone industrielle). Cette épaisseur exceptionnelle serait en faveur de l'hypothèse d'un déplacement du lit du Niger dans cette zone à une époque récente.
- des dépôts argilo-sableux et limoneux d'origine alluviale ou colluviale, recouvrant en partie le glacis limité par les falaises gréseuses et les formations quaternaires précédentes. Leur origine est liée à la présence de nombreux petits cours d'eaux qui coulent perpendiculairement au Niger.

### 3.3- EXQUISSE GÉOLOGIQUE ET STRATIGRAPHIQUE

Il ne nous pas été possible d'établir une carte d'affleurement de ces différentes formations, du fait de l'urbanisation et de la diversité des formations. On peut cependant donner les grandes lignes suivantes:

- en rive gauche, du pied des falaises jusqu'à l'altitude 330 m environ, on observe un niveau de latérite de pente. Ce niveau est assez continu d'Ouest en Est, et semble être le reliquat d'un glacis disparu qui se serait développé à une époque où le niveau du fleuve était plus élevé qu'actuellement. Cette latérite est fortement entaillée par les nombreux ruisseaux qui coulent perpendiculairement au fleuve. Son épaisseur maximale s'observe à l'Ouest, avec plus de 15 m à Hamdalaye; et à l'Est à Missira et Bankoni avec environ 10 m. Elle se réduit à 2 m au centre, entre les quartiers Médinacoura et Darsalam.

- au Sud on observe les formations argileuses qui atteignent leur épaisseur maximale à l'Est vers la zone industrielle.
- la rive gauche est presque entièrement occupée par la latérite qui donne lieu à de petits reliefs. Les formations argileuses sont réduites et occupent une zone allant de Bacodjikoroni au pont de Badalabougou. Il semble que le niveau de base du Niger et de ses affluents ait évolué au cours du temps, ce qui a provoqué à plusieurs reprises l'érosion des glacis déjà stabilisés, l'entraînement de la partie meuble des formations, la latérite restant alors avec les argiles sous-jacentes les seuls témoins du glacis. La formation d'un nouveau glacis à une côte inférieure à la côte des glacis précédents explique qu'on puisse observer plusieurs niveaux latéritisés superposés, le plus ancien étant le plus élevé. (Figure 4..)

Ainsi on peut observer la succession stratigraphique suivante:

Au niveau des latérites:

- 1- cuirasse latéritique pisolitique très indurée;
- 2- conglomérat à galets de grès ou de latérite à ciment d'oxyde de fer;
- 3- latérite argileuse avec gravillons (vides et alvéoles de grande taille et structure feuilletée);
- 4- grès.

Au niveau des argiles:

- 1- argile limoneuse;
- 2- cuirasse latéritique;
- 3- argile avec gravillons latéritiques;
- 4- grès.

Notons que l'on peut observer 2 niveaux de latérite.

### 3.4- TECTONIQUE

Les formations sédimentaires présentent une structure tabulaire avec un léger pendage (de 1°) vers le NE. Elles sont affectées par un réseau de fractures et de failles à faible rejet, qui se manifestent le plus souvent en surface par des linéaments plus ou moins visibles sur les photographies aériennes. Ces fractures constituent des zones de drainage comme l'attestent les nombreuses émergences d'eau qui y prennent naissance. Ces fractures sont diversement orientées. En rive gauche on observe que les principales directions sont NNE-SSW ou NNW-SSE, WNW-ESE ou E-W. Elles sont subverticales. Citons la faille de Sikoroni avec environ 30 m de rejet, la faille de Koulouba et de la carrière de Hamdalaye en rive gauche. En rive droite, la faille au pied de Badalakoulou a

favorisé le développement de 10 m d'argile. Il est à noter également l'existence d'un réseau dense de diaclases de directions NW-SE et NE-SW.

### 3.5- INVESTIGATIONS GÉOPHYSIQUES

#### 3.5.1- *Introduction*

Dans le cadre du projet, des travaux géophysiques ont été réalisés dans la ville de Bamako notamment sur la rive gauche du fleuve Niger. Ces travaux, aux objectifs multiples, et basés entièrement sur les méthodes électriques, devaient permettre d'obtenir les résultats suivants:

- la variabilité spatiale des alluvions et colluvions, constituant la nappe phréatique, et leurs épaisseurs;
- la fracturation du substratum gréseux.

L'analyse de ces données devrait aider d'une part à mieux comprendre la configuration des cartes piézométriques, à fournir un des éléments (épaisseur de la nappe en différents points) nécessaire à la modélisation mathématique de la nappe, et à faire un pas dans la connaissance de l'interdépendance des nappes superficielles alluvio-colluvionnaires et profondes du substratum gréseux.

#### 3.5.2- *Méthode géophysique*

La méthode électrique a été utilisée tout au long des travaux. Elle est basée sur l'envoi dans le sous-sol, au moyen d'électrodes d'injection (A et B), d'un courant continu d'intensité  $I$ , et sur la mesure entre deux autres électrodes (M et N) de la différence de potentiel  $\Delta V$  liée à la distribution des résistivités dans le sous-sol.

L'étude de la répartition spatiale des différentes unités géologiques et de leur tectonique, basée sur la variation des résistivités fait appel à deux techniques essentielles.

##### le sondage électrique (SE)

Il consiste à établir la courbe de variation de la résistivité apparente ( $\rho_a$ ) des terrains en fonction de la distance entre les électrodes d'injection A et B. Cette méthode permet de mesurer les caractéristiques électriques ( $\rho_a$ ) qui différencient plusieurs niveaux horizontaux superposés verticalement. Le dispositif de mesure utilisé le plus couramment est le dispositif Schlumberger.

Le centre du dispositif appelé point de traçage (ou de report) reste fixe. On écarte progressivement les électrodes d'injection de courant symétriquement par rapport au point de traçage. Les électrodes de réception M et N restées fixes pour un certain nombre d'écartements de A et B sont ensuite éloignées en tenant compte de la condition  $4 < AB/MN < 20$ . Les résistivités apparentes ( $\rho_a$ ) ainsi calculées à partir des mesures de I (mA) et  $\Delta V$  (mV) effectuées respectivement entre AB et MN apportent des informations géoélectriques sur la nature et l'épaisseur des couches du sous-sol situées à la verticale du point de traçage.

Toutefois, des difficultés d'interprétation des sondages électriques apparaissent pour les raisons suivantes:

- la base théorique d'interprétation des SE tient compte de l'existence de couches horizontales latéralement homogènes. Dans la pratique, ces conditions sont rarement satisfaites.
- une même courbe expérimentale peut représenter une infinité de structures. L'interprétation des SE doit donc nécessairement s'appuyer sur les données géologiques et les limites des paramètres physiques rencontrés dans la pratique. Ainsi, l'interprétation doit être calée sur un puits ou un forage, et ensuite vérifiée par comparaison de la courbe expérimentale avec la courbe théorique correspondant aux résultats d'interprétation. On parvient dans ce cas à faire une bonne estimation des résistivités vraies des niveaux électriques.

#### Le trainé électrique (TE)

Dans le trainé électrique, on fixe la géométrie dispositif AMNB, suivant le type de problème posé, et en se servant des informations apportées par les SE. On déplace ensuite l'ensemble de ce dispositif le long du profil, perpendiculairement à la direction de la structure recherchée. La ligne AB est choisie de façon à avoir une profondeur d'investigation suffisante pour l'obtention de la réponse de la structure visée. Le déplacement de la ligne permet une investigation latérale de la résistivité apparente.

#### *3.5.3- Résultats des sondages électriques*

Pour définir les limites inférieures de la nappe phréatique (alluvio-colluvionnaire) de Bamako, des séries de SE (18) ont été exécutées suivant deux profils orientés sensiblement Nord-Sud, aux extrémités Est et Ouest de la ville, en rive gauche. Selon le degré de précision recherché et la disponibilité des sites, les SE ont été placés à des distances allant de 170 à 800 m. Il faut noter que le centre de la ville n'a pu être exploré, du fait de l'exiguïté et du trafic routier, et n'a donc pas permis

d'établir dans cette zone la profondeur du substratum gréseux. Ceci aurait été nécessaire à une compréhension globale de la nappe, et à la précision des directions de drainance mises à évidence sur les cartes piézométriques.

Toutefois, les coupes géoélectriques établies sur la base d'interprétation des SE autorisent quelques hypothèses sur le comportement structural de la nappe phréatique de la ville.

Avant de procéder à une analyse exhaustive des coupes géoélectriques, il convient de faire quelques observations sur la qualité de l'interprétation donnée à partir des SE. En effet, l'absence de forage et de puits profonds proches, permettant d'avoir des informations sur les épaisseurs des formations géologiques dans les secteurs étudiés et d'en déduire une estimation des résistivités vraies des niveaux électriques, a certainement été une source d'erreur significative. Ainsi, les résultats (épaisseurs et résistivités vraies des couches de terrain) sont connus avec des erreurs pouvant atteindre, à notre avis, 15%.

#### 3.5.4- Coupe géoélectrique Bamako Est (Figure 3.5).

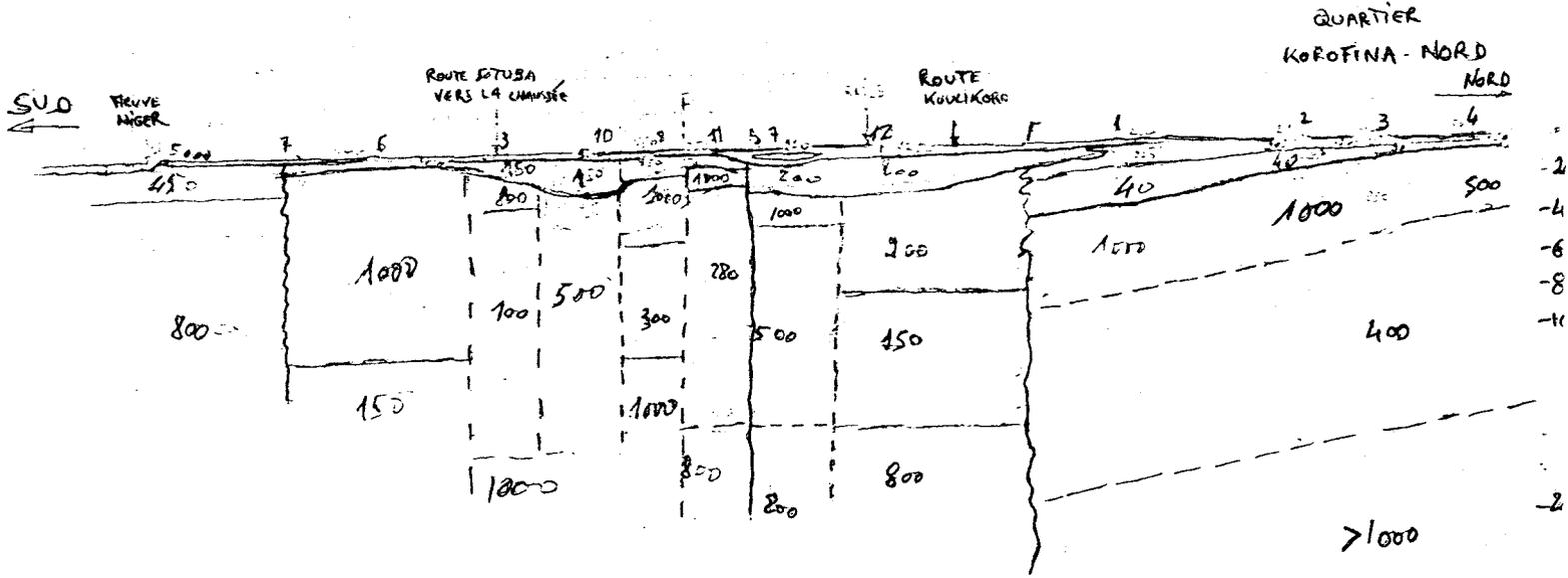
Cette coupe électrique s'étalant sur 3,5 km à partir de Fadjiguila Dioumazana au Nord (SE.4:  $x=613,44\text{km}$   $y=1401,52\text{km}$ ) jusqu'au fleuve Niger au Sud (SE.5:  $x=613,88\text{km}$ ,  $y=1398,04\text{km}$ ) comprend deux parties distinctes.

La première, qui intéresse les quartiers de Fadjiguila Dioumazana et Korifina Nord, s'étend du SE.4 jusqu'aux environs de la route de Koulikoro où la limite n'est pas établie avec certitude par absence de SE. Plus régulière, elle présente des horizons légèrement inclinés vers le Sud. Ce léger pendage des couches en profondeur semble se traduire en surface par une pente topographique de 1% favorisant ainsi l'écoulement des eaux de surface vers le fleuve.

A partir du seul forage connu à proximité (Tableau 3.1) exécuté 960 m à l'Est de notre coupe géoélectrique à une cinquantaine de mètres au Nord de la route de Koulikoro, les correspondances d'ordre géologique suivantes peuvent être établies. Ainsi, on observe de haut en bas:

- un horizon de 20 cm, constituant le recouvrement argileux présentant un niveau plus résistant ( $200\ \Omega\text{m}$ ) de moins d'un mètre lié à un changement de faciès (prédominance de sable). Ces argiles varient de 0,5 à 2 m vers le Sud.
- un horizon assez résistant (environ  $900\ \Omega\text{m}$ ) variant de 1 m au Nord à une dizaine de mètre vers le Sud (SE.1) qui correspondrait aux latérites argileuses très dures.

Figure 3.5 Coupe géoélectrique Bamako Est



ECHELLE : HORIZONTALE 1/20000  
 VERICALE 1/4000

Tableau 3.1 Forage du Djélibougou (22/02/85 au 05/03/85)

Lithologie	Épaisseur
argile	0 à 5 m
latérite argileuse	5 à 11,10 m
grès grisâtre argileux	11,10 à 15 m
grès schisteux	15 à 30 m
grès peu schisteux	30 à 107 m
grès violacé peu dur ...	
pas schisteux	107 à 111 m
grès quartzite	111 à 111,5 m

Venues d'eau de 8,1 m<sup>3</sup>/2 à 111 m  
 Niveau statique: 6,31 m.

- un horizon plus conducteur ( $40 \Omega m$ ) de plus en plus profond vers le Sud (2 à 30 m) qui correspondrait à des grès argileux ou schistes probablement altérés.
- les horizons  $1000 \Omega m$ ,  $400 \Omega m$  et plus de  $1000 \Omega m$  (ce dernier apparaît seulement sur le SE.3) qui seraient respectivement des grès quartzeux durs, des grès schisteux tendres et des grès quartzitiques.

La seconde partie qui s'étend de la route de Koulikoro jusqu'au fleuve serait un prolongement des formations reconnues au Nord (première partie) très affectées par une tectonique cassante illustrée par un jeu de failles. Cette tectonique semble donner à cette partie une image de cuvettes centrées sur SE.12 et SE.7 d'une part, et sur SE.10 d'autre part, séparées par un seuil au niveau de SE.8 et SE.11 se présentant sous la forme d'un petit horst. Ce horst serait affecté de failles se traduisant sur les trainés électriques par une belle anomalie conductrice au sein d'un bloc résistant.

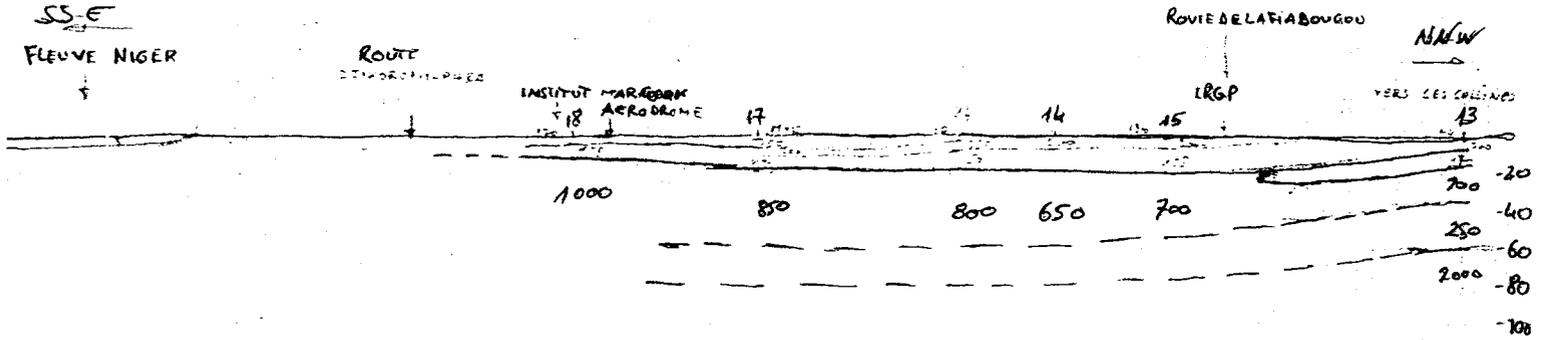
La faille reconnue entre le SE.7 et le SE.11 qui marque la limite entre le seuil et la cuvette du Nord apparaît sur les TE sous forme d'anomalie conductrice d'amplitude relativement faible ( $150 \Omega m$ ). Ces cuvettes, qui apparaissent au niveau des ateliers du chemin de fer et à 280 m au Nord de la route goudronnée menant à la chaussée submersible, seraient les zones d'approfondissement de la nappe phréatique (25 à 30 m) remplies par les alluvions limono-argilo-sableux du fleuve et les colluvions drainés par les eaux de ruissellement à partir des plateaux gréseux du Nord (plateau Mandingues). Ces formations meubles d'environ  $200 \Omega m$  disparaissent peu à peu à partir de la route vers le Sud au profit du substratum gréseux (grès de Sotuba) qui affleure dans le lit du fleuve.

La dispersion des résistivités ( $100-150-300$  à  $500 \Omega m$ ) observée dans les zones de cuvettes et horst (soit entre SE.9 et SE.12) serait liée à certains facteurs (degré de fracturation, changement de faciès, présence d'eau) qui varient de manière notable d'un point à un autre.

### 3.5.5- Coupe géoélectrique Bamako Ouest (Figure 3.6)

Effectuée à Lafiabougou, elle s'étend sur 2,4 km du bas du plateau gréseux (Lassa-Koulou) au jardin maraîcher de l'Institut Marchoux. Contrairement à l'Est, les structures constituées d'une alternance d'horizons conducteurs (grès argileux ou schisteux) et résistants (grès quartzitiques), probablement épargnés par la tectonique cassante, paraissent beaucoup plus calmes avec un léger approfondissement du socle gréseux au niveau des SE.14 et SE.15.

Figure 3.6 Coupe géoélectrique Bamako Ouest



ECHELLE : HORIZONTALE =  $\frac{100}{1/20000}$

VERTICALE =  $\frac{20}{1/4000}$

Sous le recouvrement limono-argilo-sableux plus ou moins résistant (200 à 300  $\Omega$ m), apparaît un niveau conducteur (150  $\Omega$ m) qui pourrait être les formations plus argileuses affleurant au Nord, au bas de la colline sur le SE.13. Ce niveau conducteur s'enfonce de plus en plus au niveau des SE.15 et SE.16, puis remonte progressivement vers la surface au fûr et à mesure qu'on avance vers le fleuve.

L'horizon suivant plus résistant (700 à 1000  $\Omega$ m) correspondrait à des grès plus quartzeux. Il paraît plus profond au niveau de SE.16, SE.14 et SE.15, faisant ainsi de cette zone un petit bassin à fond plat. De moins en moins profond vers le Sud, il correspondrait aux formations gréseuses affleurant dans le lit du marigot Ouéouyanko plus au Sud-Ouest, et dans le lit du fleuve.

### 3.5.6- Résultats des trainés électriques (Figure 3.7)

(P<sub>1</sub>: AB = 92 m; MN = 10 m, P<sub>2</sub>: AB = 300 m; MN = 10 m)

Dans la zone de Sotuba, où les SE fournissent des renseignements assez dispersés avec la profondeur, nous avons utilisé deux longueurs de ligne AB (92 m et 300 m) pour un MN commun de 10 m. Le pas de mesure était de 10 m. Le rapport triple de longueur entre ces deux lignes nous permet d'avoir des informations sur la résistivité apparente des terrains pour deux profondeurs d'investigation schématiquement dans un rapport de 3 également.

Le double objectif fut de suivre la présence éventuelle des structures conductrices associées aux discontinuités tel que frange d'altération, fracture, faille etc., au sein des formations superficielles (alluvions et colluvions) et des formations gréso-schisteuses du socle profond, puis de déduire le pendage de ces formations. Les résultats des deux trainés ont été portés sous forme de profils sur papier semi-Log. Les courbes de résistivité apparente obtenues pour la ligne courte (plus influencée par les terrains superficiels) et pour la ligne longue (plus influencée par les terrains profonds) sont assez parallèles sur une grande portion de la zone couverte. Les résistivités apparentes obtenues avec la grande ligne sont restées plus élevées, sauf au niveau des stations 270 à 370 m, et 190 à 220 m.

L'observation de ces trainés permet de dégager trois zones à faibles résistivités apparentes qui se dessinent de façon très similaire sur la ligne courte et sur la ligne longue. Ces zones de faiblesses ou anomalies électriques centrées sur les stations 220, 390 et 605 m témoignent de la présence de fractures subverticales qui affectent les terrains de moindre et de grande profondeurs.



L'anomalie, centrée sur la station 320 m, d'une largeur de 20 m et d'amplitudes 400  $\Omega$ m et 340  $\Omega$ m respectivement sur la courte et la grande ligne, et taillée dans un compartiment plus résistant correspond au horst constaté sur la coupe géoélectrique. La faille qui a affecté le horst se traduit sur les TE par cette anomalie. La différence d'amplitudes trouve son explication dans la distribution des résistivités au niveau du horst. En effet, la résistivité de 1000  $\Omega$ m de la partie supérieure de cette entité aurait marqué les mesures sur la ligne courte tandis que les résistivités de la partie médiane 270 à 300  $\Omega$ m auraient contribué à la légère chute des résistivités apparentes observées sur la grande ligne AB.

L'anomalie centrée sur la station 605 m (largeur 20 m; amplitude 105  $\Omega$ m) correspond à la deuxième dépression limitant le horst vers le Sud. L'altération de la tête de cette fracture ainsi marquée pourrait bien expliquer la présence de cette dépression électrique. Quant à l'anomalie, d'amplitude 130  $\Omega$ m localisée sur la station 220 m, elle représente la faille qui passe à 60 m au Sud du SE.11.

L'absence de trainés parallèles ne permet pas de se prononcer sur l'azimut de ces failles. Elles peuvent être parallèles ou sécantes au fleuve Niger.

### 3.5.7- Conclusion

Ces premiers travaux géophysiques, réalisés sur la nappe de Bamako et faisant appel aux méthodes de SE et TE, ont permis d'établir un premier schéma géologique au niveau de la ville de Bamako. L'examen des coupes géoélectriques établies en s'appuyant sur les résultats d'interprétation des SE et des TE permet de dégager les unités hydrogéologiques suivantes:

- une nappe phréatique continue dans des formations alluvio-colluvionnaires plus épaisses au centre de la ville et disparaissant au Nord et au Sud respectivement au profit des formations gréseuses de Koulouba et des grès du Sotuba affleurant dans le lit du fleuve Niger.
- une nappe de fracture (discontinue) développée dans le substratum gréseux du Koulouba et du Sotuba en grande partie.

L'approfondissement du substratum dans la partie centrale de la ville est lié au jeu de failles avec mise en place de horst et dépression (graben) comblées de colluvions et d'alluvions.

## **CHAPITRE 4**

### **HYDROGÉOLOGIE DE LA CUVETTE DE BAMAKO**

Les ressources en eau souterraine de Bamako sont contenues dans deux principaux aquifères:

- l'aquifère des formations gréseuses précambriennes,
- l'aquifère des alluvions, colluvions et latérites du quaternaire

Ces aquifères sont le plus souvent en communication hydraulique entre eux.

#### **4.1- AQUIFERE DES FORMATIONS GRÉSEUSES**

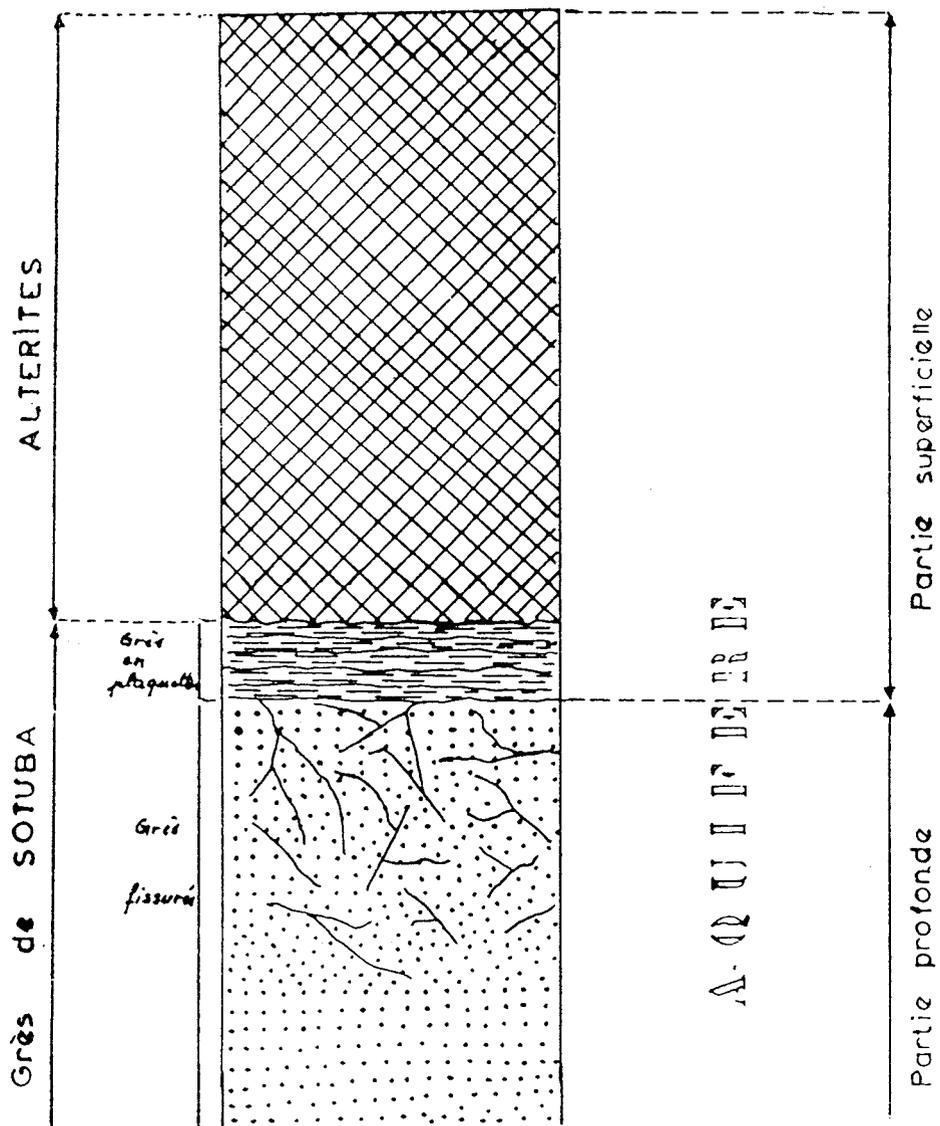
La position topographique des grés de Koulouba et de Kati, la forte cimentation et même la re-silicification de ces grés font que leur rôle hydrogéologique est assez limité. Cependant, la fracturation plus ou moins intense qui les affecte, leur confère une porosité secondaire de type fissural. Malgré tout, ces formations constituent un mauvais aquifère, car les eaux qui s'y infiltrent ne rencontrent généralement pas de niveau suffisamment imperméable pour s'y accumuler. Elles jouent de ce fait le rôle de zones d'alimentation pour les aquifères sous-jacents et surtout de drains pour les eaux du plateau latéritique supérieur (Travi, 1981).

Les grés de Sotuba présentent par contre des conditions plus favorables: granulométrie souvent grossière; existence de niveaux plus fins; fracturation et position topographique. Ces formations sont connues par plusieurs forages profonds dont les débits varient de 1 m<sup>3</sup>/h à 30 m<sup>3</sup>/h. Elles constituent le plus important réservoir d'eau souterraine des alentours de Bamako.

#### **4.2- AQUIFERE DES FORMATIONS QUATERNAIRES**

Dans les formations de recouvrement quaternaire, on rencontre deux aquifères différenciés suivant leur position topographique: l'aquifère du plateau supérieur, et celui de la vallée du Niger. C'est ce dernier qui a fait l'objet de notre étude.

Figure 4.1 Structure géologique schématique de l'aquifère de Bamako



#### 4.2.1- *Aquifère du plateau supérieur*

De par son importante épaisseur (20 m) et du fait que cette formation soit fissurée en surface et à structure feuilletée en dessous, la latérite du plateau supérieur constitue un bon réservoir captant les eaux de pluie. Cependant, sa position topographique et la fissuration des formations gréseuses sous-jacentes font que son rôle hydrogéologique se limite à l'alimentation de l'aquifère des grès sous-jacents ainsi que des cônes d'éboulis en bordure du plateau. La plupart des cours d'eau ont aussi leur source directement ou indirectement liée à cet aquifère (source du Lido, source de Méguin Sikoro, etc..)

#### 4.2.2- *Aquifère de la vallée du Niger (Figure 4.1)*

Cet aquifère s'étend le long du fleuve Niger. Sa limite Nord est constituée par les falaises gréseuses. Par contre au Sud, sa limite est peu précise, le glacis s'étendant sur une vingtaine de mètres, entrecoupé par des affleurements de grès.

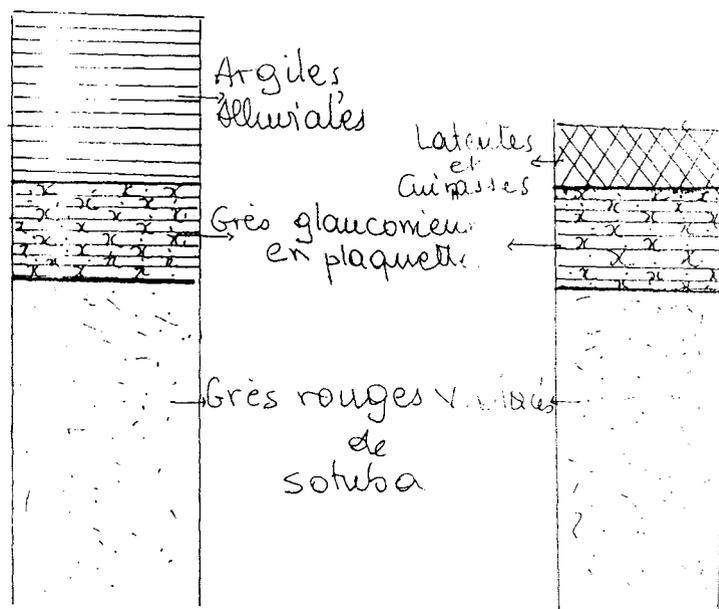
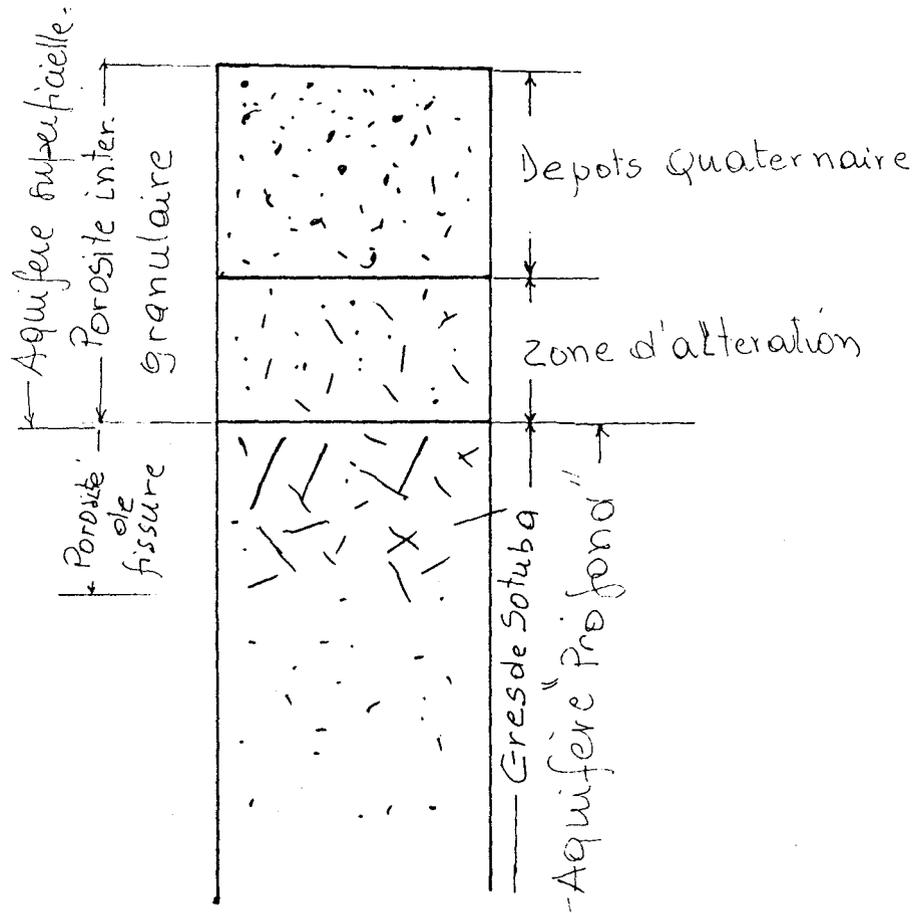
La nappe se développe dans le glacis latéritisé, dans les alluvions et colluvions limono-argileux, ainsi que dans la frange altérée du substratum gréseux. Son épaisseur est très variable et peut atteindre 30 m (travaux géophysiques), mais elle est généralement de 4 à 10 m suivant la position topographique. Cet aquifère est exploité par la population grâce à de nombreux puits.

### 4.3- CARACTÉRISTIQUES DE L'AQUIFERE DE LA VALLÉE DU NIGER

#### 4.3.1- *Granulométrie*

Des analyses granulométriques ont été effectuées sur des échantillons pris dans certains puits, lors des essais à l'infiltromètre. Nous disposons également d'analyses réalisées par le Génie Civil. Ces analyses ont porté sur la fraction de diamètre supérieur à 80  $\mu\text{m}$  ou à 40  $\mu\text{m}$ . On note que pour les latérites, 18 à 62% des éléments ont un diamètre inférieur à 80  $\mu\text{m}$ , tandis que pour les alluvions, nous en avons de 40 à 86%. Ces résultats ne nous permettent pas d'obtenir le diamètre efficace d<sub>10</sub>%. Il est dans tous les cas inférieur à 80  $\mu\text{m}$ , ce qui présage d'une mauvaise perméabilité de ces formations.

Figure 4.2 Caractéristique géologique de l'aquifère de Bamako



**Tableau 4.1 Perméabilités évaluées à l'aide de l'infiltromètre**

Lieu	Perméabilité moyenne (m/s)
E.N.I	3.10-6
Musée	9.10-6
Stade Mamadou Konaté	2.10-5
Lycée Prospère Kamara	4.10-5
Hamdalaye maternité	9.10-6
Asecna	1.10-5
Djikoroni	9.10-6
Zone industrielle	9.10-6
Sotuba	4.10-6
Djélibougou	2.10-5
Doumanzana	4.10-5
Sikoroni	1.10-5
Kalabancoro	1.10-5
Faladié	1.10-5

#### 4.3.2- Perméabilité

Des essais de perméabilité à l'infiltromètre ont été effectués sur 14 sites. Nous avons eu le souci d'une répartition des sites en fonction de leur position géomorphologique. Les résultats sont donnés au Tableau 4.1

Ainsi, dans la partie supérieure du glacis (Musée, Lycée Prospère Kamara, Doumanzana, Kalabancoro, Hamdalaye) les perméabilités varient de  $10^{-5}$  à  $4 \cdot 10^{-5}$  m/s. Dans la partie moyenne, elles sont de l'ordre de  $10^{-5}$  m/s, et dans la partie basse de la plaine, elles varient de  $4 \cdot 10^{-6}$  à  $10^{-5}$  m/s.

Ces valeurs sont assez faibles et correspondent à des formations semi-perméables. Elles sont représentatives de la perméabilité du premier mètre de recouvrement. La première conséquence de ces faibles perméabilités est la prédominance du ruissellement sur l'infiltration.

#### 4.3.3- Transmissivité

Au total nous avons réalisé 8 essais de pompage dont 3 en rive gauche (Darsalam, Korofina et Dielibougou) et 5 en rive droite (Kalabancoura, quartier Mali, Sogoniko, Faladié et Sokorodji). Les essais de la rive gauche ont coïncidé avec la saison sèche tandis que ceux de la rive droite ont été faits en saison pluvieuse.

A Darsalam1, le pompage a duré 90 minutes, avec un débit moyen de  $2,17 \cdot 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s. Le rabattement final est de 2,02 m. Le piézomètre le plus proche était à une vingtaine de mètres du puits pompé et n'a pas été influencé directement par le pompage. Les transmissivités calculées à la descente et à la remontée sont respectivement de  $4 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s et  $3 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s.

A Korofina 9, l'essai a été réalisé dans un puits profond de 8,70 m, avec un niveau statique de 6,32 m. Le pompage n'a duré que 20 mn avec un débit de  $7,14 \cdot 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s. La remontée a été suivie pendant 24 heures après le pompage. Il n'y avait pas de piézomètre. A la descente le rabattement total est de 1,55 m; la valeur de transmissivité obtenue est de  $6 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s. Pour la remontée, la transmissivité obtenue est de  $4 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s. Compte tenu du fait que la descente a été brève et la remontée assez longue, on doit se fier à la transmissivité trouvée lors de la remontée.

A Djélibougou, le pompage a eu lieu en 1990 dans un puits de 10,44m de profondeur avec un niveau statique de 8,41 m. Le temps de pompage a été de 210 mn avec un rabattement final de 1,67 m, et un débit moyen de  $2,83 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  sans piézomètre. La remontée a également été suivie pendant 210 mn. A la descente, on a trouvé une transmissivité de  $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . On observe un accroissement anormal des rabattements après 40 mn de pompage, ce qui peut être dû à une différence de perméabilité des formations rencontrées ou à la proximité d'une limite imperméable. Le temps de pompage ne permet pas de tirer plus de renseignements. Cette hétérogénéité se retrouve également sur la courbe de la remontée. A la descente, on trouve une transmissivité de  $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  pour la première partie de la courbe et de  $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  pour la seconde droite.

A Sokorodji, l'essai a été réalisé avec un débit de  $1,54 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  dans un puits profond de 5,62 m avec un niveau statique de 1,99 m. Le pompage n'a duré que 90 mn avec un rabattement final de 0,18 m. A la descente, la transmissivité obtenue est  $3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  et à la remontée de  $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

A Sogoniko, le pompage s'est déroulé dans un puits profond de 7,61 m avec un débit  $7,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  et un niveau statique de 5,15 m. La descente qui n'a duré que 90 mn, a enregistré un rabattement final de 2,03 m. La courbe de descente donne une transmissivité de  $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . La remontée qui n'a pas été suivie pendant longtemps (effondrement du fond du puits) donne une transmissivité de  $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

A Kalanbancoro 10, le pompage a eu lieu dans un puits de 5,62 m de profondeur avec un débit de  $4,84 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  et un niveau statique de 1,98m. Il n'y avait pas de piézomètre. La descente a duré 270 mn avec un rabattement final de 0,86 m. La remontée a été suivie jusqu'à la récupération totale du niveau initial. La courbe de descente montre une stabilisation au bout de 60 à 70 mn de pompage. La transmissivité est de  $1,47 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

A Faladié, l'essai a été effectué dans un puits de 6,75 m avec un débit moyen de  $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  et un niveau statique de 2,92 m. On disposait d'un piézomètre profond de 3,38m et distant du puits pompé de 3,70 m. Le pompage a duré 80 mn avec un rabattement final de 0,83 m dans le piézomètre. La courbe de descente donne une transmissivité de  $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  dans le piézomètre et un coefficient d'emmagasinement de 3%. La remontée donne une transmissivité de  $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  dans le puits. On n'a pas constaté de remontée dans le piézomètre.

Au Quartier Mali, le pompage a eu lieu dans un puits profond de 6,02 m au débit moyen de pompage de  $8,33 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ . Le niveau statique est de 3,32 m. Un piézomètre était disponible et situé à 3,50 m du puits pompé. Le rabattement final est de 0,22 m dans le piézomètre. La courbe de descente donne une transmissivité de  $8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ . Le coefficient d'emmagasinement est de 26%. Ces valeurs assez particulières s'expliquent probablement par la présence d'une grande fissure qu'on observe sur la paroi du puits.

Malgré les mauvaises conditions d'exécution des essais (temps de pompage très courts du fait du dénoyage rapide des aquifères), l'évolution des rabattements semble suivre les lois générales de l'hydrodynamique, ce qui nous a permis de faire l'interprétation par la méthode semi-logarithmique de Jacob.

L'hétérogénéité des formations aquifères est mise en évidence par des évolutions anormales de rabattement:

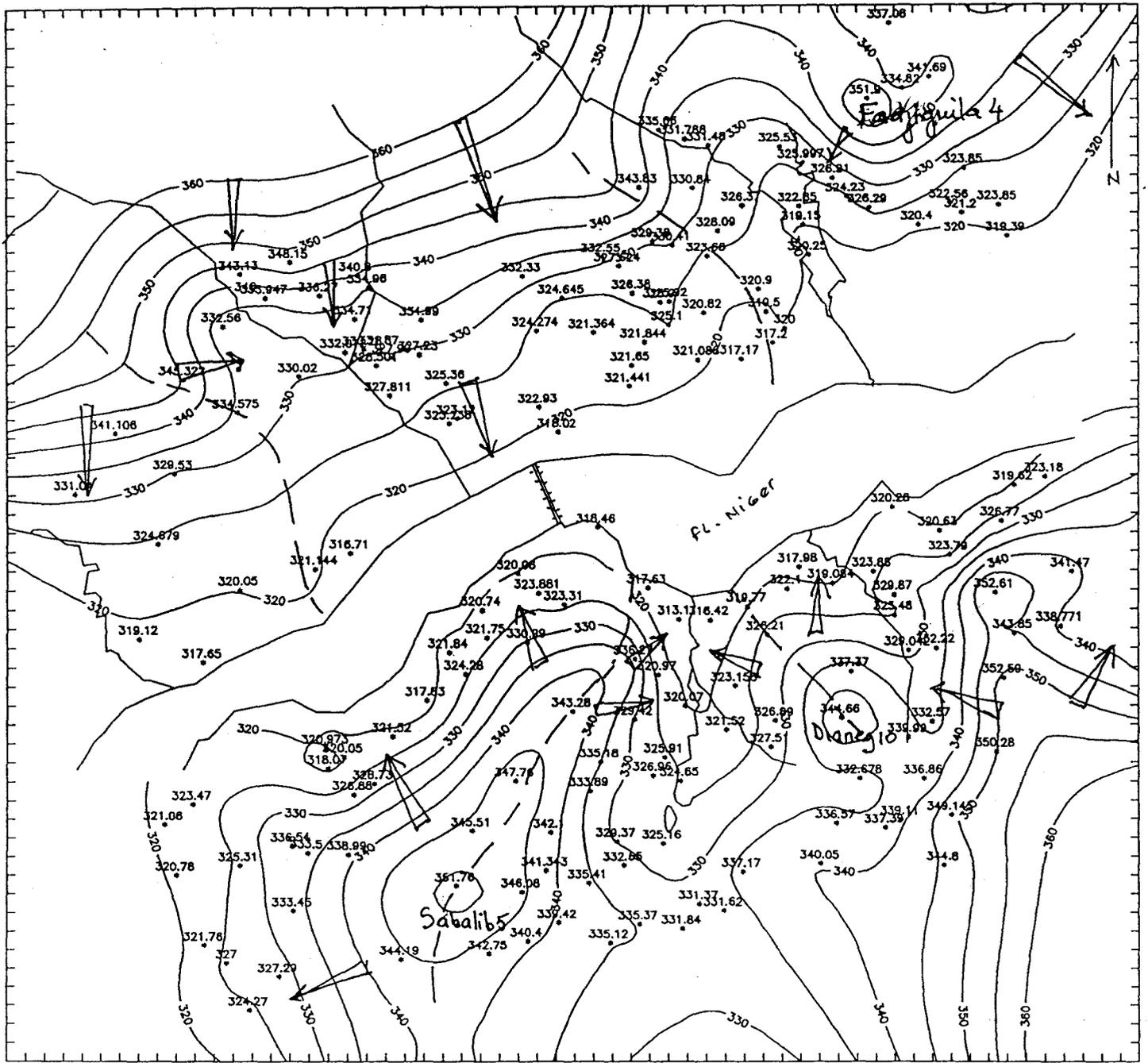
- pseudo-stabilisation liée probablement à des phénomènes de drainance correspondant à des transferts d'eau entre différents horizons aquifères (Kalabancoro);
- accroissement rapide des rabattements lié à une rupture de perméabilité (Djélibougou).

Les paramètres calculés sont à prendre avec beaucoup de prudence. Ce sont des indications très locales sur le comportement de l'aquifère. Compte tenu des épaisseurs de l'aquifère capté, les valeurs de perméabilité sont assez voisines de celles obtenues à l'aide de l'infiltromètre. Elles sont faibles et correspondent à des formations semi-imperméables. Elles peuvent être plus élevées dans la frange altérée du substratum gréseux ou au niveau de certaines fissures (Quartier Mali). Ces perméabilités sont finalement à rapprocher de celles obtenues par Travi (1981) dans les mêmes conditions de pompage. Ce dernier distinguait deux types de perméabilités dans les formations quaternaires: une perméabilité de chenaux et de grosses fissures ( $3 \text{ à } 4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ ) et une perméabilité de petites fissures ( $7 \text{ à } 9,5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ ).

#### 4.4- PIÉZOMÉTRIE

Les variations des niveaux piézométriques ont été périodiquement suivies durant deux ans dans quelques 180 puits. Ces puits d'observation ont été choisis sur la base de l'inventaire général. Nous avons eu le souci d'une répartition géographique homogène, et surtout de ne pas retenir les puits tarissant en saison sèche.

Figure 4.3 Piézométrie de la nappe en mars 1990 (étiage)



Seuls 50 de ces puits ont été nivelés, les altitudes des autres ayant été interpolées à partir de la carte topographique au 1/20000 de Bamako. L'erreur ainsi commise sur les altitudes est d'environ 50 cm. Malgré la précaution d'effectuer les mesures entre 7h et 9h du matin en général, les profondeurs de niveau de l'eau sont connues à  $\pm 20$  cm à cause d'éventuels puisages très tôt le matin. Compte tenu de tous ces facteurs nous estimons la précision sur les côtes de l'eau à  $\pm 70$  cm.

Nous présentons ci-après les 3 campagnes de mesures piézométriques effectuées en mars, mai et septembre 1990, sur 187 puits dont 102 en rive droite. Certains puits (1OBB à Ouolofobougou, 1HDL à Hamdallaye, Sgnko1 à Sogoniko et Kalcra8 à Kalabancoura) ont été par ailleurs suivis avec une fréquence plus courte, soit tous les mois de mars à septembre. Pour l'établissement des cartes, les mesures de niveau d'eau ont été transformées en altitudes de plan d'eau. La côte de la margelle du puits est calculée et on y retranche la profondeur de l'eau; ceci donne l'altitude du plan d'eau.

#### 4.4.1- Description des cartes (Figures 4.3 à 4.5)

Les trois cartes ont été établies à l'aide du logiciel Surfer. Les deux premières représentent la piézométrie de la zone d'étude en mars 90 et en mai 90, c'est-à-dire pendant la saison sèche. La troisième correspond à la saison des pluies (septembre 90).

Les cartes relatives à la saison sèche montrent:

- qu'en rive gauche, les isopièzes sont sub-parallèles au fleuve Niger. Elles sont plus espacées au Sud et à l'Ouest, qu'au Nord et à l'Est.
- l'écoulement principal est dirigé vers le fleuve.
- les lignes de courant sont divergentes en certains endroits et convergentes en d'autres. Ces endroits correspondent respectivement à des zones d'alimentation et de drainage de la nappe. Ceci est confirmé par les lignes de partage des eaux et les rivières qu'on y retrouve.

Quand à la carte correspondante à la saison des pluies, elle fournit exactement la même information que celles de la saison sèche.

Figure 4.4 Piézométrie de la nappe en mai 1990 (étiage)

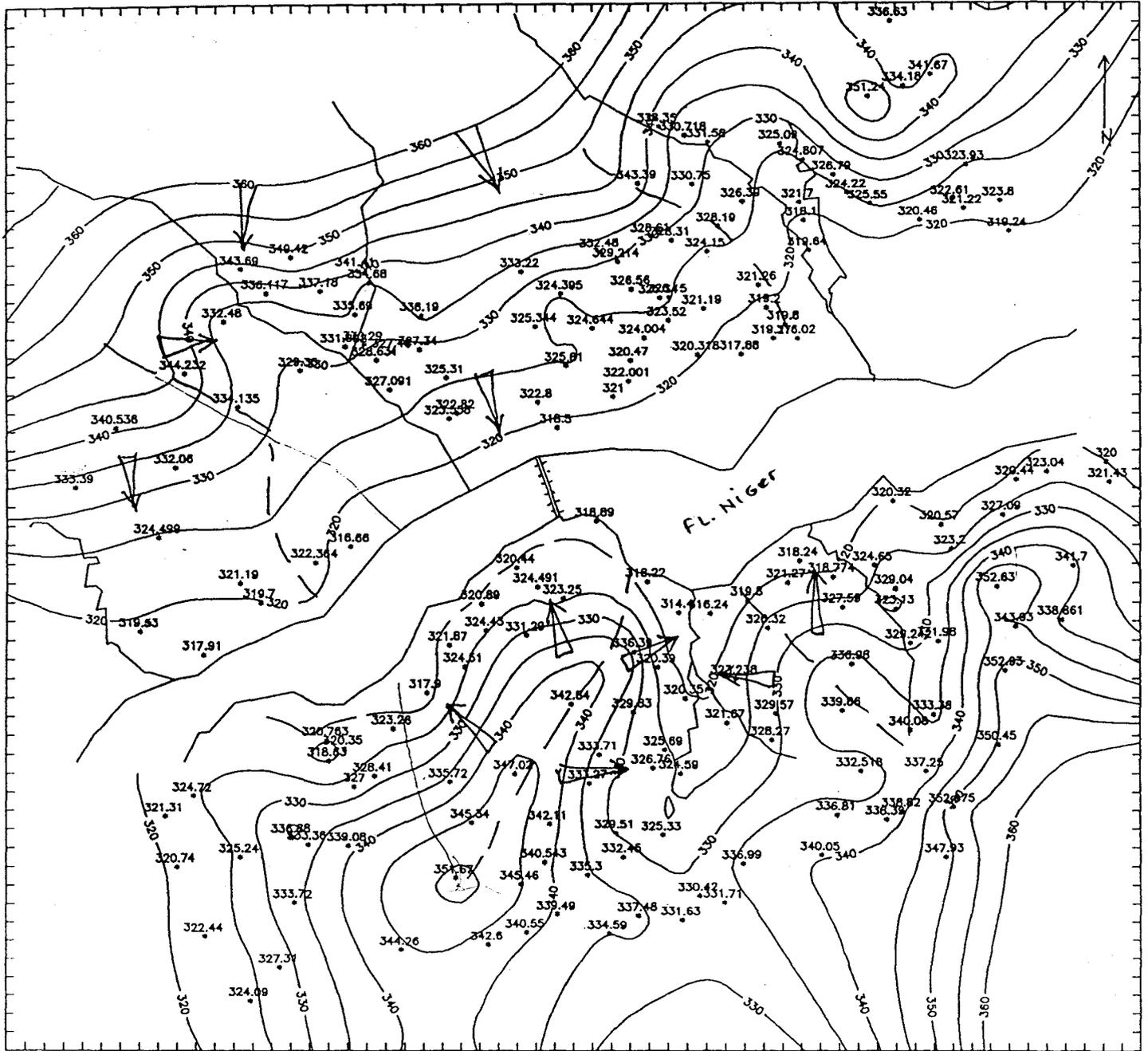
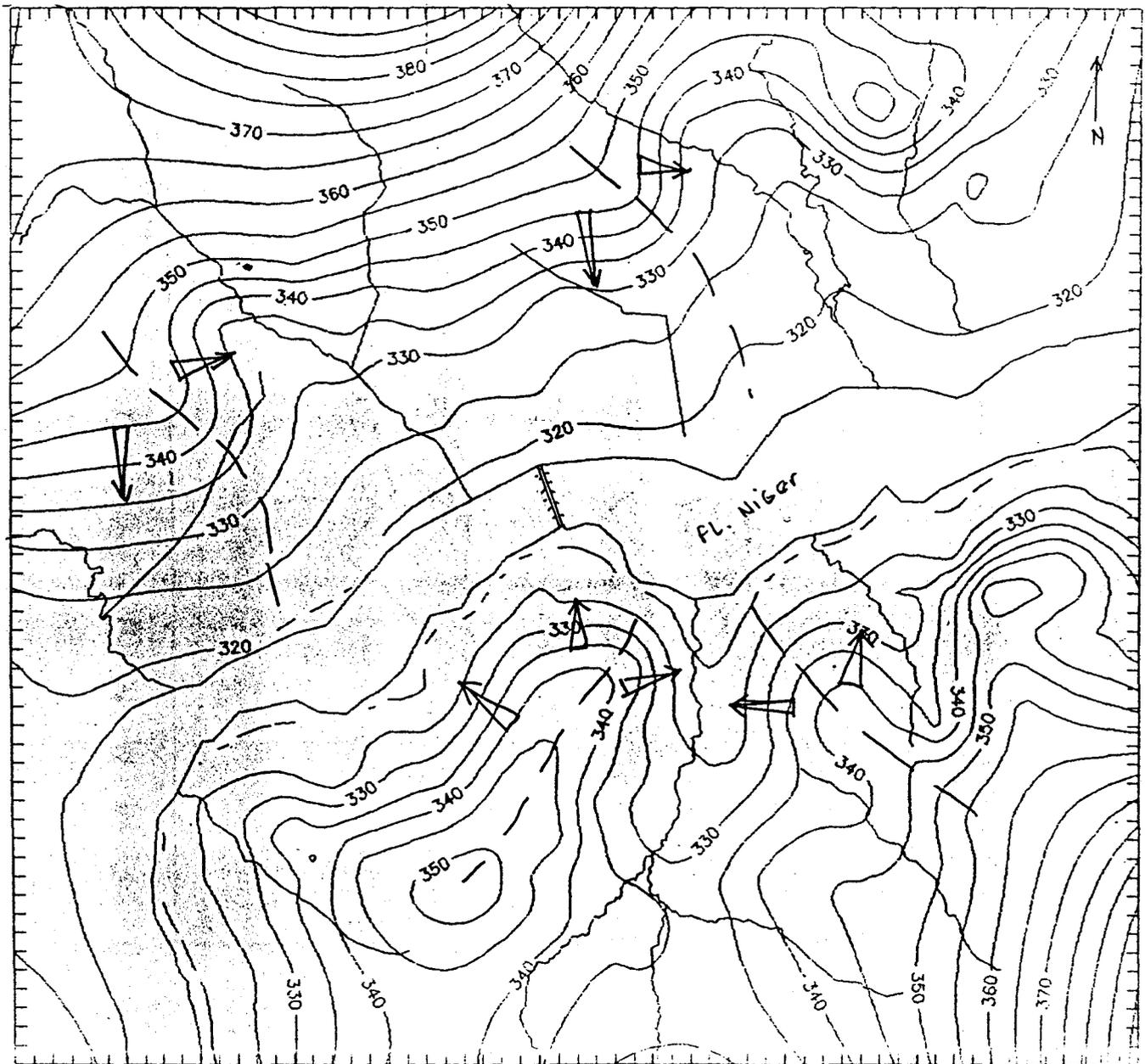


Figure 4.5 Piézométrie de la nappe en septembre 1990 (hautes eaux)



#### 4.4.2- Évolution des niveaux dans les puits témoins (Tableau 4.2)

Quatre puits ont été considérés comme puits témoins et ont été suivis chaque mois, de mars à septembre. Ce sont deux puits en rive gauche 10BB et 1HDL et deux autres en rive droite: kalcra8 et sgnko1. La Figure 4.6 montre les variations piézométriques dans ces puits. Ces variations permettent deux principales remarques:

- on peut remarquer que les puits 10BB et Sgnko1 ont réagi très tôt aux premières pluies à partir de mai;
- d'autres puits (1HDL et Kalcra8) réagissent tardivement à la pluie. On peut remarquer que les montées de niveau ne commencent qu'en juin pour 1HDL et juillet pour Kalcra8.

Ainsi, si l'on sait que les pluies ont commencé à tomber dès le mois d'Avril sur toute l'étendue de la zone d'étude, on peut en conclure que les puits 10BB et Sgnko1 d'une part, et 1HDL et Kalcra8 d'autre part, ne captent pas la même nappe; les seconds (1HDL et Kalcra) captant la nappe la plus profonde. Ceci confirmerait les nombreux résultats de recherches qui disent qu'à Bamako, l'aquifère est constitué d'un système bicouche:

- une nappe superficielle dans les altérités et alluvions du Niger;
- une nappe du substratum gréseux, dans le réseau de fissures des grès.

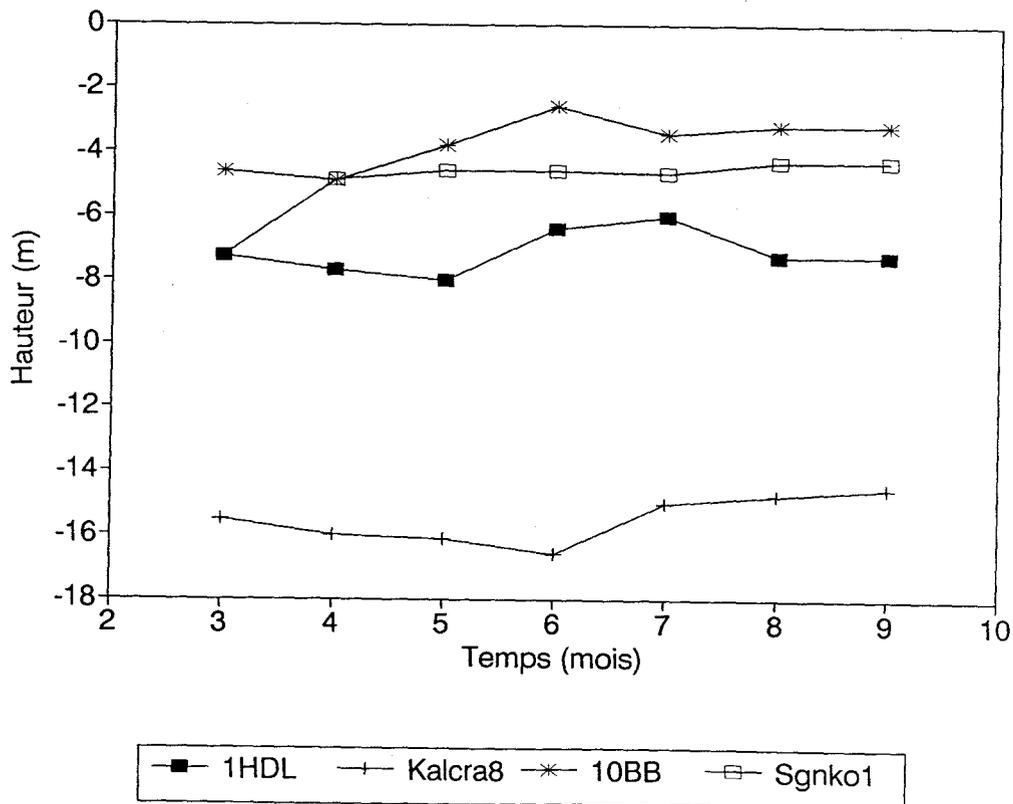
Cette constitution de l'aquifère en bicouche fait qu'il doit exister 2 types de circulation: une circulation suivant le réseau de fissures au sein des grès, et une circulation en milieu poreux pour la nappe superficielle.

Les puits présentent une remontée brusque (10BB, 1HDL, Kalcra8) ou progressive (Sogoniko1) pouvant traduire la mise en évidence des zones de faible porosité et de bonne perméabilité pour les trois premiers, et une zone de bonne porosité pour Sogoniko1.

Nous présentons au Tableau 4.3 et à la Figure 4.7 la comparaison des variations de la piézométrie de la nappe (sur deux puits), du niveau du Niger, et des précipitations mensuelles. Comme on le voit, ces différentes variations sont relativement bien synchrones et donc vraisemblablement interdépendantes.

**Tableau 4.2 Suivi piézométrique dans les puits témoins**

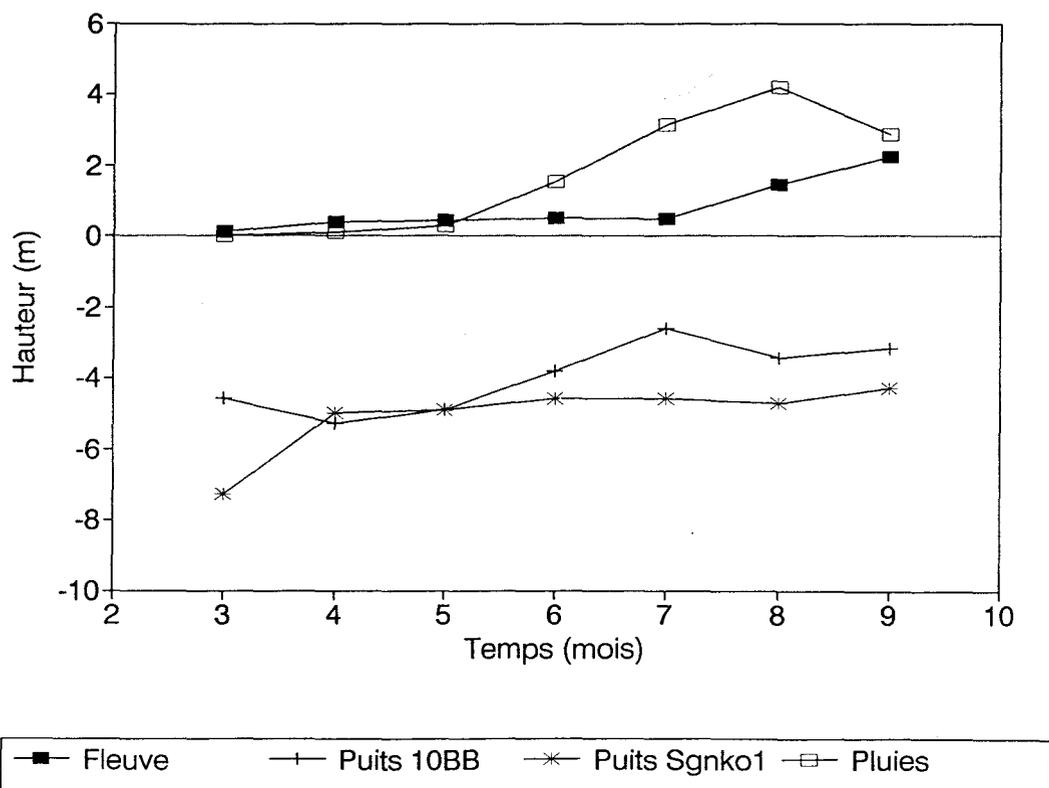
Puits	26/03/90	25/04/90	25/05/90	23/06/90	25/07/90	29/08/90	22/09/90
1HDL	7,28	7,66	7,95	6,42	6,00	7,25	7,27
Kalcra8	15,52	16,00	16,14	16,60	15,00	14,77	14,57
10BB	4,61	5,30	4,91	3,82	2,61	3,45	3,20
Sgnko1	7,28	4,96	4,88	4,60	4,58	4,66	4,31

**Figure 4.6 Suivi piézométrique dans les puits témoins**

**Tableau 4.3 Relation entre piézométrie (nappe), niveau du fleuve et pluies**

	03/89	04/89	05/89	06/89	07/89	08/89	09/89
Fleuve (m)	0,12	0,36	0,44	0,50	0,46	1,46	2,24
10BB (m)	4,61	5,30	4,91	3,82	2,61	3,45	3,20
Sgnko1 (m)	7,28	4,96	4,88	4,60	4,58	4,66	4,31
Pluies (mm)	0,0	8,3	28,6	152,6	314,1	419,8	287,0

(pluies moyennes mensuelles 1950-1988)

**Figure 4.7 Relation entre piézométrie (nappe), niveau du fleuve et pluies**

#### 4.4.3- *Calcul du gradient hydraulique de la nappe*

Le gradient hydraulique peut être calculé à partir des cartes piézométriques et suivant un plan passant par une ligne de courant. Les gradients se répartissent globalement comme indiqué au Tableau 4.4 Ces gradients sont de l'ordre de 1%, valeur moyenne générale des aquifères et des nappes de ce type.

#### 4.4.4- *Zonation de la nappe*

L'examen des cartes piézométriques montre quatre axes perpendiculaires au fleuve. Ces axes correspondent à des lignes de partage des eaux souterraines. Ces lignes, deux sur chaque rive, partagent l'ensemble de la zone d'étude en six sous-bassins hydrogéologiques. Ces sous-bassins se distinguent également par leur gradient hydraulique, qui sont plus forts au centre ( $1,3 \cdot 10^{-2}$  et  $1,8 \cdot 10^{-2}$ ) et faibles à l'Est ( $8,9 \cdot 10^{-3}$  et  $8,8 \cdot 10^{-3}$ ). La zone centrale de fort gradient indique une bonne porosité et une mauvaise perméabilité. La zone orientale indique une bonne perméabilité.

#### 4.4.5- *Influence de l'évapotranspiration*

Cette influence est liée à la distance sol-niveau statique de l'eau. Dans ce cas, on estime que l'évapotranspiration est plus active au bordure du fleuve que dans les autres zones, car les eaux sont moins profondes aux abords du fleuve (profondeur maximale de 8 m) que près des collines (plus de 10 m).

#### 4.4.6- *Zone d'alimentation et de drainage de la nappe*

A Bamako, la zone d'alimentation de l'aquifère est presque totalement occupée et recouverte d'habitations. Cependant, l'infiltration devient possible dans les dépressions et grands espaces à pente quasi-nulle. Il y a aussi une alimentation par apport souterrain à partir des plateaux latéritiques. Ceci se manifeste par des sortes de dômes sur les cartes piézométriques. Les zones d'alimentation se reconnaissent sur les cartes par la divergence des lignes de courant. Le drainage de la nappe se fait par les cours d'eau Bankoni, Diafaranako, Ouoyenko, Sogoniko, Babla et le fleuve Niger. Ce drainage est favorisé par la position géomorphologique de la ville, et se manifeste sur les cartes par une convergence des lignes de courant vers les cours d'eau.

**Tableau 4.3 Gradient hydraulique de la nappe**

	Rive gauche	Rive droite
Centre	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$
Est	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-3}$ à $1 \cdot 10^{-2}$
Ouest	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$
moyenne	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$

#### 4.4.7- Zones de prélèvements

Ce sont les zones habitées. Il est très difficile de calculer les prélèvements de la nappe par la population. Nous pouvons estimer que presque toute la population se sert de la nappe pour une raison ou pour une autre, soit 600,000 personnes. Nous supposons que chaque personne utilise en moyenne par jour 3 seaux, soit 45 litres par jours. En faisant les calculs on trouve un prélèvement moyen journalier sur la nappe de 27.000 m<sup>3</sup>/j ce qui fait un prélèvement mensuel de 810.000 m<sup>3</sup>.

#### 4.4.8- Conclusion

L'étude piézométrique permet de tirer les conclusions suivantes:

- La nappe est hétérogène avec des zones à différentes porosités et de perméabilités.
- L'alimentation de la nappe se fait par infiltration de la pluie, mais aussi par des apports souterrains.
- L'écoulement est principalement dirigé vers le fleuve.
- Le gradient moyen de la nappe est de l'ordre de 1,1% en rive gauche et de 1,3% en rive droite.

### 4.5- HYDROGÉOCHIMIE

L'étude hydrochimique porte sur 103 analyses chimiques des eaux de la nappe phréatique de Bamako. Ces analyses ont été menées au cours de deux campagnes. Une première campagne portant sur 51 analyses effectuées en août 1989 et une seconde en janvier 1990. Ces analyses ont été effectuées au laboratoire des eaux de la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie (DNHE). Elles concernent les éléments majeurs (Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), ainsi que quelques éléments mineurs (Fe, F).

#### 4.5.1- *Caractéristiques physiques*

##### Température

La température des eaux a été mesurée pendant l'échantillonnage. Les valeurs varient de 23,3 °C à 30,50 °C avec une moyenne de 27,2 °C en janvier à l'étiage. Elles sont légèrement inférieures à celles du mois d'août: 27,3°C à 31,8°C. Ce phénomène se comprend facilement quand on sait que la température des eaux

souterraines est liée à des facteurs tel que leur proximité de la surface du sol et les variations saisonnières.

#### Conductivité (Figures 4.8 et 4.9)

La conductivité des eaux analysées varie de quelques 20 micromhos/cm, à plus de 1200 micromhos/cm, ce qui correspond à un résidu sec d'environ 0,04 g/l à plus de 2 g/l, et ce aussi bien en basses eaux qu'en hautes eaux. Sur les cartes d'isoconductivité, on note que les noyaux de concentration en sels dissous correspondent à des zones à forte densité de population, c'est-à-dire aux vieux quartiers (Niarela, Bagadadji, Bamakocoura, Bozola, Ouolofobougou). Cette relation concentration en sels dissous - densité de population apparaît également de façon nette dans les nouvelles zones de peuplement (Bankoni, Daoudabougou).

La forte minéralisation peut s'expliquer par l'infiltration dans la nappe des eaux de pluie ayant solubilisé les déchets domestiques, ou des eaux souillées des latrines et des caniveaux mal entretenus. Il n'est pas exclu qu'en plus de ce facteur très important de densité de population la nature lithologique de l'aquifère influe sur la concentration en sels dissous. La comparaison de ces cartes d'isoconductivité avec la piézométrie montre par contre qu'il n'existe aucune relation nette entre la minéralisation et l'écoulement. Ceci tend à mettre en évidence une pollution de ces eaux. Il est à noter également que les eaux sont beaucoup plus minéralisées en rive gauche qu'en rive droite.

#### pH

Le pH des eaux est généralement acide de 3,7 à 7,9 en août et de 3,8 à 7,1 en janvier. Cette acidité des eaux peut être liée à la lithologie de l'aquifère, les eaux basiques se retrouvant en plaine c'est-à-dire dans les formations à dominance argileuse. Les eaux sont aussi agressives (I.R. >9).

#### Turbidité

La turbidité de l'eau est un facteur très important dans l'étude de la pollution des eaux. Son taux est fixé à 5 unités Jackson de turbidité (UJT) ou 5 unités néphélométriques de turbidité (UNT). En effet, une forte turbidité peut protéger les micro-organismes contre la désinfection et stimuler les bactéries. La turbidité des eaux étudiées varie de 0 UJT à 105 UJT, ce qui rend donc certaines d'entre elles dangereuses pour la consommation.

Figure 4.8 Conductivité électrique de l'eau (hautes eaux 1989)

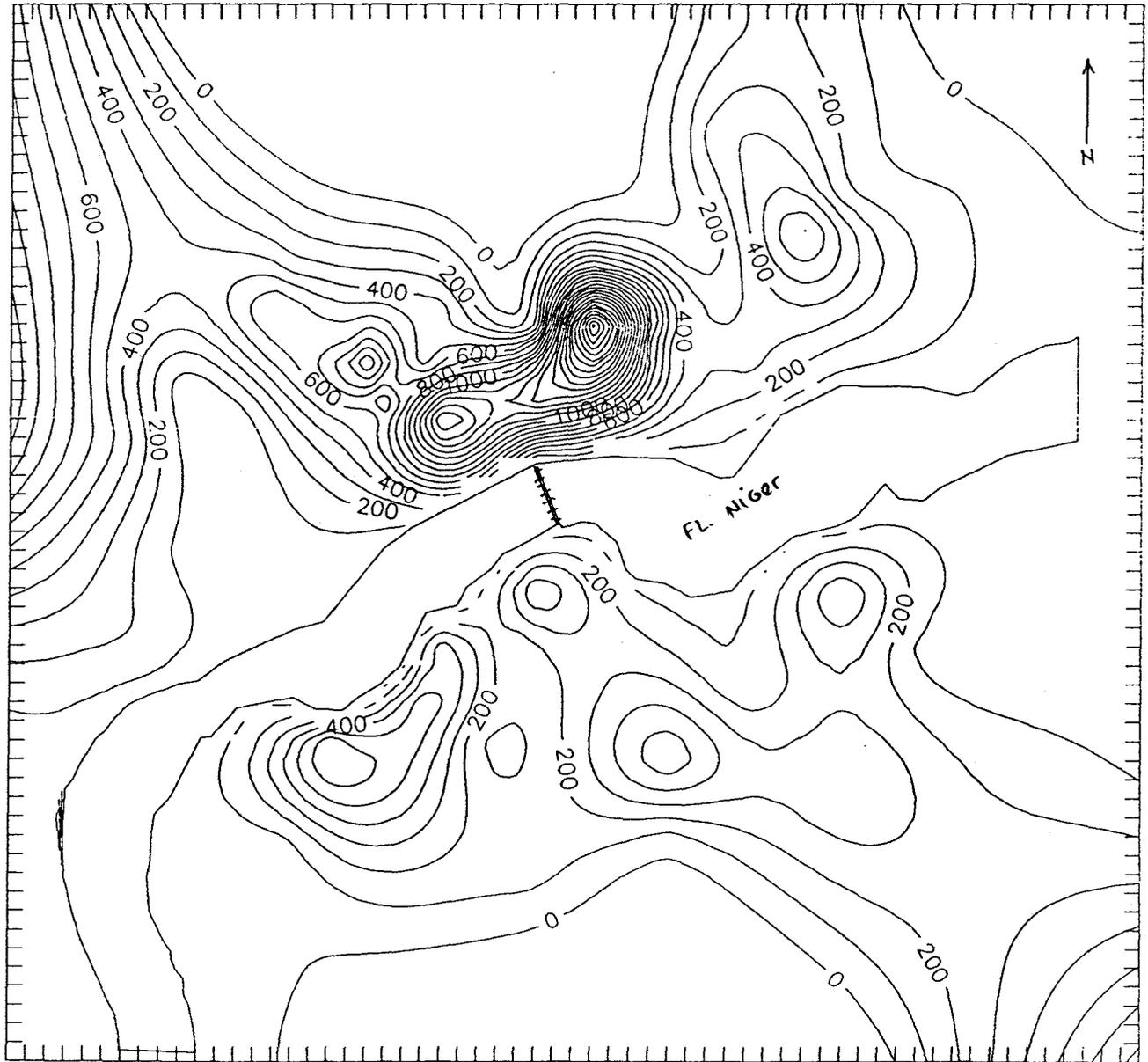
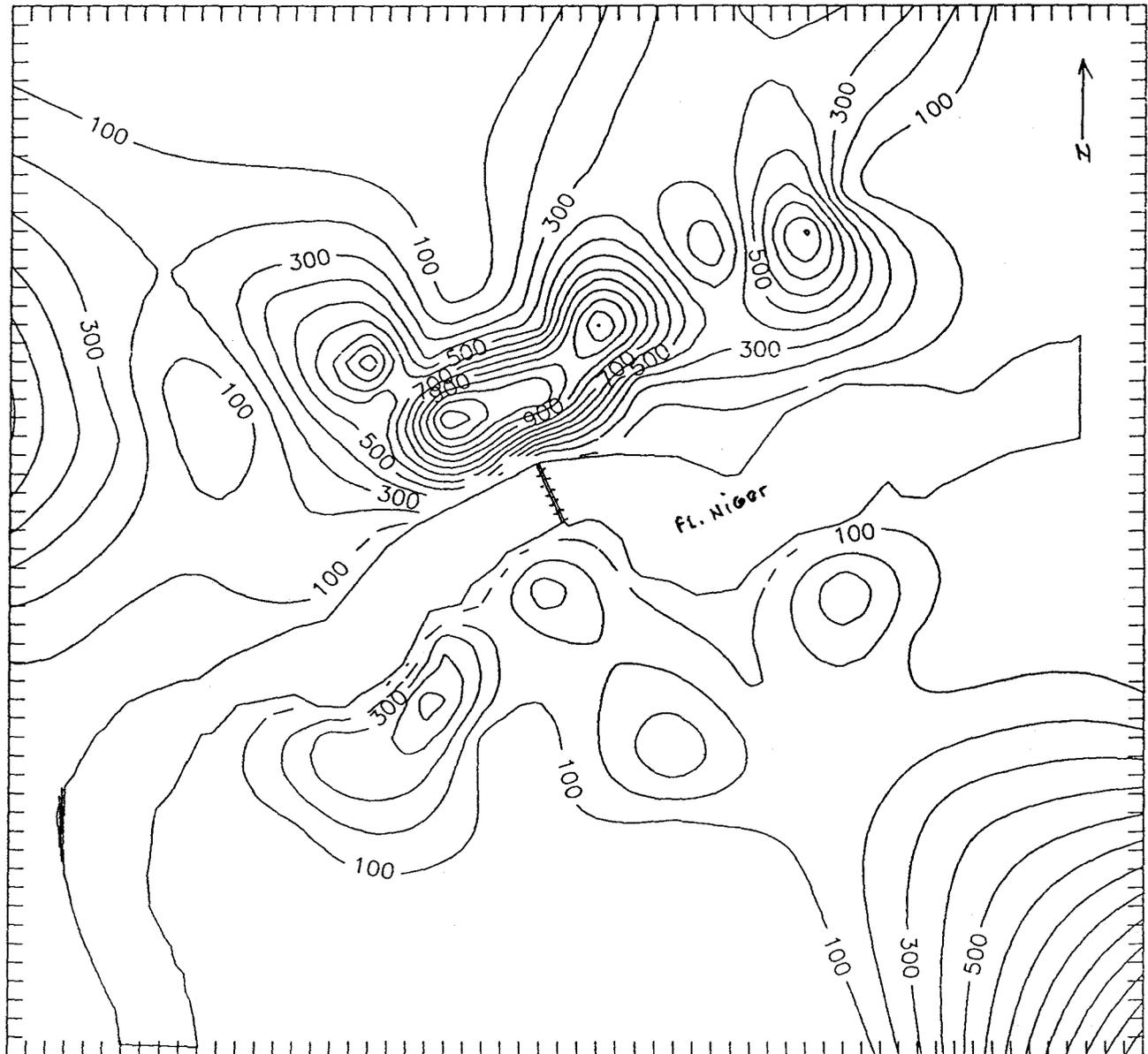


Figure 4.9 Conductivité électrique de l'eau (basses eaux 1990)



#### 4.5.2- *Caractéristiques chimiques*

##### Familles chimiques

Pour comparer les eaux, nous avons représenté les analyses chimiques sous forme de diagrammes triangulaires (de Piper) et semi-logarithmiques (de Schoeller-Berkaloff) (Figures 4.10 à 4.13). Ces représentations permettent de distinguer deux grandes familles chimiques: des eaux bicarbonatées et des eaux chlorurées.

Les eaux bicarbonatées représentent 27% des eaux d'août et 31% de celles de janvier. Elles se caractérisent par la prédominance de l'ion  $\text{HCO}_3^-$  sur les autres ions. Malgré ce caractère commun, les eaux de cette famille ont une composition chimique très hétérogène qui se manifeste au niveau des cations. Ainsi, on y observe des eaux bicarbonatées calciques, magnésiennes et sodiques.

Les eaux chlorurées représentent 73% des eaux d'août et 66% de celles de janvier et se caractérisent par la prédominance de l'ion  $\text{Cl}^-$  sur les autres ions. Ces eaux se répartissent en 3 faciès suivant le cation dominant: eaux chlorurées sodiques, calciques, et magnésiennes. Le faciès chloruré sodique est celui le plus fréquemment rencontré.

##### Minéralisation des eaux

D'après Schoeller (1951), l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines se fait lors de l'infiltration par dissolution et attaque chimique des substances minérales contenues dans le sol et la zone d'altération. Cette première minéralisation dépend d'un certain nombre de facteurs (climat, nature du sol, etc.). Au cours de l'écoulement souterrain, la composition chimique des eaux subit des modifications qui sont fonction de la durée de circulation des conditions de contact et surtout de la nature géologique des terrains traversés. Tout ceci fait que la composition chimique des eaux dépend directement de celle des terrains aquifères.

Dans le cas de la nappe quaternaire de Bamako, la "trace" géochimique des terrains aquifères est beaucoup altérée par la pollution. En effet, avec le matériel lessivé de l'aquifère, la conductivité ne devrait pas dépasser 300 micromhos/cm, soit 0,2 g/l de minéralisation totale. Ceci rend donc difficile l'interprétation.

Figure 4.11 Répartition des eaux de la nappe de Bamako

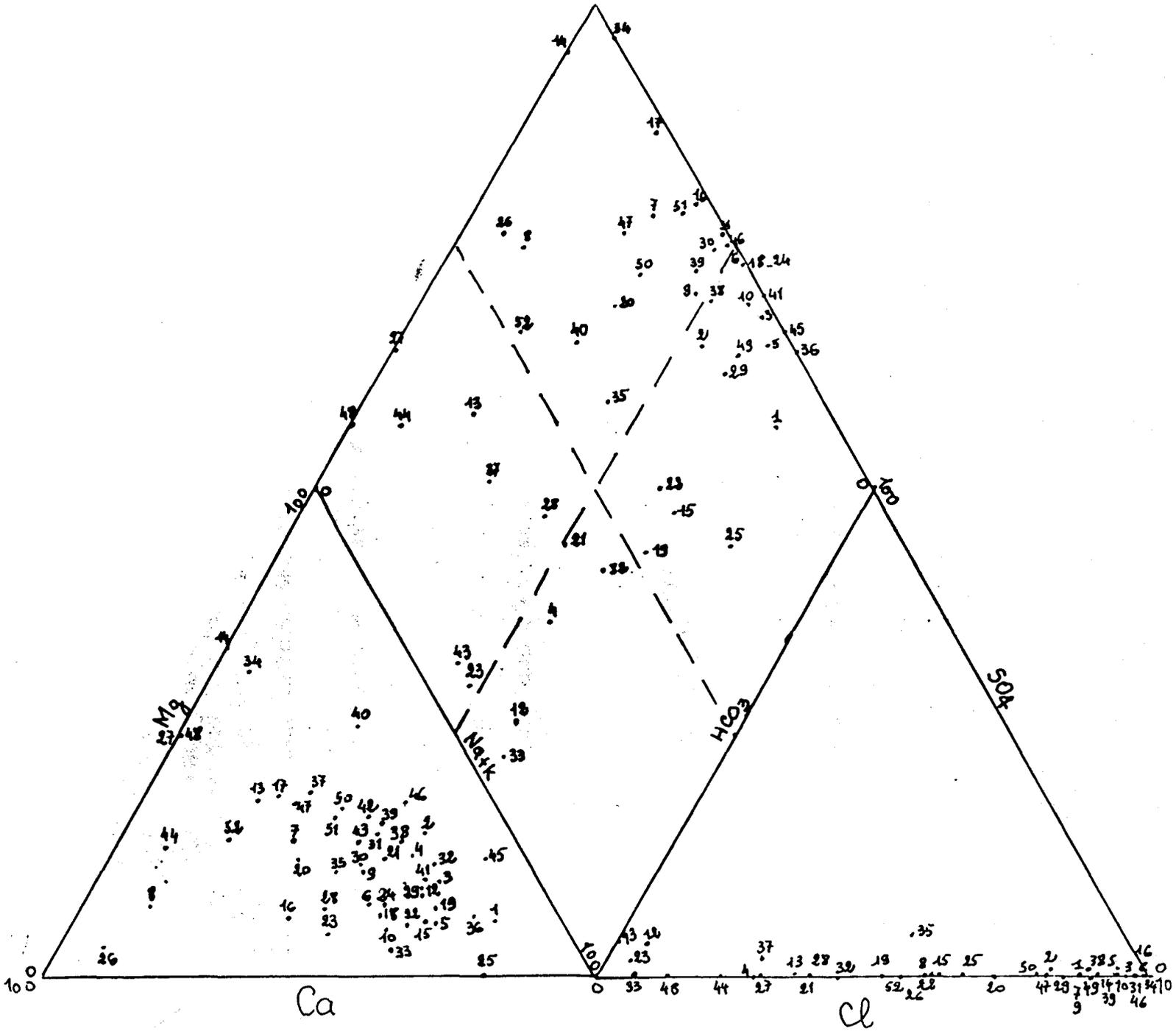
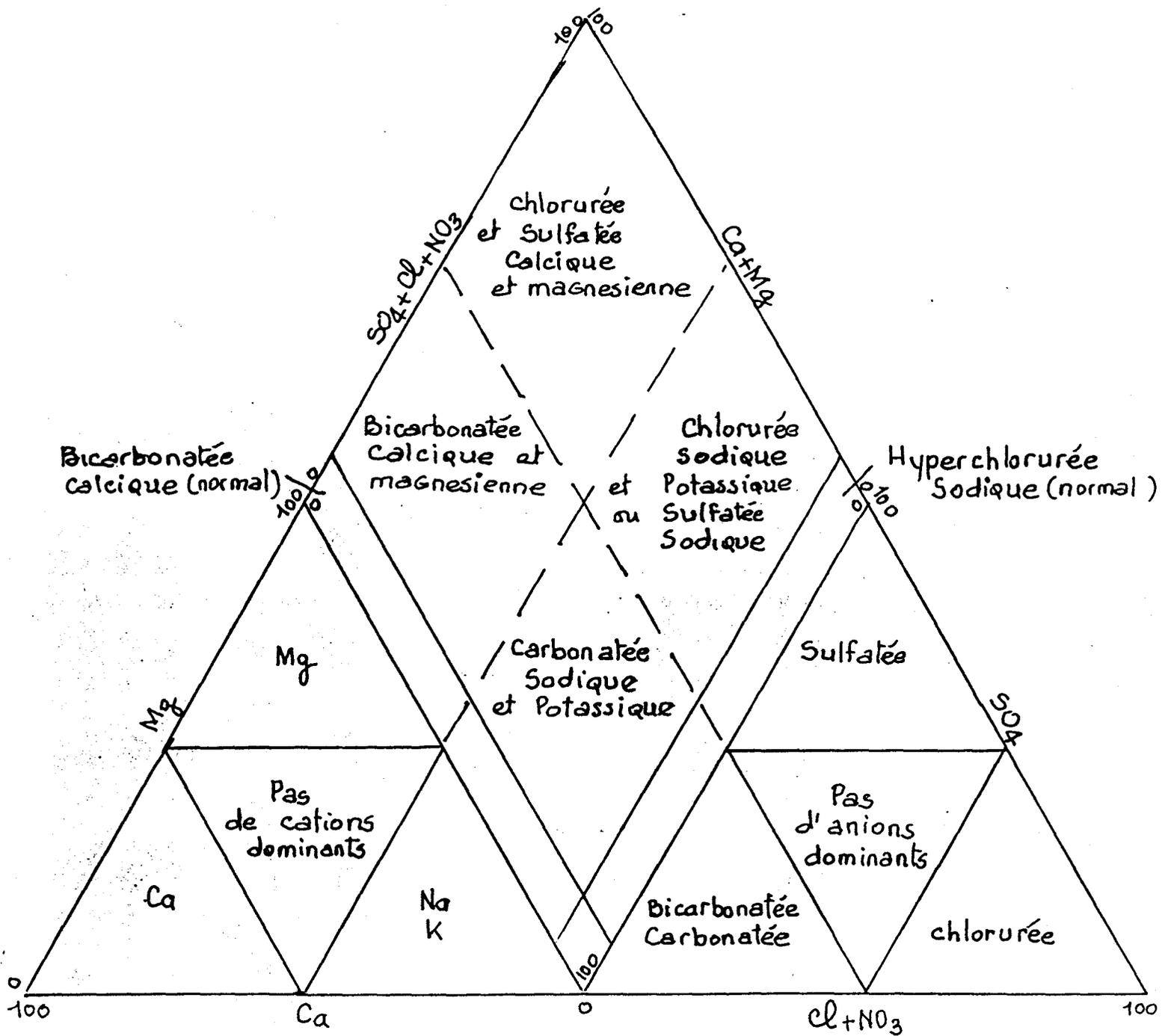


Figure 4.10 Diagramme de Piper de répartition des familles d'eau



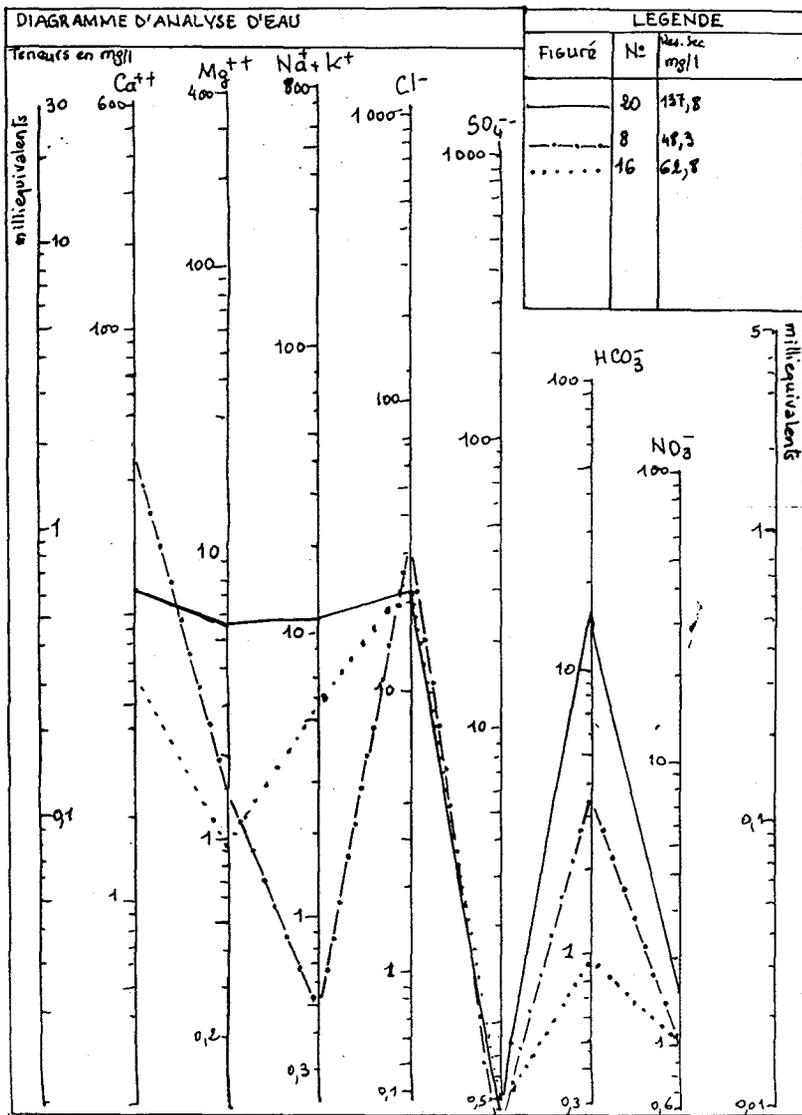


Figure 4.12 Eaux chlorurées calciques

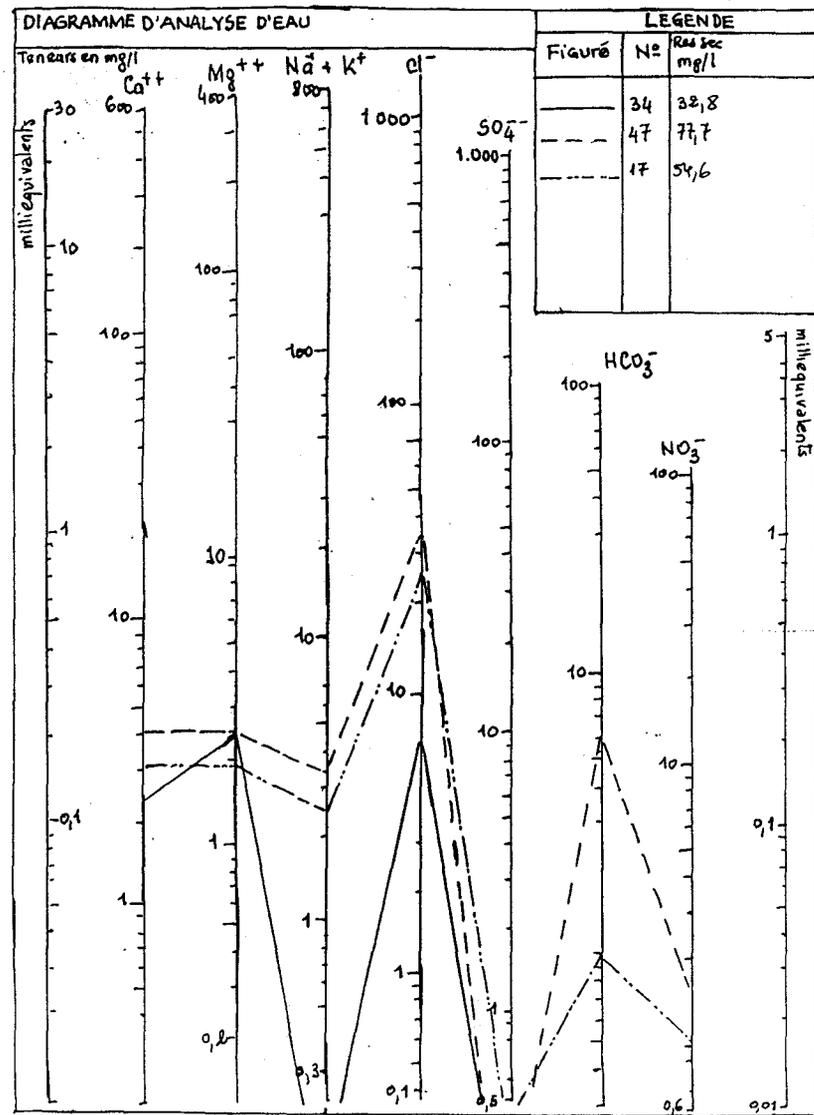


Figure 4.13 Eaux chlorurées magnésiennes

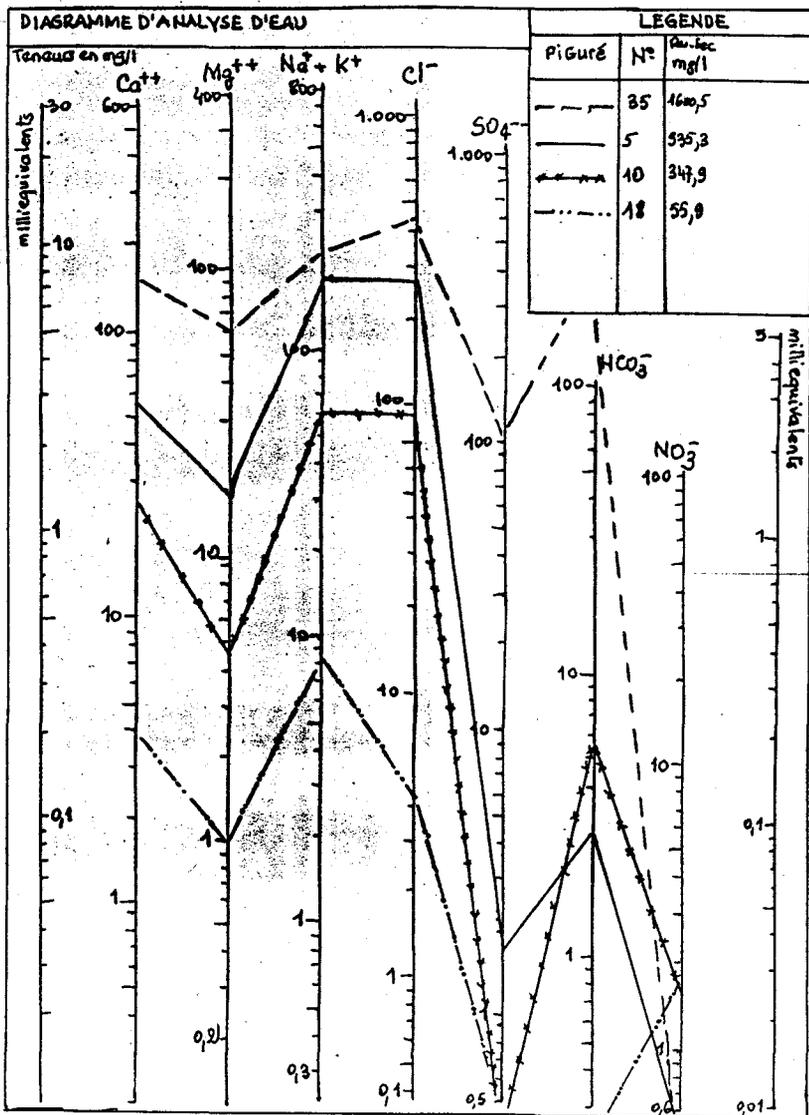


Figure 4.14 Eaux chlorurées sodiques

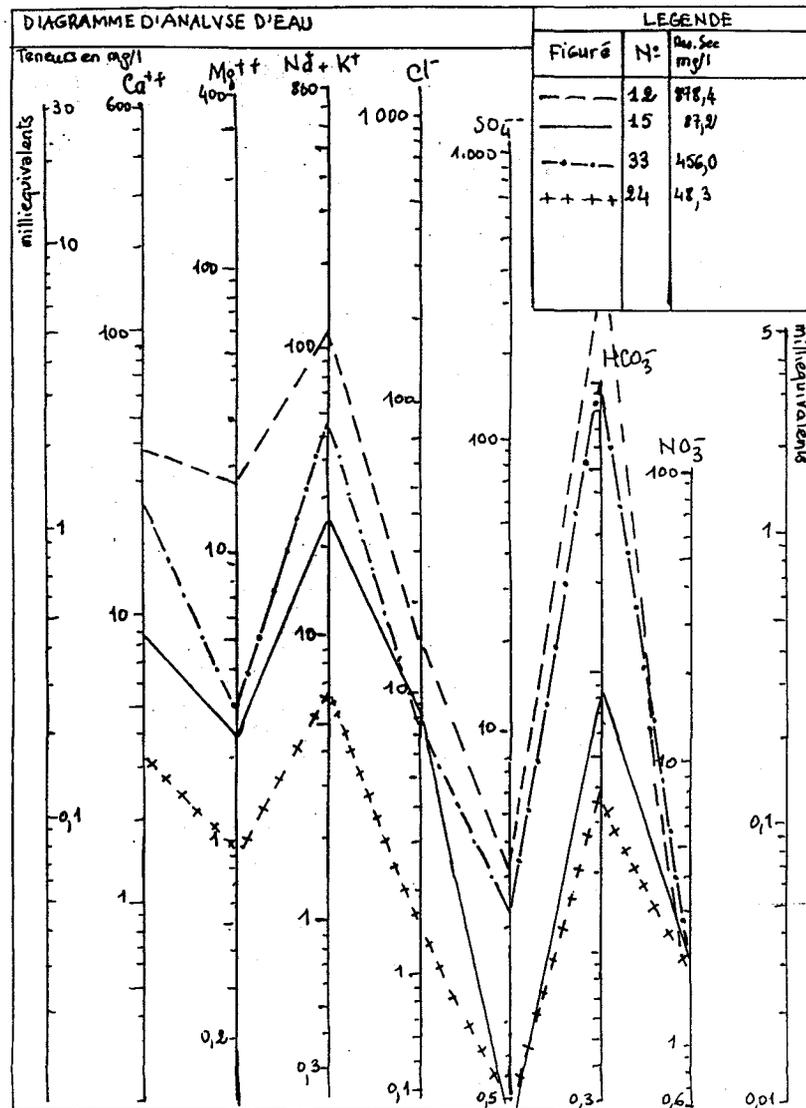


Figure 4.14 Eaux bicarbonatées sodiques

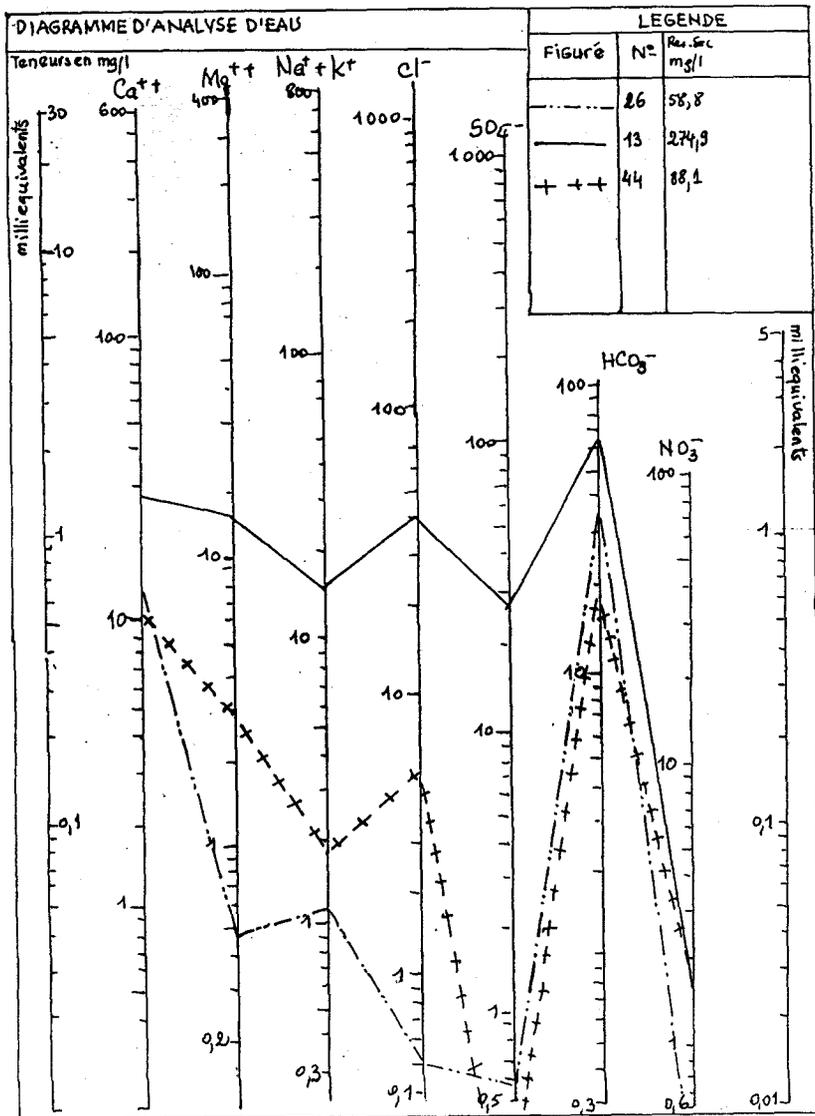


Figure 4.16 Eaux bicarbonatées calciques

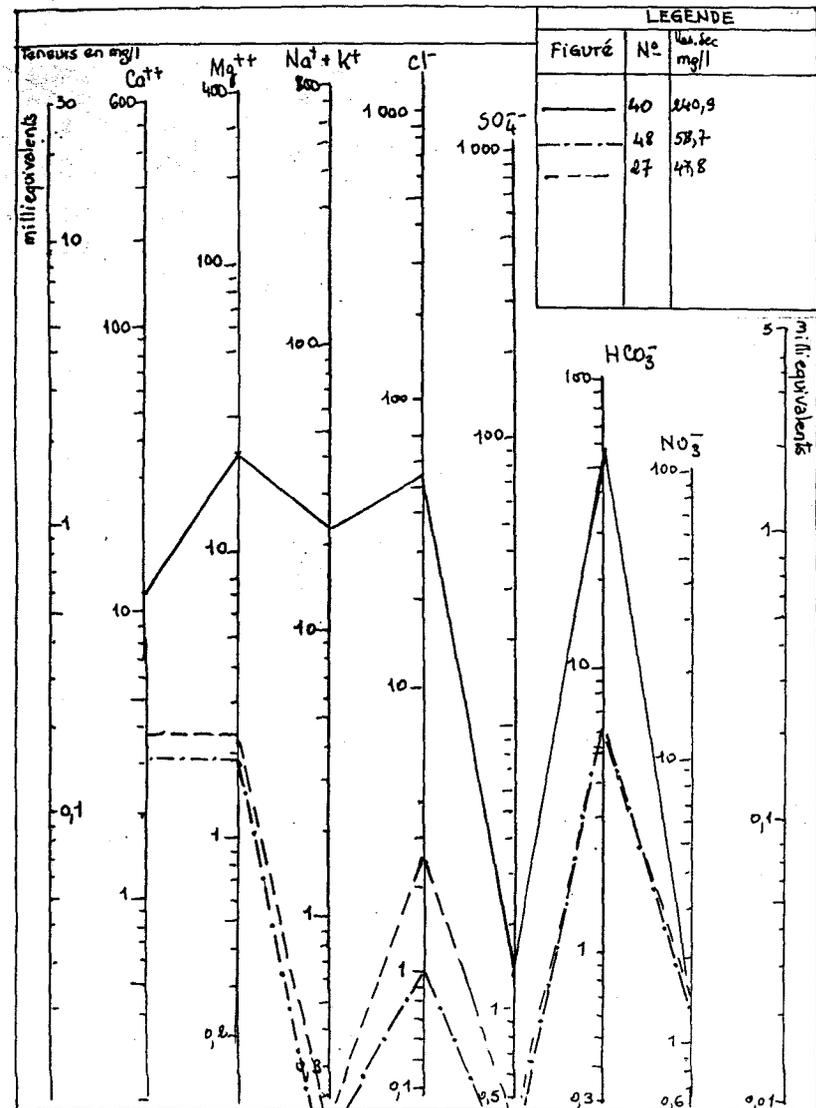


Figure 4.17 Eaux bicarbonatées magnésiennes

### Calcium-Magnésium

Les teneurs en calcium varient de 1,6 à 152 mg/l à l'été et de 0,4 à 105 mg/l en saison des pluies. L'arrivée des eaux d'infiltration correspond donc à une baisse de la teneur en calcium. Les cartes d'égale teneur en calcium montrent que les principaux foyers de concentration sont en rive gauche: Bagadadji, Bozola, Niarela, Bamakocoura. En rive droite, des foyers moins importants s'individualisent à Daoudabougou et Bakodjikoroni. Ce sont les mêmes zones de concentration que l'on rencontre en été et en saison des pluies avec une légère baisse en crue.

Quant au magnésium, les zones de concentration sont les mêmes que celles du calcium. Les teneurs varient de 0,01 à 58,21 mg/l à l'été et de 0,48 à 92,28 mg/l en saison des pluies. Le rapport Ca/Mg est très variable de 0,01 à 10. Il est généralement supérieur à 2 pour les eaux polluées.

### Sodium-Potassium

La concentration du sodium est la plus marquée en rive gauche. Les concentrations varient de 0 à 187,8 mg/l à l'été et de 1 à 350 mg/l en saison des pluies. Le potassium a des teneurs généralement faibles parfois nulles surtout en saison des pluies; le couvert végétal existant à cette période pourrait expliquer ce phénomène. L'indice chloro-alcalin est généralement négatif en bordure des falaises et dans presque tous les puits de la rive droite.

### Bicarbonates

Les concentrations vont de 0 à 559 mg/l à l'été, et de 0 à 621 mg/l en saison des pluies. Ces teneurs s'expliquent probablement par les faibles dissolutions du gaz carbonique au niveau du sol.

### Chlorures (Figures 4.18 et 4.19)

Les principales zones de concentration se situent en rive gauche: Bamakocoura, Niarela, Bagadadji. Les teneurs varient de 0 à 447,5 mg/l à l'été et de 0 à 900 mg/l en saison des pluies. Les fortes concentrations de chlorures sont reliées à la pollution des eaux.

### Sulfates

Les fortes concentrations en sulfate se retrouvent surtout à Bozola, Niarela et Bagadadji aussi bien à l'été qu'en saison des pluies. Les teneurs sont quasi-nulles à tous les autres endroits.

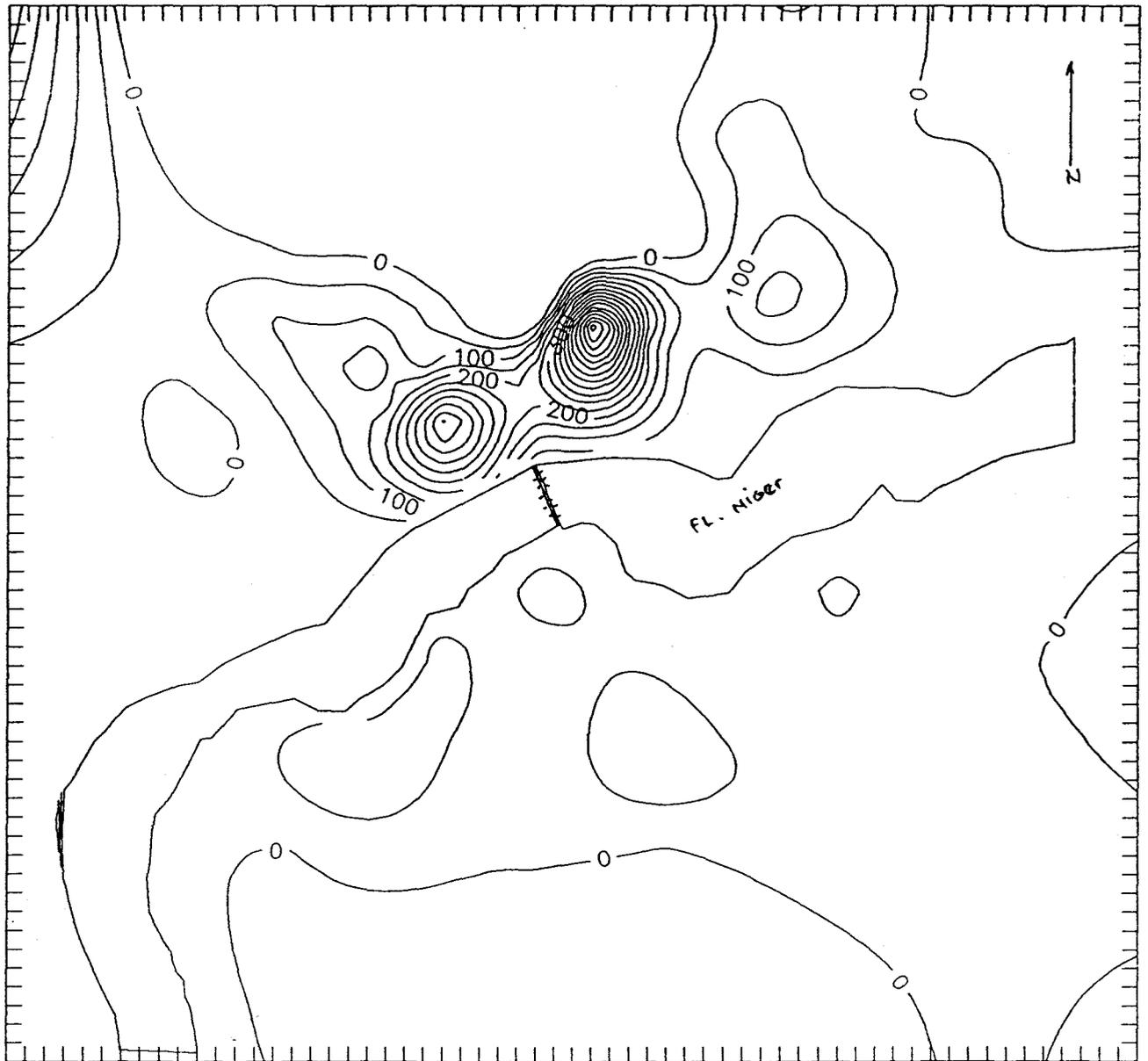
**Figure 4.18 Carte de répartition des chlorures (hautes eaux 1989)**

Figure 4.19 Carte de répartition des chlorures (basses eaux 1990)

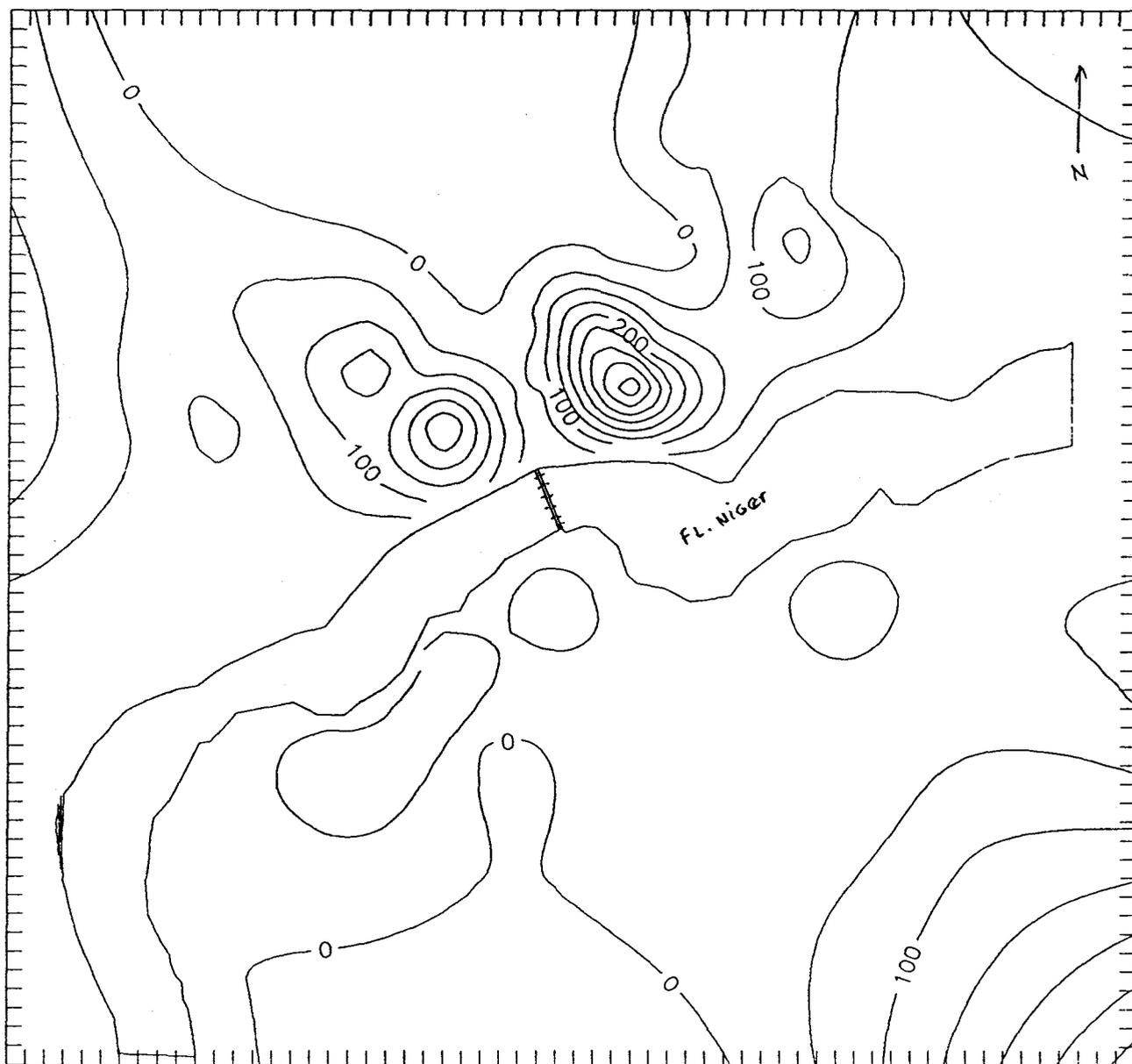
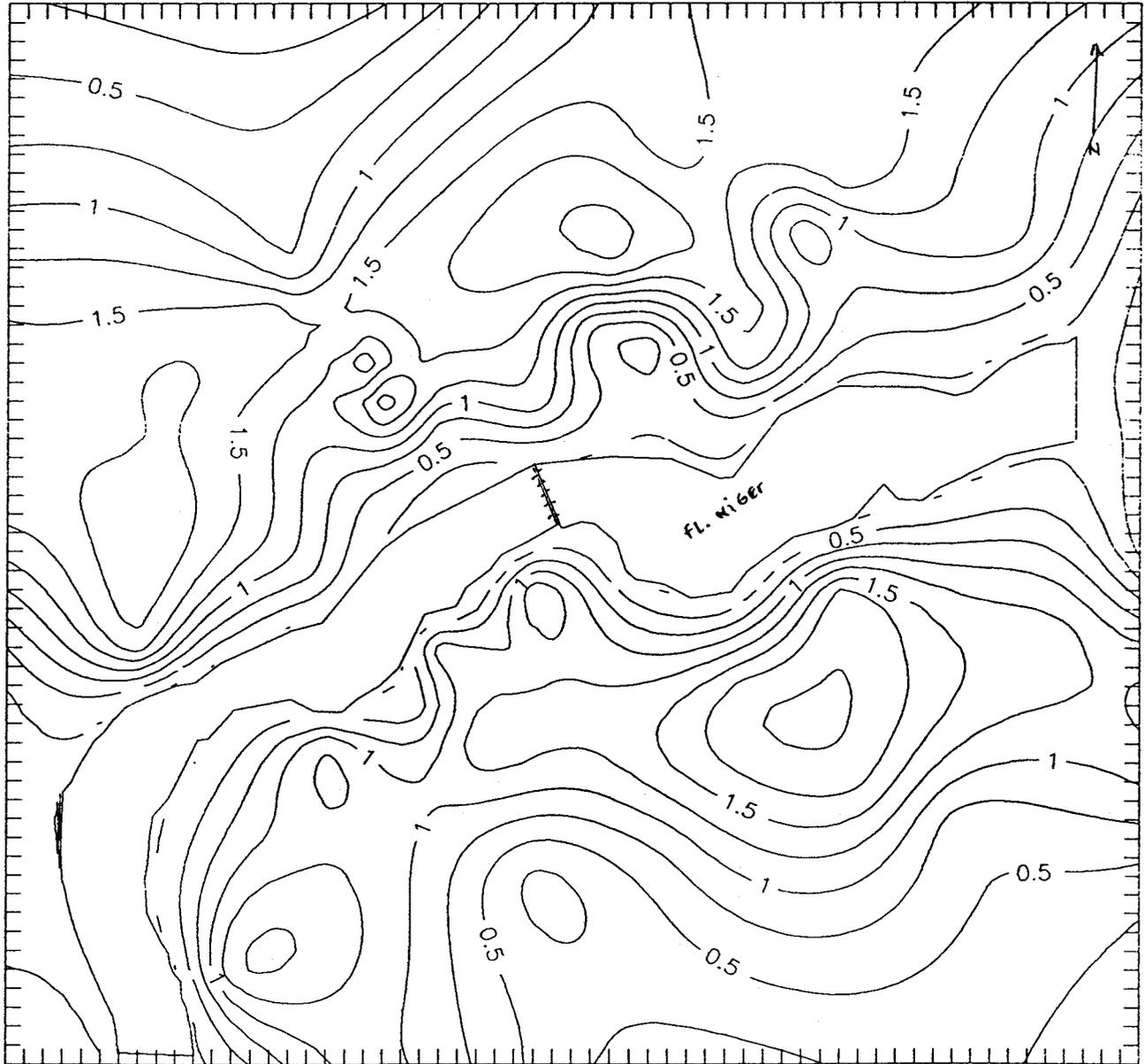


Figure 4.20 Carte de répartition des nitrates (hautes eaux 1989)



**Figure 4.21 Carte de répartition des nitrates (basses eaux 1990)**

### Nitrates (Figures 4.20 et 4.21)

Les concentrations vont de 0,01 à 1,71 mg/l à l'étiage et de 0,1 à 32,3 mg/l en saison des pluies. Les cartes de répartition des nitrates sont très différentes à l'étiage et pendant la crue. A l'étiage, la répartition est plus homogène d'une rive à l'autre et reflète la piézométrie. Par contre en saison des pluies, on note des foyers de concentration en rive gauche essentiellement. Les teneurs en nitrate seront discutées dans le chapitre sur la pollution.

### Fer

Il est omniprésent à l'étiage avec des foyers de concentration à Bozola, Niarela et Bagadadji. En saison des pluies, ce foyer se trouve déplacé vers Hamdallaye. Les teneurs vont de 0,01 mg/l (N'Tominkorobougou) à 1,71 mg/l (Niarela) pendant l'étiage. En saison des pluies les teneurs vont de 0,14 mg/l (Bakodjikoroni et Ouolofobougou) à 38,50 mg/l (Hamdallaye). La présence du fer est liée au pH faible des eaux car, comme le dit Schoeller, le pH faible permet la mise en solution importante du fer; cette mise en solution sera d'autant plus importante que le potentiel d'oxydo-réduction sera faible, comme cela peut se produire lorsque les terrains renferment des matières organiques. Son origine dans les eaux est ici liée à la présence des latérites.

### Fluor

Le fluor a été décelé dans près de 40% des eaux analysées aussi bien à l'étiage qu'en crue. Les foyers de concentrations qu'on rencontre à l'étiage à Bozola, Niarela, Bamakocoura et Djikoroni, disparaissent pendant la saison des pluies. De nouveaux foyers apparaissent: Magnambougou et Daoudabougou. Les teneurs varient de 0 à 7,42 mg/l à la crue et de 0 à 4,3 à l'étiage. Sa présence dans les eaux de Bamako pourrait être liée à l'utilisation d'engrais phosphatés, ou de raticides et insecticides.

### Conclusions

Rappelons que les campagnes menées, l'ont été en août 1989 pour la première, et en janvier 1990 pour la seconde. Ces deux périodes correspondent respectivement aux périodes de crue et d'étiage. Le choix de ces deux périodes est très significatif car: l'eau étant un milieu complexe et changeant, son analyse n'est très souvent que l'expression fugitive des constituants au moment du prélèvement. Il peut être beaucoup plus utile de suivre la variation d'un anion ou d'un cation que l'évaluer à un moment donné. Ainsi, les eaux souterraines ont une teneur en divers éléments relativement constante, mais celle-ci peut changer rapidement lors de la venue d'eau d'infiltration. Une synthèse récapitulative des deux campagnes nous donne les renseignements suivants:

- les eaux sont pour la plus part chlorurées et hydrocarbonatées avec comme cation fréquent le sodium.
- les zones de concentrations élevées sont les quartiers à peuplement ancien pour toutes les périodes.
- les minéralisations totales moyennes sont de 0,3 g/l.
- les concentrations augmentent généralement en saison des pluies.

## **CHAPITRE 5**

### **MODÉLISATION MATHÉMATIQUE DE LA NAPPE DE BAMAKO**

#### **5.1- INTRODUCTION**

L'application de modèles mathématiques et informatiques conceptuels permet d'obtenir des informations pertinentes et une compréhension plus précise de l'hydrodynamique souterraine des aquifères. Ainsi, une modélisation hydrodynamique de la nappe de Bamako a été tentée. Les études géologiques et hydrogéologiques réalisées dans la région de Bamako (Cissé et Singare, 1990; Alkaya et Touré, 1989) en ont constitué les éléments de base.

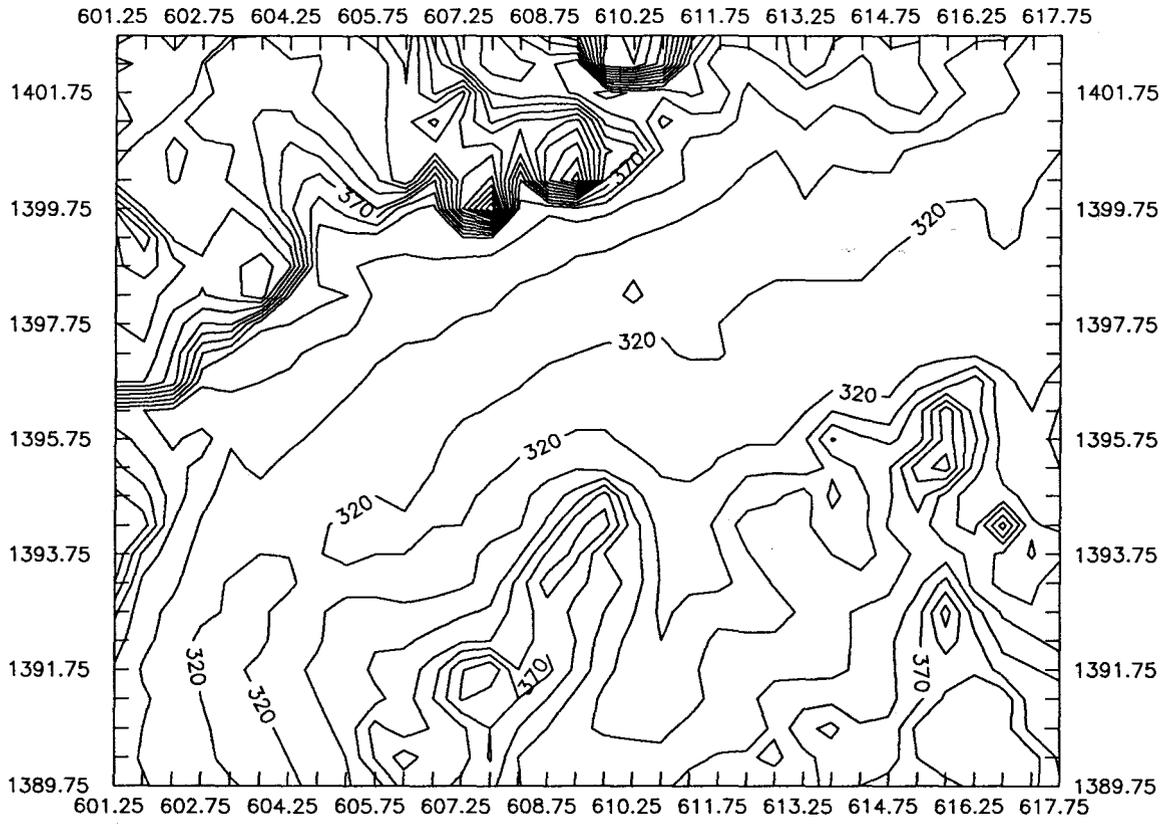
Les études géologiques montrent que la région de Bamako est composée essentiellement de deux formations distinctes: les latérites en surface formant la partie importante de l'aquifère de Bamako, lesquelles reposent sur des formations de grès. Ces derniers sont fissurés sur leur partie supérieure et la partie sous-jacente non fracturée semble constituer une formation imperméable représentant la base ou le substratum de l'aquifère. Le fleuve Niger subdivise la région de Bamako en deux parties: la rive droite au Sud et la rive gauche au Nord.

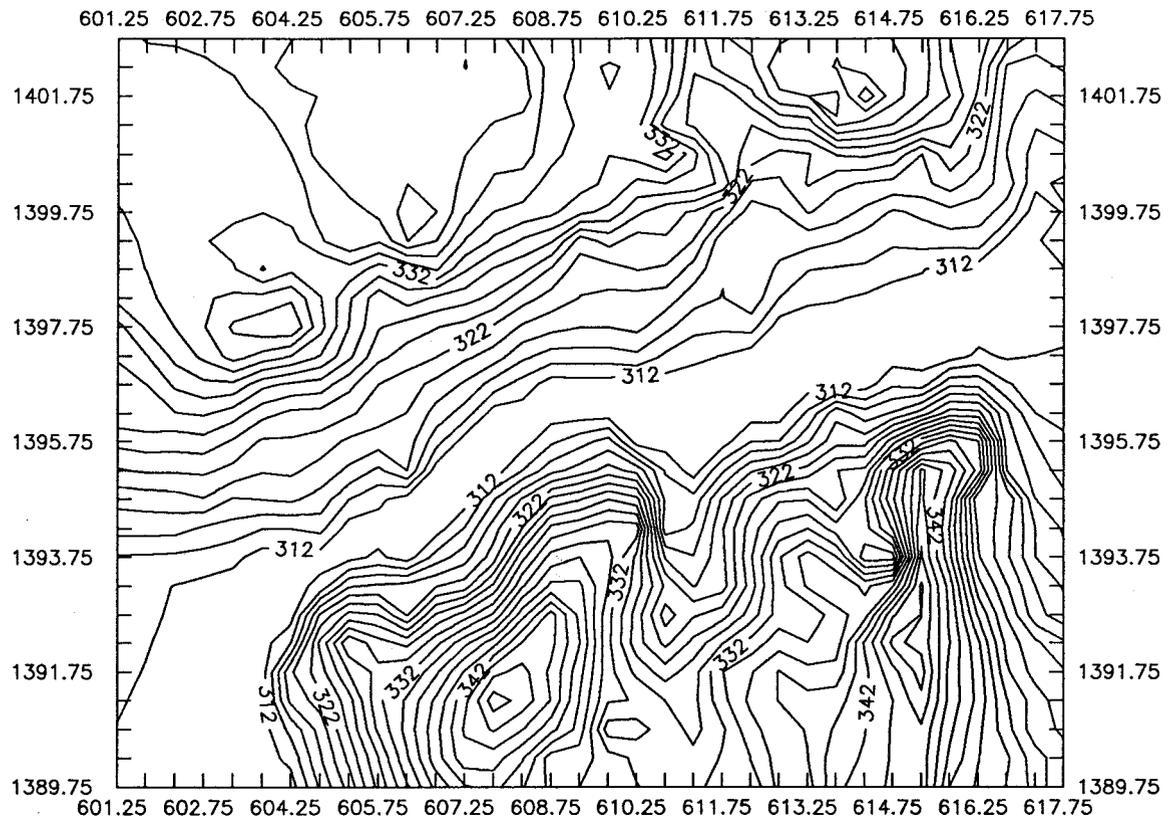
Les composantes et paramètres clés nécessaires pour cette modélisation sont la discrétisation du domaine, la conductivité hydraulique du milieu, l'infiltration nette vers la surface de la nappe phréatique et les conditions aux limites de la partie du domaine étudié.

#### **5.2- DISCRÉTISATION ET TOPOGRAPHIE DU DOMAINE**

Le domaine étudié est délimité sur la carte topographique de Bamako par les repères suivant: 601,0 et 618,0 en longitude et 1389,5 et 1403,0 en latitude. Ce domaine est discrétisé selon un maillage régulier carré de 500 m de côté, composé ainsi d'un ensemble de 27 x 34 mailles. Chacune de ces mailles est caractérisée par ses propriétés physiques et hydrauliques que l'on suppose constantes dans cette maille, mais qui peuvent varier d'une maille à l'autre. Ces propriétés sont des valeurs moyennes attribuées à chaque noeud (centre des mailles).

Figure 5.1 Topographie de la surface du sol



**Figure 5.1 Topographie des grès (base de l'aquifère)**

Par ailleurs, l'information connue sur quelques dizaines de puits en rives droite et gauche permet de caractériser la côte topographique de surface, le niveau statique de l'eau (ou piézométrie) mesuré à différentes périodes de l'année et la profondeur approximative des formations gréseuses. Nous avons déterminé la topographie de surface (Figure 5.1) à partir des courbes de niveau de la carte topographique de Bamako. La topographie du fond de l'aquifère (Figure 5.2) est reconstituée à partir de la topographie de surface et des profondeurs des formations de grès aux points correspondants. Ces calculs sont obtenus à l'aide du logiciel Surfer en utilisant la méthode d'interpolation par krigeage. On remarque que la topographie du fond suit généralement celle de la surface (Figure 5.1 et 5.2). La pente du terrain est faible sur la rive gauche depuis l'affleurement du massif rocheux de grès au Nord jusqu'à la rivière. Au Sud, sur la rive droite, la morphologie du relief est variable.

### 5.3- CALCUL DES CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES

Les conductivités hydrauliques (K) sont obtenues à partir de l'épaisseur saturée (b) de l'aquifère et des transmissivités (T) calculées à partir des essais de pompage réalisés dans 8 puits (Tableau 5.1), suivant la relation  $T = K b$ . Trois de ces essais ont été réalisés en rive gauche et cinq en rive droite. Les essais en rive gauche ont coïncidé avec la saison sèche tandis que ceux de la rive droite ont été faits en saison pluvieuse. Les transmissivités ont été calculées par la formule de Jacob en considérant les courbes de descente et de remontée. Puisque le temps des essais de pompage est généralement court (compris entre 20 et 270 mn) ne laissant pas atteindre un régime d'écoulement permanent, les transmissivités considérées sont celles obtenues avec les courbes de remontée.

### 5.4- CALCUL DU BILAN HYDRIQUE

L'infiltration d'eau dans une nappe phréatique est le résultat du bilan hydrique suivant (Freeze et Cherry, 1979, p. 206):  $I = P - E_{tp} - R$  (avec P la précipitation,  $E_{tp}$  l'évapotranspiration et R le ruissellement). Notons toutefois que, dans le cas de ce projet, le ruissellement n'a pas été mesuré et on suppose, pour des fins de ce travail de modélisation, que cette perte est compensée par les apports d'eau aux limites de la zone étudiée. Le bilan hydrique est calculé en utilisant les données de précipitations et d'évapotranspirations mensuelles moyennes sur plusieurs années (de 1950 à 1989); le résultat est donné au Tableau 5.2.

Tableau 5.1 Valeurs de conductivité hydraulique (K) utilisées

Puits Nom	profond. (m)	Niv. stat. (m)	B (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Temps (mn)	T (m <sup>2</sup> /s)	K (m/s)
Dars1	6.32	2.1	4.22	0.000217	90	3.5E-06	8.29E-07
Korofina	8.7	6.32	2.38	0.000714	20	6E-05	2.52E-05
Dieli	10.44	8.41	2.03	0.000283	210	4E-05	1.97E-05
Sokorodji	5.62	1.99	3.63	0.000154	90	0.0003	8.26E-05
Sogonoko	7.61	5.15	2.46	0.000714	90	4E-05	1.63E-05
Kalacoro	5.62	1.98	3.64	0.000484	270	0.0001	2.75E-05
Faladie	6.75	2.92	3.83	0.001	80	0.0001	2.61E-05
Q. Mali	6.02	3.32	2.7	0.000833		0.0008	0.000296
MOYENNE SUR K							6.18E-05

Tableau 5.2 Bilan hydrique de l'infiltration potentielle

Annee	Jan.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	moyenne
													Juil-Sep
1950	0	0	21	5.7	34	137.4	297.5	361	333.5	66.6	0	0	330.6667
1951	8.8	0	0	4.5	53.4	118.5	172	192.2	280.9	121.9	15.2	0	215.0333
1952	0.7	0	0	10	120	164.6	338.8	200.7	324.1	133.3	0	1.5	287.8667
1953	0	0	22.9	2.6	30	228.5	141	423.7	357.7	50.5	0	2.9	307.4667
1954	0	0	0.6	4.8	90	162.4	304.5	479	259.7	25.1	1.7	0	347.7333
1955	0	0	2.2	0.7	2.8	146.2	237.6	340.6	253.8	57.5	0	0	277.3333
1956	3	3	0.5	2.7	65	153.2	229.3	323.7	144.7	69.8	15.2	0	232.5667
1957	0	0	0	37.8	44	125.9	224.4	415.3	244.2	85.8	6.5	0	294.6333
1958	0	0	0	10.9	81.7	179.3	392.9	405.2	129.2	28.6	44.7	0	309.1
1959	0	0	0	0	74.3	147	163	327.4	183.4	12.3	0	0	224.6
1960	0	0	0	13.7	63.2	131.3	236.5	195.1	185.9	3.7	11	0	205.8333
1961	0.3	0	0	9.8	69.5	79	273.7	351.5	289.9	21.8	0	0	305.0333
1962	0	0	0	92.3	38.3	124.4	268.3	243	223	108.2	17.9	0	244.7667
1963	0	1.7	0	12.9	32	68.8	138.8	242.2	241.8	186.5	0	0	207.6
1964	0	0	0	12.2	45.1	230	216.5	424.1	223.6	0.7	0	24.6	288.0667
1965	0	0	0	0.9	28.4	185.1	218.4	210.6	264.4	51.6	0	0	231.1333
1966	0	0	21.7	0	15.1	173.6	230.9	240.2	502	121.4	3	0	324.3667
1967	0	1.4	3.6	14	115.2	286.4	339.4	364.5	236.8	103.8	34.4	0	313.5667
1968	0	0.4	0	89.9	63.3	124.7	256.4	212.8	122.6	85.8	0.2	0	197.2667
1969	0	0	4.8	2.6	53.8	104.1	236.3	275.5	159.7	128.9	0	0	223.8333
1970	0	0	17.6	3.7	92.9	101.2	261.8	191.8	134.4	45.5	0	0	196
1971	0	4.2	8.3	16.1	13	81.4	296.7	461.5	147.1	6.5	2.9	0	301.7667
1972	0	0	9.3	41.6	34.1	87.1	143	235.7	132.7	44.1	0	0	170.4667
1973	0	0	0	0.2	67.4	45.1	167.6	424.8	144.7	48.6	0	0	245.7
1974	0	0	0	1.2	44.5	125.4	281.8	484.4	294.1	29.5	0	0	353.4333
1975	0	0	4.8	20	27.8	123	200.5	326.1	208.5	60.8	4	0	245.0333
1976	0	0	0	22.2	77.5	85.8	276	184.9	189	295.1	0.2	0	216.6333
1977	2.9	0	0	44.2	51.5	79.8	332.1	236.4	231.5	4.1	0	0	266.6667
1978	0	0	2.8	84.4	62.2	138.9	269.2	191.3	227	65.5	0	0	229.1667
1979	0	0	0	0	55.1	213.4	189.4	271.1	185.6	50.1	46.8	0	215.3667
1980	1.6	0	0	19.3	74.4	97	149	307	213.3	60.3	0.5	0	223.1
1981	0	0	0	0.8	93.5	54.3	145.6	231	155.6	109.4	0	0	177.4
1982	0	0	0	46.4	92.7	105.4	180.6	271.1	199.9	64.7	0	0	217.2
1983	0	0	0	11.7	46.5	114.3	17.9	265.1	176	1.1	0	0	153
1984	0	0	0	36.6	117.4	50.8	165.8	193.2	152.1	81.3	0	0	170.3667
1985	0	0	0	36.6	20	163.8	257.1	273	156.7	6.3	0	0	228.9333
1986	0	0	0	17.2	37.6	129.9	178.4	203.8	201.7	9	0	0	194.6333
1987	0	0	0	0	22.8	133.7	260.6	307.6	165.7	95.5	0	0	244.6333
1988	0	0	0	8.3	28.6	152.6	314.1	419.8	287	39.8	3.5	0	340.3
1989	0	0	0	0	8	136	174	380	66	118	0	0	206.6667
Pm	0.4325	0.2675	3.0025	18.4625	54.665	132.2325	229.435	302.1975	215.7375	67.475	5.1925	0.725	249.1233
ETP	165	183	205	185	161	158	152	152	155	142	136	139	153
Pm-ETP	-164.568	-182.733	-201.998	-166.538	-106.335	-25.7675	77.435	150.1975	60.7375	-74.525	-130.808	-138.275	96.12333

Le bilan hydrique net est positif uniquement pour les mois les plus pluvieux, à savoir les mois de juillet, août et septembre. L'évapotranspiration est plus grande dans les autres mois de l'année. Le flux moyen net d'infiltration est donc de 96 mm/an. La nappe de Bamako est drainée par le fleuve Niger et on suppose que sa recharge (ou alimentation) se fait essentiellement par les apports des précipitations. De ce fait, toute la partie du domaine étudié à l'exception du fleuve, constitue la surface de recharge de la nappe et par conséquent du modèle de calcul des charges hydrauliques. Par ailleurs, pendant la période des pluies, une partie de Bamako est inondée.

### 5.5- CONDITIONS AUX LIMITES

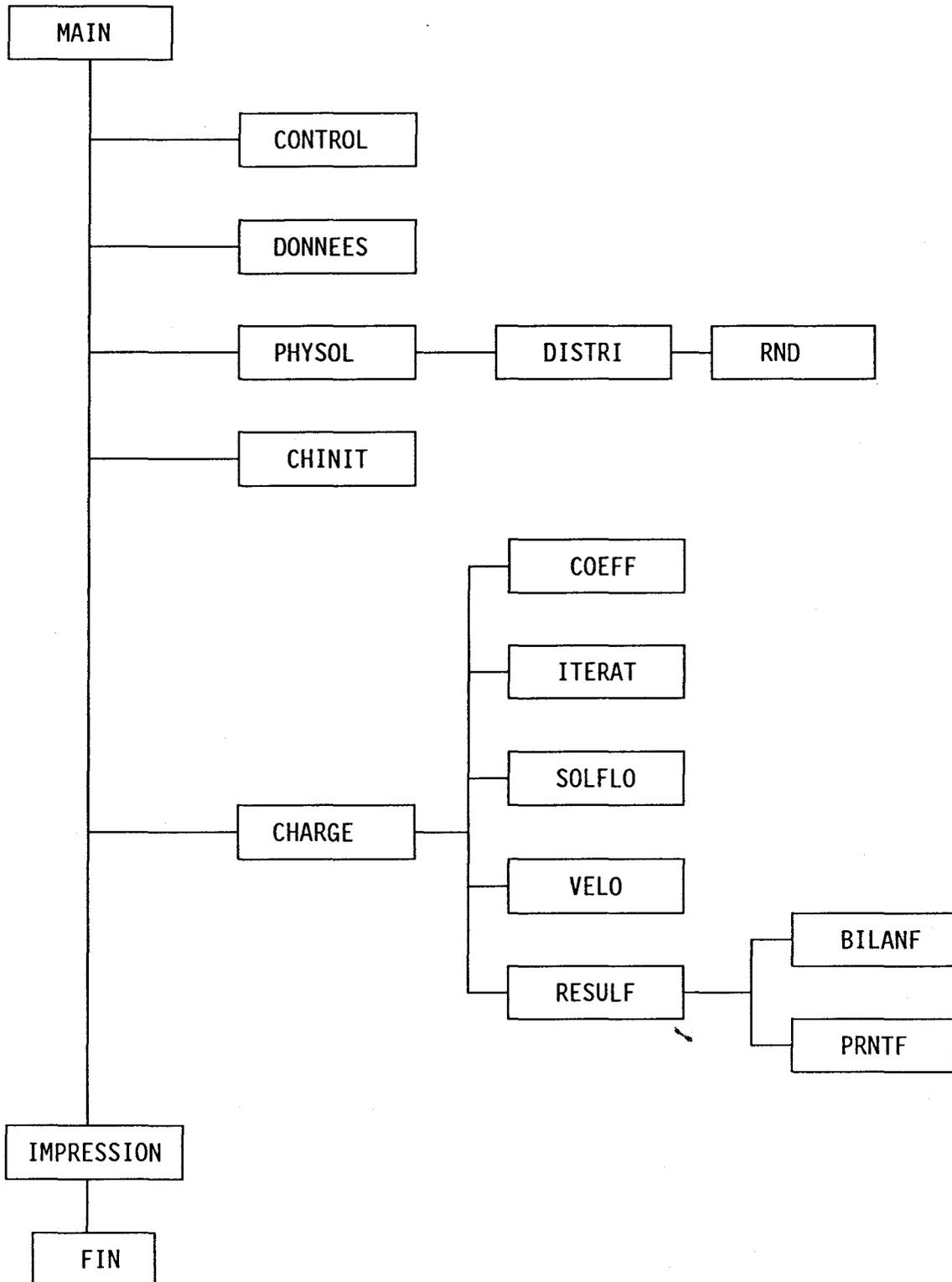
Les conditions aux limites du domaine d'étude sont de deux sortes: des charges constantes (condition de Dirichlet) au niveau du fleuve, et des flux imposés de deux types (condition de Neumann), soit des flux nuls (limite imperméable) sur les frontières Sud, Est et Ouest du domaine correspondant généralement aux crêtes de partage des eaux, soit des flux constants (limite perméable) ou nuls au niveau du massif gréseux au Nord. Les limites imperméables sont facilement introduites dans le modèle d'écoulement en imposant des perméabilités nulles aux noeuds hors domaine et en calculant les transmissivités aux frontières en utilisant la relation de la moyenne harmonique (Reisenauer *et al.* 1982; Appel, 1976; Trescott, 1975).

Les données précédentes constituent les données d'entrée du modèle d'écoulement tel que décrit dans le paragraphe de modélisation suivant.

### 5.6- MODÉLISATION

Le programme d'écoulement utilisé est écrit en FORTRAN 77. Il utilise une technique itérative SIP (Strongly Implicit Procedure: algorithme emprunté à Stone 1968 et Weinstein *et al.* 1969) pour la résolution du système d'équations algébriques de différences finies (approximation de l'équation différentielle usuelle de l'écoulement dans un milieu poreux hétérogène et anisotrope). Il a été montré que cette technique SIP est d'une performance supérieure, du point de vue du temps de calcul et de la vitesse de convergence, sur la plupart des autres techniques itératives (relaxation, surrelaxation successive et direction alternative implicite). Ainsi, elle est largement utilisée en programmation en différences finies (Trescott et Larson, 1977, MacDonald et Harbaugh, 1984, Azevedo *et al.*, 1988).

Figure 5.3 Organigramme du modèle d'écoulement



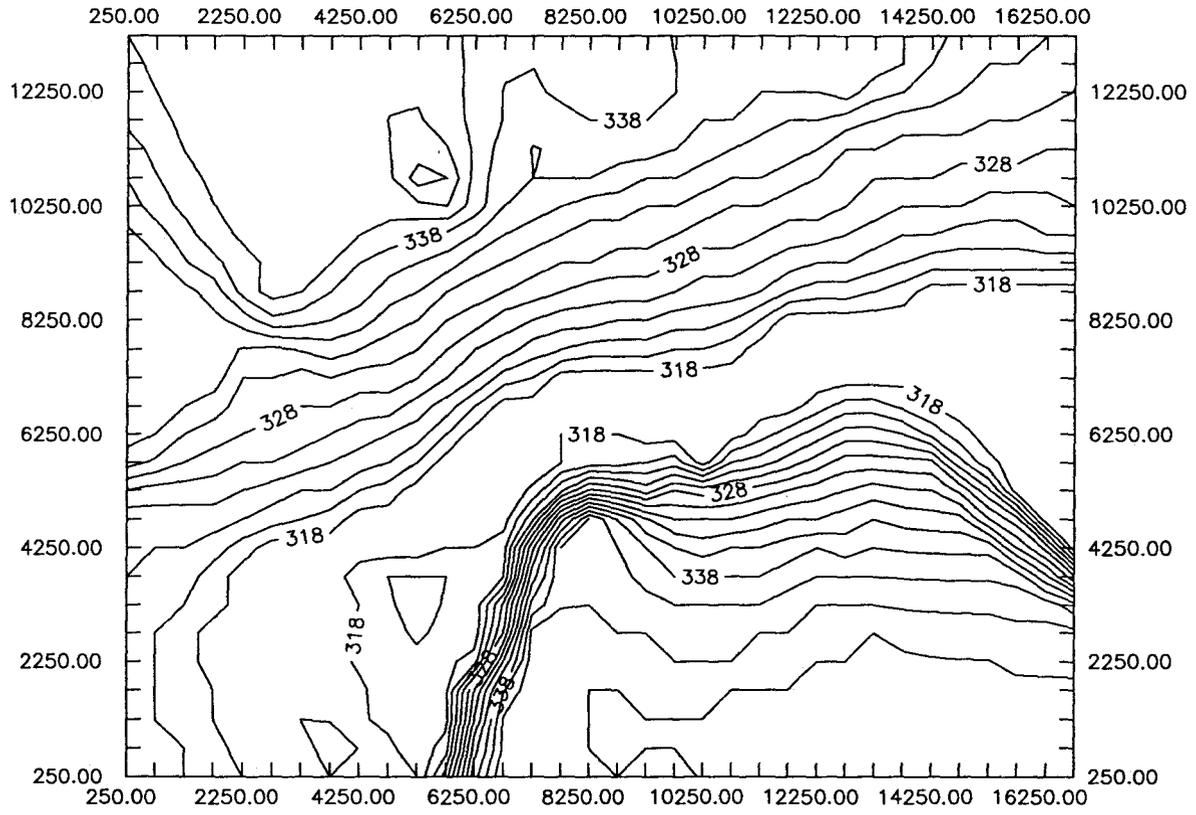
Le modèle est bidimensionnel horizontal, utilise une discrétisation spatiale variable et s'opère en régime d'écoulement permanent. Ce programme calcule une distribution des charges hydrauliques et des vitesses dans le domaine étudié. Différentes conditions aux limites peuvent être envisagées et une géométrie plus ou moins régulière de la forme des frontières du domaine peut être approchée. Il tient également compte des sources de pompage et d'injection. L'organigramme du programme est donné à la Figure 5.3.

L'utilisation de ce modèle d'écoulement permet de calculer la distribution des charges hydrauliques dans le domaine simulé. Le calage du modèle doit être effectué pour un régime permanent. Deux périodes annuelles de simulation de la charge peuvent être considérées, à savoir les périodes de hautes eaux et de basses eaux. Ceci permet particulièrement de représenter le comportement hydraulique de l'aquifère en périodes humide et sèche. Cependant, comme le bilan hydrique net est négatif en période de basses eaux (Tableau 5.2), les simulations réalisées ont porté uniquement sur la période de hautes eaux c'est-à-dire les mois de juillet à septembre. D'autre part, la distinction des contrastes des hétérogénéités entre les latérites à perméabilité granulaire et la partie supérieure des grès fracturés à perméabilité de fissure ne peut être fait dans un modèle bidimensionnel d'écoulement horizontal. Ce modèle ne considère donc qu'un aquifère mono-couche représenté par une seule valeur de perméabilité moyenne.

## 5.7- RÉSULTATS ET DISCUSSION

La considération des limites imperméables sur les frontières du domaine et l'utilisation des valeurs mesurées ou calculées des paramètres précédents, montrent que la distribution des charges hydrauliques calculées par le modèle (Figure 5.4) est largement différente de celle déterminée à partir des mesures des piézométries.

Il est très probable voire évident que les valeurs des paramètres de conductivité hydraulique et d'infiltration sont incertaines. Plusieurs sources d'erreurs peuvent se manifester à ce propos: hétérogénéité de l'aquifère non déterminée, épaisseur incertaine de celui-ci, limites des profondeurs des latérites et des grès fissurés inconnues, erreurs de manipulation et de mesurage, courte durée de pompage entraînant l'absence d'établissement d'un régime permanent, absence de mesures du ruissellement, erreurs sur le flux hydrique net de recharge de la nappe, etc...

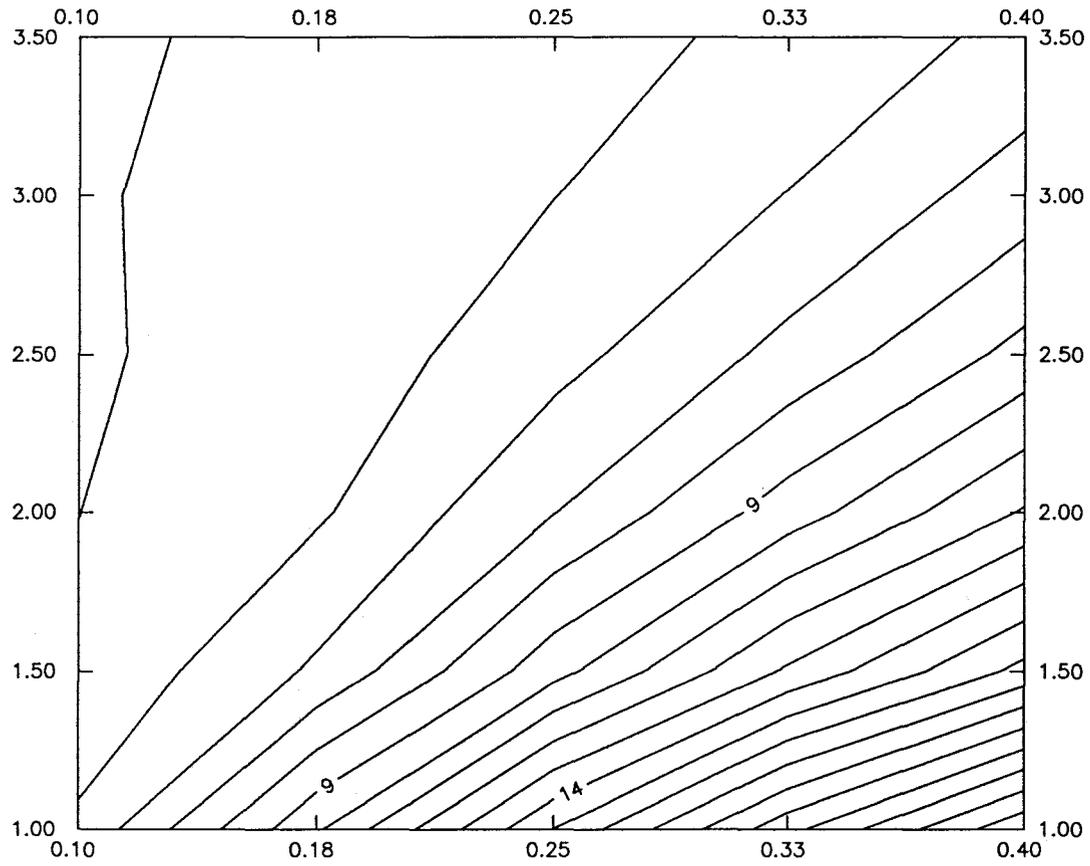
**Figure 5.4 Charges hydrauliques calculées par le modèle (piézométrie)**

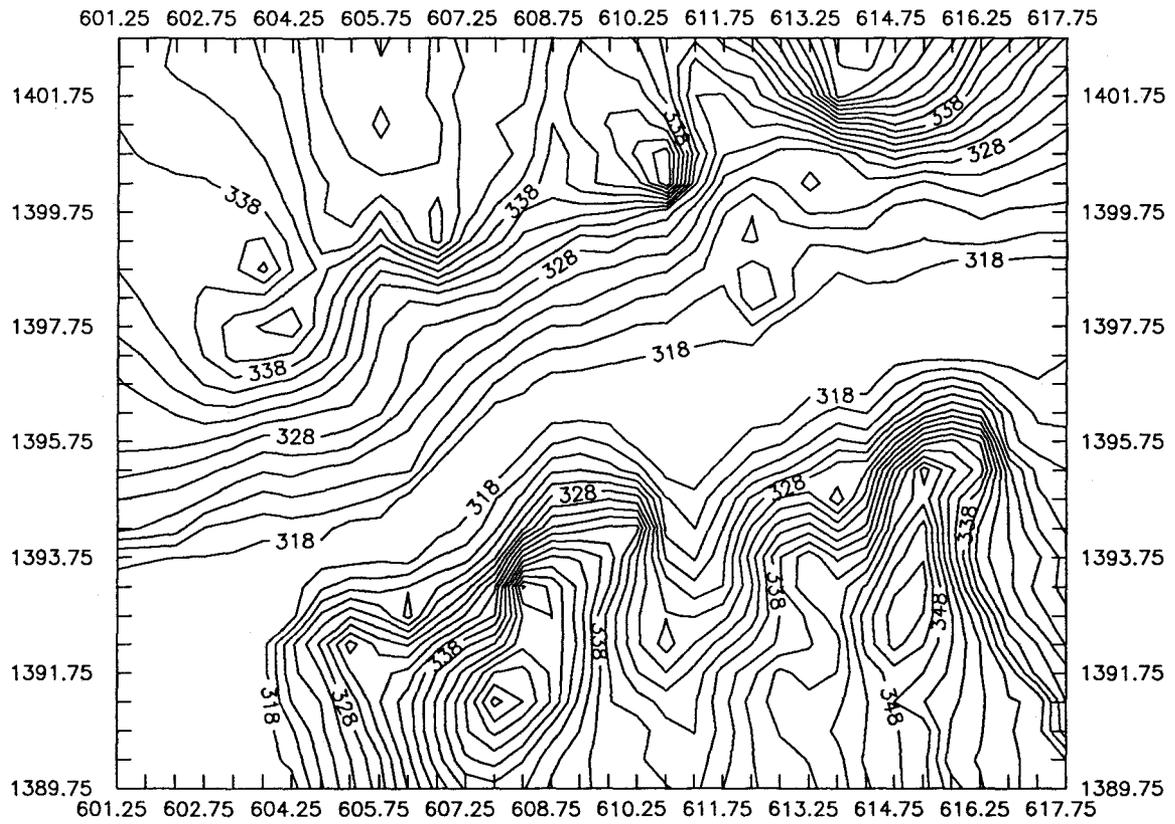
Néanmoins, les charges piézométriques mesurées dans les puits à différentes périodes de l'année sont les données les moins affectées par ces sources d'erreurs. Dans ce cas, ces données constituent l'information de base de calibration du modèle. Vu l'existence des incertitudes sur certaines données d'entrée du modèle, une étude de sensibilité a été effectuée pour estimer, par essais-erreurs (selon le schéma de Neuman, 1973, tel que présenté par Freeze et Cherry, 1979, p. 358), les paramètres optimaux qui donnent des résultats de charges hydrauliques qui corroborent avec les piézométries mesurées. Cette méthode consiste à faire varier un paramètre à la fois et à minimiser les écarts entre les valeurs des charges calculées et mesurées. Les paramètres considérés dans cette analyse de sensibilité sont: la conductivité hydraulique  $K$  (valeur moyenne calculée est égale à  $6.27 \cdot 10^{-5}$  m/s) et l'infiltration  $P$  (valeur moyenne calculée est égale à  $1.21 \cdot 10^{-8}$  m). La fourchette de valeurs de ces paramètres  $K$  et  $P$  est comprise respectivement entre 1 et 3,5 fois la valeur de la conductivité hydraulique moyenne calculée et entre 0,1 et 0,5 fois la valeur de l'infiltration moyenne calculée.

En supposant que les comportements hydrogéologiques des rives droite et gauche sont différents, deux autres cas de simulation peuvent être distingués: des simulations portant sur la rive droite et d'autres sur la rive gauche. 15 points de contrôle de la charge sur la rive gauche et 13 points sur la rive droite sont considérés. Ces points correspondent aux noeuds du maillage du modèle qui coïncident avec des puits ou aux noeuds les plus proches des puits se trouvant dans une maille. Les charges aux noeuds qui ne coïncident pas avec des puits sont obtenues à partir de la distribution des charges piézométriques mesurées et obtenues par le logiciel Surfer. Une vingtaine de simulations par cas ont été considérées dans l'analyse de sensibilité.

Les résultats des simulations obtenus montrent que la minimisation des écarts, par tâtonnement, entre les charges calculées et mesurées pourrait être obtenue pour des valeurs faibles de  $P$  et élevées de  $K$  (Figure 5.5). Cependant, un problème se pose dans le modèle quant au choix des valeurs dans cette région puisqu'en régime permanent les faibles apports d'eau infiltrés ou introduits dans un milieu perméable entraînent rapidement le développement de noeuds secs, ceci surtout si aucune contrainte de charge ou de flux n'est appliquée ou imposée aux frontières du modèle et que la profondeur de l'aquifère est irrégulière.

D'autre part, en supposant l'existence des pertes de charge au niveau des grès fissurés (possibilité d'alimentation d'un aquifère sous-jacent), des simulations ont été complétées en introduisant un terme de fuite au niveau de chaque maille. Ceci a pour conséquence de déplacer la région de minimisation des écarts vers des

**Figure 5.5 Analyse de sensibilité sur les facteurs affectant P et K**

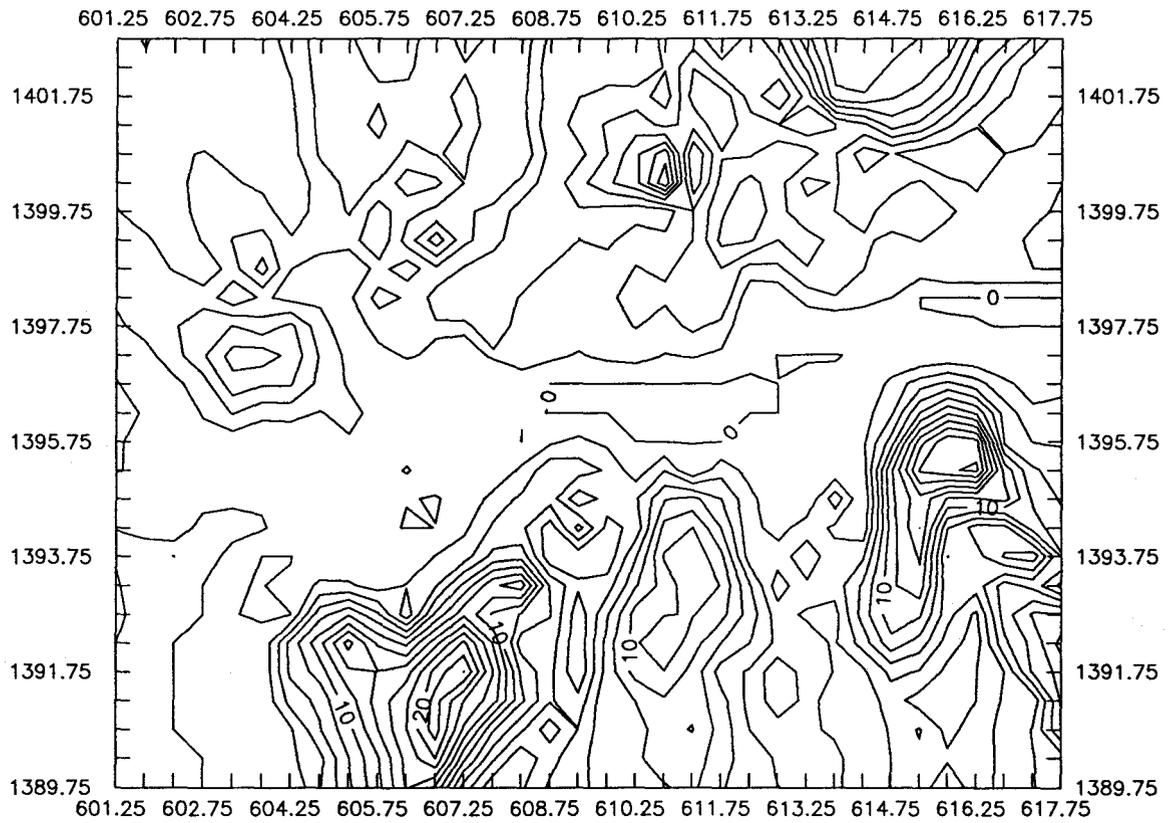
**Figure 5.6 Charges hydrauliques mesurées dans les puits (piézométrie)**

valeurs relativement faibles de K et grandes de P avec toutefois le même problème de développement des noeuds secs si on continue à choisir des valeurs de K et P qui tendent à minimiser les écarts entre les charges calculées et mesurées. En outre, on a tenté l'imposition de flux d'eau à la frontière Nord correspondant aux apports qui pourraient provenir de l'amont du domaine, en gardant toujours les autres limites extérieures imperméables, mais ceci n'a pas donné de solutions appréciables. Un resserrement du maillage a aussi été réalisé en le diminuant de moitié (67 x 52 noeuds) afin d'éviter le développement de forts gradients de charges entre noeuds voisins, mais ceci n'a fait qu'augmenter les durées des simulations sans aucune amélioration des résultats.

Les paramètres estimés de K et P, déterminés par l'analyse de sensibilité, qui donnent le meilleur ajustement des charges calculées et mesurées (Figure 5.6) auquel on a pu aboutir sont de l'ordre de 3,5 K et 0,15 P pour la rive gauche et 3 K et 0,2 P pour la rive droite. Les écarts entre les charges hydrauliques calculées et les charges piézométriques sont représentés à la Figure 5.7. On remarque donc, à partir de cette figure, que l'ajustement n'est pas complet, surtout au niveau des talwegs et particulièrement en rive gauche. Ceci est sans doute dû au relief et la topographie du fond de l'aquifère relativement accentués sur cette rive par rapport à la rive gauche.

## 5.8- CONCLUSION

Quoique la géologie de la région de Bamako apparaisse simple, les données mesurées ou calculées des propriétés physiques et hydrauliques sont insuffisantes pour réaliser une simulation adéquate du domaine. Une connaissance plus précise de la topographie du substratum rocheux imperméable serait en ce sens indispensable pour la détermination du comportement hydrodynamique de l'aquifère de Bamako. D'autre part, l'alimentation de la nappe ne peut être essentiellement due aux précipitations. Cependant, aucune information n'est disponible sur l'alimentation possible aux limites du domaine (au niveau des falaises) comme d'ailleurs sur les pertes possibles au travers des grès (fractures). Enfin, la structure hydrogéologique même de la nappe de Bamako se prête mal à la modélisation, car son épaisseur est dans l'ensemble trop faible, entraînant parfois un assèchement total dans certains secteurs. Un modèle pouvant prendre en considération de telles contraintes serait par ailleurs très difficile à mettre en oeuvre, et à calibrer à un tel domaine.

**Figure 5.7 Différences entre les charges hydrauliques calculées et mesurées**

## **CHAPITRE 6**

### **POLLUTION DE LA NAPPE DE BAMAKO**

#### **6.1- INTRODUCTION**

De nos jours, les problèmes de pollution constituent un danger de plus en plus important pour l'homme. Parmi ces problèmes, celui de l'eau se pose avec acuité. En effet, l'eau est affectée de façon croissante par des matières minérales et organiques, et même des micro-organismes dont certains sont pathogènes et donc dangereux pour la consommation.

L'eau souterraine, qui est jugée la plus potable, devient la ressource la plus couramment utilisée dans les pays en développement. Cependant, cette eau est aussi très vulnérable à la pollution, et sa protection s'impose à tous les niveaux. Cette protection nécessite la connaissance de plusieurs conditions, géologiques, hydrogéologiques, et biologiques. On doit en particulier s'efforcer de:

- améliorer les études appliquées à l'implantation des systèmes sanitaires;
- étudier la survie des micro-organismes et la persistance de certaines substances chimiques (en occurrence les nitrates) à travers les différentes zones du sol;
- identifier les facteurs qui déterminent le mouvement des contaminants. Ces facteurs sont utilisés pour évaluer le risque de pollution des eaux souterraines, dans les différents environnements hydrogéologiques;
- prévenir et réduire la pollution.

Les principales sources de pollution sont d'origine domestique et urbaine (eaux usées, dépôts d'ordures, matière fécale, etc...), d'origine agricole (engrais, fumiers, pesticides), ou d'origine industrielle (rejets industriels). A Bamako, la pollution est surtout d'origine domestique et urbaine, malgré l'existence des sources de pollution agricole et industrielle.

Un polluant peut se définir comme un élément étranger à un milieu, tel un agent physique (température, matières solides, etc...) ou une substance minérale, organique ou biologique, qui, sous une intensité ou une concentration anormale, peut dégrader la qualité de l'eau naturelle (Castany, 1967).

Les facteurs qui déterminent le pouvoir polluant d'une substance sont donc sa dose ou sa concentration dans le milieu récepteur, et la fréquence des apports. A ces deux facteurs, il faut ajouter la nature du polluant (physique, radioactif, organique, chimique, etc...).

La qualité de l'eau doit satisfaire à deux exigences: être salubre et claire. La présence d'un seul germe dans l'eau est déjà signe de pollution. Cependant une eau est dite polluée, lorsque sous l'effet de l'activité humaine, elle devient impropre à satisfaire une utilisation, ou qu'elle présente un risque pour l'environnement.

## 6.2- PRINCIPAUX TYPES DE POLLUANTS

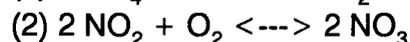
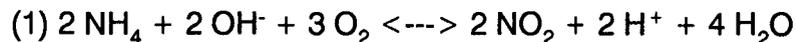
Le nombre de polluants est considérable et s'accroît de plus en plus dans le monde. En 1977, l'American Water Chemical Society en dénombre 4 millions dont 70.000 susceptiblement cancérogènes. On distingue:

### Les polluants physiques

- la chaleur dont l'élévation rend impropre la consommation de l'eau, mais conditionne aussi l'activité biologique des milieux aquatiques. Cette chaleur peut être optimale pour de nombreux micro-organismes, qui peuvent être pathogènes, ou inversement participer à l'épuration naturelle des eaux;
- les matières solides en suspension;
- les éléments radioactifs, dangereux même à l'état de traces.

### Les sels dissous

Ils résultent principalement de la dégradation des matières organiques à partir de la surface du sol. Les plus fréquents sont les composés azotés, nitrates ( $\text{NO}_3$ ), nitrites ( $\text{NO}_2$ ) et ammonium ( $\text{NH}_4$ ) (Levis, 1980; WHO, 1978; Patricie et al., 1980; Diana et al., 1979; Sibya, 1980). Leur présence dans l'eau souterraine résulte principalement de l'activité agricole (engrais), et de la dégradation des matières organiques. Pour cela, l'activité microbienne oxyde les ions ammonium ( $\text{NH}_4$ ) en nitrates ( $\text{NO}_3$ ) et nitrites ( $\text{NO}_2$ ) suivant les réactions suivantes:



Les nitrates et les nitrites sont à l'origine de deux maladies graves:

- la méthémoglobine, qui atteint en tout premier lieu les jeunes enfants en provoquant des troubles graves, par altération de l'hémoglobine du sang et formation de métha-hémoglobine toxique, pouvant conduire à l'asphyxie et la mort s'il n'y a pas de traitement (Lewis et al., 1980).
- risques de cancer, liés à une absorption élevée de nitrates qui peuvent agir avec les amines et les amides, pour donner des nitrosamines et nitrosamides cancéreuses pour une grande part.

Les chlorures et les sulfates, qui sont de même origine que les composés azotés, ainsi que les phosphates provenant des détergents utilisés pour le lavage, sont dangereux pour l'organisme lorsque ingérés en grandes quantités.

#### Les métaux lourds

Les métaux lourds susceptibles d'être retrouvés tels le plomb, le cadmium, les cyanures, le mercure, etc... sont dangereux, même à l'état de trace.

#### Les composés organiques de synthèse

Ces composés, qui sont principalement des pesticides utilisés pour les cultures, pour les traitements contre les moustiques et autres insectes, ou comme raticides, sont souvent des produits très violents pouvant être très dangereux pour l'homme. Pouvant être persistants dans l'environnement pendant de longues périodes de temps (tel le DDT), ils peuvent être retrouvés dans les eaux souterraines.

#### Les organismes et micro-organismes

Ils sont très fréquents dans les eaux de surface, mais de plus en plus aussi, dans les eaux souterraines. Cette contamination survient surtout lorsque l'alimentation de la nappe se fait par infiltration d'eaux de pluie ou directement d'eaux polluées. Ils constituent le groupe de polluants qui provoque le plus de maladies. Parmi ces dernières, on note surtout des maladies intestinales parfois très graves dans les pays en développement.

La transmission des maladies se fait par circulation et transport des organismes ou micro-organismes pathogènes par les eaux souterraines, de la zone d'alimentation jusqu'à la nappe. Quatre groupes de pathogènes d'origine humaine peuvent être individualisés dans les eaux souterraines: les oeufs des vers; les protozoaires; les bactéries; et les virus. Leur degré d'action pathogène dépend de leur nature, de leur quantité dans l'eau et de l'état de santé de la personne.

Des études (Lewis et al., 1980; WHO, 1979) ont montré que la matière fécale contient en moyenne 109 bactéries/g et 106 virus/g appartenant à 100 types différents de virus. Les bactéries à la différence des virus, peuvent se multiplier en dehors de leur hôte et leur dose moyenne infectante est de 10.000 unité par litre ou plus, alors que celle des virus est inférieur à 100. Les fosses septiques jouent un rôle important dans cette transmission, ainsi que les différentes couches du sol.

### 6.3- LE MOUVEMENT DES POLLUANTS DANS LES EAUX SOUTERRAINES

La circulation des eaux souterraines conditionne le transport et l'évolution des polluants dans le sol. Ainsi, la connaissance des caractéristiques hydrodynamiques, hydrochimiques, et hydrobiologiques des sols est indispensable pour toute étude sur la pollution des eaux souterraines. La nature du sol, l'épaisseur de la zone non saturée et la distance de la zone d'alimentation à la nappe, sont autant de paramètres importants à prendre en considération.

Le profil d'un sol est reconnu comme étant un filtre permettant une certaine purification des eaux souterraines, une réduction du nombre de micro-organismes et la rétention de plusieurs éléments chimiques. Cependant, certains environnements hydrogéologiques défavorables, tel que les zones fracturées, peuvent faciliter la pollution des eaux souterraines. En dehors de l'action de filtration physique du sol, une épuration biologique lente existe aussi, la biodégradation.

La pollution est un phénomène lié surtout aux aquifères phréatiques, c'est-à-dire des aquifères peu profonds et non protégés par des terrains imperméables, et dans une moindre mesure aux aquifères semi-phréatiques. L'étude de cette pollution nécessite de distinguer la circulation de l'eau et des polluants à travers la zone non saturée du sol, et à travers la zone saturée (JohnLewis et al., 1982).

#### Mouvement de l'eau dans la zone non-saturée

La zone non-saturée est constituée de particules solides, et de pores remplis d'air et d'eau. L'eau s'y déplace généralement de façon verticale, en fonction des potentiels gravitationnel et matriciel. La perméabilité hydraulique (propriété décrivant l'aptitude du sol à laisser s'écouler l'eau) est fonction de la texture et de la structure du sol. Les écoulements dans la zone non-saturée sont lents (ne dépassant pas 0,3 m/jour), à l'exception des sols fissurés où les vitesses

d'écoulement peuvent atteindre 5 m/jour (Allen et Morrison, 1973). Ceci semble pouvoir être le cas à Bamako (Aljoumat, 1989).

L'obstruction des pores réduit la capacité d'infiltration et par conséquent les risques de pollution. Plusieurs phénomènes conduisent à l'obstruction des pores tels (Lewis et al., 1980):

- un colmatage par des particules solides filtrées;
- une sécrétion de substances par les bactéries;
- l'accumulation de biomasse (micro-organismes);
- la précipitation d'argiles, de sulfates, etc...

#### Mouvement de l'eau dans la zone saturée

Dans cette zone, l'écoulement est surtout gouverné par la conductivité hydraulique (perméabilité) horizontale et le gradient hydraulique. Dans la plupart des conditions hydrogéologiques, ce gradient étant faible, les vitesses d'écoulement sont faibles, mais supérieures à celles dans la zone non-saturée. La composante verticale de l'écoulement de l'eau est faible. Le temps de résidence des polluants est grand, et conditionne la protection des puits d'approvisionnement en eau.

Pour assurer une protection contre la contamination pathogène, il est recommandé d'implanter les puits au moins à 15 m de toutes sources de pollution. Cependant, les sols latéritiques favorisent la pollution des eaux souterraines, à cause du rôle généralement prédominant de la macro-porosité (Martin et Morrison, 1973; Lewis et al., 1980).

#### Facteurs déterminant le mouvement des pathogènes

La zone non-saturée joue un rôle important contre la pollution d'origine fécale des aquifères; le temps de résidence est le facteur déterminant de l'élimination et du déplacement des bactéries et des virus. L'épaisseur de la zone non-saturée, sa porosité, sa perméabilité, et la nature du sol constituent les paramètres essentiels dans la protection des eaux souterraines. Par l'action filtrante des sols, le mouvement de ces polluants devient plus difficile. Une fois que les bactéries et les virus pénètrent dans la zone saturée, ils peuvent être transportés sur de grandes distances.

De nombreux facteurs influencent le mouvement des bactéries et des virus à travers le sol (d'après Gerba et al., 1975):

Pluviométrie: elle favorise l'entraînement des micro-organismes depuis la surface du sol à cause des gradients ioniques créés.

pH du sol: un pH acide favorise l'adsorption des virus, un pH basique entraînant la remise en circulation (élution) des virus adsorbés.

Composition du sol: les bactéries et les virus sont aisément adsorbés dans les argiles, et dans les sols sableux et gréseux contenant de la matière organique.

Charge hydraulique / taux d'écoulement: ils favorisent la pénétration des micro-organismes en profondeur.

Matière organique soluble: elle abaisse l'adsorption des virus sur les particules du sol, et entraîne la remise en circulation (élution) de ceux déjà adsorbés, du fait de la compétition à l'adsorption.

Cations: les cations, spécialement ceux divalents, peuvent aussi agir comme neutraliseurs ou réducteurs des forces de répulsion entre les micro-organismes et les particules du sol, permettant ainsi le processus d'adsorption.

#### 6.4- LA PERSISTANCE DES CONTAMINANTS DANS LES SOLS ET LES EAUX

Les éléments contaminants peuvent persister plus ou moins longtemps dans le sol et l'eau souterraine, dépendant de leur nature. Ainsi, les ions simples persistent dans le milieu très longtemps, mais peuvent précipiter sous forme de sels et de complexes, ou interagir avec les argiles, par échange d'ions.

A l'inverse, les pesticides, qui sont de grandes molécules organiques, sont fortement affectées par la dégradation chimique et biologique. L'hydrolyse par exemple produit une rupture de la molécule en différents composés présentant généralement des toxicités plus faibles ou nulles. De même, les microorganismes, par un phénomène similaire, contribuent à la disparition des composés.

La survie des pathogènes dans les sols et les eaux diffère d'un milieu à l'autre, et dépend de nombreux facteurs tels la nature du sol, l'humidité et la température. Ainsi, les virus survivent dans un sol saturé au delà de 12 jours à 37°C, et au delà de 92 jours à 22°C (Lewis et al., 1980; Katzenelson, 1979; Hagedorn et al., 1978). Dans les sols humides, les bactéries peuvent survivre 10 jours et au delà, mais 90% meurent en général en 30 jours. Dans les sols secs, aucune bactérie ne survie généralement plus de 20 jours. Dans un sol acide, ce temps est réduit à 10 jours. Les coliformes fécaux peuvent ainsi survivre jusqu'à 10 semaines, mais avec une réduction de 90% en 2 à 3 semaines. Si les conditions d'humidité et de température sont remplies, ils peuvent survivre pendant plusieurs mois. Dans les cas contraires, leur élimination est probable en deux semaines. Les pathogènes qui pénètrent en profondeur peuvent survivre plus longtemps que ceux de la surface (Martin et Noonan, 1977; Zebell et al., 1975 (in Lewis et al., 1980)).

Les facteurs relatifs à la survie des microbes dans les sols et leurs effets sont (Gerba, 1979):

Humidité du sol: elle augmente le temps de survie des pathogènes dans les sols humides et durant les périodes de forte pluviométrie.

Capacité de rétention d'eau: le temps de survie est plus faible dans les sols sableux que dans les sols à grande capacité d'humidité.

Température: les basses températures favorisent la survie des pathogènes dans les sols.

Adsorption: lorsque l'adsorption croît, le temps de survie est prolongé.

pH: le temps de survie des pathogènes (bactéries) est plus court dans les sols acides (pH 3-5) que dans les sols basiques.

Ensoleillement /évaporation: la survie est plus faible à la surface du sol.

Matière organique: la survie des pathogènes est plus grande et leur multiplication est possible avec une présence de matières organiques suffisante.

Antagonisme de la microflore du sol: augmentation du temps de survie dans les sols stériles; rivalité de la microflore du sol avec les bactéries pour les nutriments; les micro-organismes aérobies du sol affectent la survie des bactéries; contrairement les organismes anaérobies n'ont pas d'effet.

La survie des micro-organismes pathogènes dans les eaux souterraines est relativement peu connue (Lewis et al., 1980; Katzenelson, 1979; Hagedorn, 1978). En général, la survie des bactéries est plus longue dans les eaux souterraines que dans les eaux de surfaces. Cette survie est cependant fonction de la température et de la nature chimique des eaux souterraines. Par exemple, la survie des pathogènes est très limitée dans les eaux acides.

## 6.5- LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES A BAMAKO

Le problème de la pollution est connu dans toutes les grandes villes du monde, et a fait l'objet de nombreux débats. Le cas de la ville de Bamako n'est donc pas une exception. Le développement industriel et l'urbanisation des grandes villes constituent les bases de cette pollution. En général, dans les zones urbaines, il y a accumulation importante de déchets de toutes sortes et de produits chimiques découlant de l'activité humaine. Cependant, les types de problèmes sont différents suivant le niveau de développement.

A Bamako, capitale du Mali, le problème de la pollution est principalement liée à l'insuffisance de l'assainissement. En effet, l'environnement de Bamako est

pollué, et on peut sans difficulté remarquer les ordures ménagères jonchant les cours des concessions et les rues, ainsi que les eaux usées provenant du nettoyage ménager, des fosses septiques et des puisards, qui coulent ou forment des flaques stagnantes autour des puits et dans les caniveaux non curés.

Avec la pluie, les eaux sont entraînées en partie par ruissellement vers le Niger, et en partie s'infiltrent, contribuant à la recharge de la nappe, mais aussi sa pollution par entraînement des matières organiques et minérales de la surface. Le cas de la nappe phréatique de Bamako est typique. La ville est en effet presque totalement bâtie sur la zone d'alimentation de l'aquifère. Les rejets d'eaux usées et les fosses septiques dans cette zone sont donc en grande partie à l'origine de toutes pollutions bactériennes et chimiques des eaux de la nappe.

Pour estimer l'importance de la pollution, les études statistiques sont indispensables, et doivent prendre en considération deux groupes de puits représentatifs de la zone d'étude (Waltz, 1972; Martin et al., 1973): le premier groupe est celui des puits contaminés, c'est-à-dire les puits où la contamination de l'eau existe et où la source de pollution peut être identifiée; le second groupe est celui des puits non contaminés, où aucune contamination ne peut être détectée, mais où la source de pollution est présente. Cette méthodologie exige cependant des connaissances a priori sur la zone d'étude. Elle ne peut donc pas être utilisée dans les premières phases de recherche.

#### 6.5.1- *Chimie des eaux souterraines*

A Bamako, les eaux de la nappe quaternaire sont contenues dans les latérites, alluvions et colluvions plus ou moins argileuses, ainsi que dans la frange altérée du substratum gréseux. Elles proviennent de l'infiltration des eaux de pluie, ainsi que des apports souterrains issus des grès. De telles eaux ne peuvent qu'avoir un résidu sec très faible. Or l'étude de la composition chimique des eaux montre des zones à forte concentration en sels dissous, donc une pollution de la nappe. A Bamako la pollution provient surtout des eaux usées domestiques et industrielles.

Les polluants possibles sont surtout des éléments:

- organiques: détergents, pesticides, produits de tannerie et de teinture;
- inorganiques: ce sont les éléments chimiques: Fe, Mg, etc.

Cette pollution chimique des eaux souterraines de Bamako, peut avoir plusieurs sources dont les sources urbaines, les sources agricoles et les sources industrielles.

#### Les sources urbaines

Ce sont les eaux usées provenant de l'activité humaine. On peut citer:

- le manque de réseau d'évacuation des eaux usées qui fait que l'on assiste au déversement incontrôlé des produits de tannerie, de teinture, de savonnerie et eaux domestiques. Il peut arriver que ces eaux soient évacuées vers des puisards qui sont en communication directe avec la nappe.
- des parcs de vente de bétail sans mesure d'hygiène.
- la mauvaise disposition et le mauvais creusement des fosses d'aisance et des puisards. Signalons que dans les quartiers de Niaréla et de Bozola, il a été décelé des fosses d'aisance situées à proximité immédiate des puits et ayant la même profondeur que ces puits.
- non-prise en compte de certaines habitudes quotidiennes. Par exemple: lavage ou nettoyage au bord des puits sans margelle; puisettes délaissées n'importe où; non fermeture des puits.
- les dépôts d'ordures ménagères et les "cimetières" de véhicules ou autres ferrailles, les ateliers de mécanique automobile (déversement d'huile). Les ordures ménagères varient en fonction du mode de vie des habitants et de la saison. Elles se composent de papiers, cartons, bois, déchets organiques putrescibles, verres, chiffons, plastiques, et éléments fins non définis.

#### Les sources industrielles

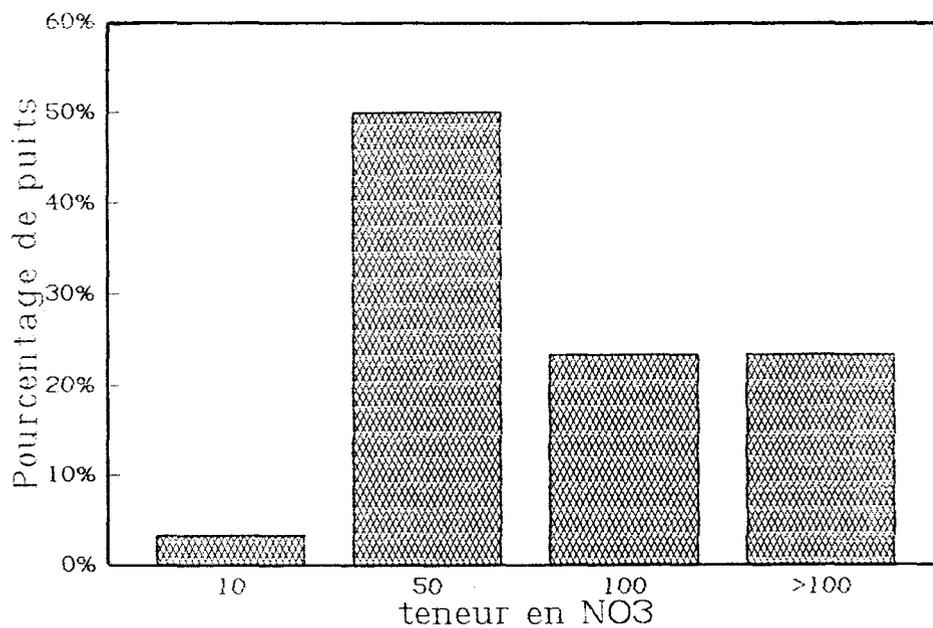
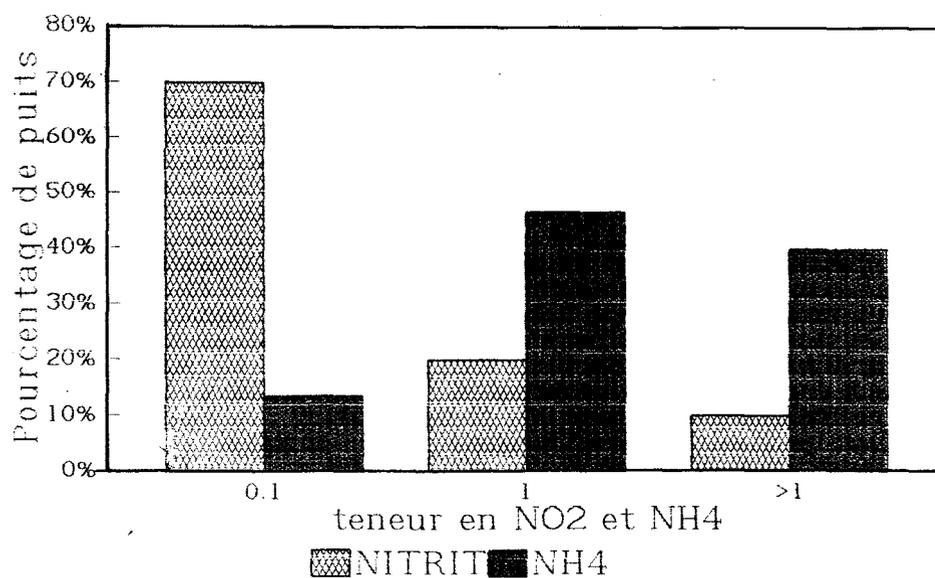
A Bamako, il y a des industries textiles, des tanneries, des laiteries, des brasseries et beaucoup d'autres qui sont toutes des industries polluantes par leurs déchets.

#### Les sources agricoles

Ce sont les produits utilisés dans le but d'améliorer les rendements agricoles (engrais minéraux et naturels, pesticides).

La pollution est une dégradation artificielle de la qualité de l'eau. L'analyse chimique d'une eau révèle la présence de certains éléments en solution ou en suspension. Ce sont la qualité et la quantité de ces éléments qui, d'une part définissent une eau, et d'autre part précisent et limitent son emploi aux divers usages: alimentation, besoins ménagers, besoins industriels, irrigation, etc....

C'est dans ce cadre que des campagnes d'analyses chimiques ont été menées en août 1989 et en janvier 1990 avec un total de 103 échantillons. Les résultats obtenus pour les ions majeurs ont été présentés dans la section hydrogéologie

**Figure 6.1: Distribution des teneurs en nitrate****Figure 6.2: Distribution des teneurs en nitrite et ammonium**

**Tableau 6.1: Teneurs en nitrate, nitrite et ammonium (mg/l)**

R_PUITS	NO2-	NO3-	NH4+
BKONI1	0.046	52,8	0.039
BKONI2	0.043	64,24	0.052
BKONI3	0.096	27,28	0.053
BKONI4	0.036	100,76	0.103
BKONI5	0.046	80,96	0.65
BKONI6	0.053	20,68	0.25
BKONI7	0.05	19,36	0.23
BKONI8	0.073	14,96	0.23
BKONI9	0.043	36,96	0.103
BKONI10	0.036	31,24	0.155
BKONI11	0.056	47,34	0.181
BKONI12	0.063	30,8	0.219
BKONI13	0.026	19,8	0.065
BKONI14	0.043	20,24	0.116
BKONI15	0.467	21,56	4,567
BAGADA1	0.11	98,8	0.374
BAGADA2	0.29	118,8	5,573
BAGADA3	0.15	106,46	6,35
BAGADA4	0.13	128,48	0.335
BAGADA5	0.11	136,4	0.3
NIAREL6	0.14	145,2	3,32
NIAREL7	0.135	141	6,218
NIAREL8	0.29	61,16	6,53
NIAREL9	0.304	74,36	6,011
NIAREL10	0.115	91,08	0.361
BOZOLA11	0.24	23,76	3,637
BOZOLA12	0.244	19,8	3,38
BOZOLA13	2,23	17,6	4,205
BOZOLA14	1,175	7,92	17,415
BOZOLA15	1,089	12,76	6,45

de ce rapport. Les composés azotés (nitrates, nitrites et ammonium) sont présentés ci-après.

### Nitrates

Les données portent sur trente puits analysés pendant pratiquement un cycle annuel complet (soit de février à novembre 1990). Les fréquences de prélèvement ont été d'une fois tous les mois pendant l'étiage et toutes les semaines pendant les hautes eaux.

La norme de consommation en nitrates de l'eau est fixée à 10 mg/l, car l'élévation de cette teneur provoque de la méthémoglobine chez les enfants nourris au biberon. Dans tous les puits étudiés, la teneur de  $\text{NO}_3^-$  est largement supérieure à cette norme. On a obtenu des teneurs qui dépassent les 100 mg/l (Tableau 6.1 et Figure 6.1). Ces teneurs montrent une pollution d'origine organique liée à l'infiltration des eaux des fosses d'aisance comme le confirmeront les analyses bactériologiques avec la présence de coliformes qui sont des germes pathogènes du tube digestif.

### Nitrites - Ammonium

Ces deux éléments sont toxiques pour l'organisme humain. Leur présence en quantité importante rend l'eau inconsommable par son odeur et par sa saveur. Leurs normes respectives sont fixées à 0,1 - 0,2 mg/l. Les teneurs en  $\text{NO}_2^-$  des eaux de Bamako sont d'une manière générale très élevées, et comprises entre 0,03 et plus de 0,4 mg/l (Tableau 6.1 et Figure 6.2). Certains puits renferment des teneurs de 1 à plus de 2 mg/l. Quant au  $\text{NH}_4^+$ , sa teneur souvent très élevée (> 4 mg/l) dans certains eaux, provoque une odeur nauséabonde.

#### *6.5.2- Qualité bactériologique des eaux souterraines*

Les données bactériologiques portent sur les trente même puits (que les nitrates) suivis de février à novembre 1990. Les fréquences de prélèvement ont été d'une fois tous les mois pendant l'étiage et toutes les semaines pendant les hautes eaux.

### Méthodes d'analyse

Les analyses ont été effectués à l'Institut National de Recherche en Santé Publique (I.N.R.S.P) de Bamako.

Réactifs: Colorants (gram), Kovacks, oxydase, indole, TDA, OMPG.

Milieux utilisés: Bouillon bilié lactosé au vert brillant, bouillon biostreptosel, Mackonkey, gélose à l'éosine et au bleu de méthylène. gélose colombia, galerie d'identification classique des entérobactéries et galerie API.

Pour le dénombrement des germes totaux, le laboratoire a procédé à une dilution au 1/10, 1/100, 1/1000 de chaque échantillon. Ensuite, 0,1 ml de chacune de ces dilutions est inoculée dans 20 ml de gélose Colombia en surfusion. Après homogénéisation, ce mélange est coulé en boîte de Pétri. Après solidification, la géloseensemencée est placée à 37°C pendant 24h. Les colonies sont ensuite dénombrées.

Pour la recherche d'E-coli et autres coliformes, on procède à l'ensemencement de trois tubes de 10 ml de bouillon bilié lactosé munis de cloche de Durhäm, à l'aide de 1 ml de chaque échantillon. Chaque tubeensemencé est placé au bain-marie à 44°C pendant 48h.

Pour la recherche des autres entérobactéries, l'ensemencement de 0,1ml de chaque échantillon est effectué sur gélose de MacKonkey, et sur gélose à l'éosine et au bleu de méthylène.

La recherche des streptocoques fécaux a utilisé deux tubes contenant chacun 10 ml de bouillon bio-streptosel pur. Dans chaque tube on inocule 1 ml de l'échantillon pur, porté ensuite au bain-marie à 44°C pendant 48h.

### Germes totaux

Les résultats détaillés de toutes les analyses figurent en annexes. Les deux groupes de résultats présentés ici sont les valeurs moyennes en pathogènes pour les périodes d'étiage et de crue, ainsi que leur distribution de fréquence.

Le dénombrement des germes totaux n'a de valeur que lorsqu'il est répété. La présence répétée du nombre de germes totaux témoigne d'une contamination de l'eau par des excréta ou des matières organiques.

L'analyse comparée des distributions en étiage et en crue (Tableaux 6.2 et 6.3), montre que le maximum de germes totaux pendant l'étiage est supérieur à celui de la crue. Dans l'ensemble le nombre de germes totaux diminue en saison pluvieuse (Figure 6.3). Ceci peut s'expliquer par une dilution des germes. Les quelques cas pour lesquels ce nombre augmente, sont certainement dus à un apport d'excréta par les eaux de ruissellement. Nous avons obtenu les mêmes

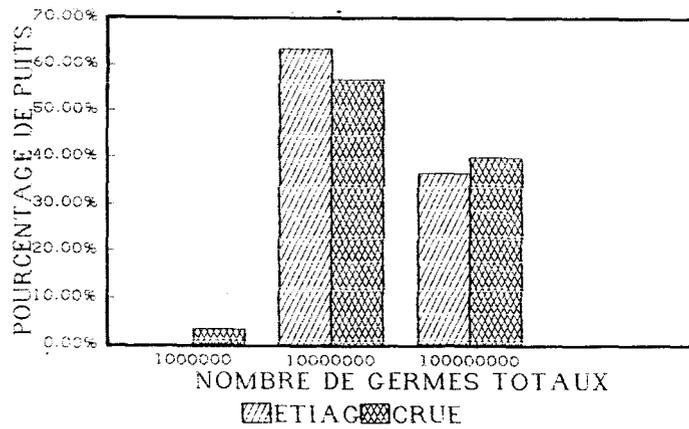
**Tableau 6.2: Nombre moyen de germes par litre (étiage)**

R_PUITS	G-TOTAUX	E-COLI	AUTRES COLIFORMES	SALMONELLA
BKONI1	4220000	62000	192000	0
BKONI2	3824000	162000	228000	0
BKONI3	3490000	668000	398000	0
BKONI4	3400000	120000	338000	20000
BKONI5	5244000	400000	146000	0
BKONI6	16560000	86000	1230000	0
BKONI7	8420000	1312000	506000	0
BKONI8	10510000	164000	248000	0
BKONI9	20920000	18000	4974000	0
BKONI10	2908000	120000	664000	0
BKONI11	21920000	1000000	176000	0
BKONI12	5912000	160000	64002	0
BKONI13	3460000	0	992000	0
BKONI14	4500000	0	156000	0
BKONI15	10240000	2002000	244000	0
BAGADA1	5320000	80000	408000	0
BAGADA2	7900000	60000	2634000	0
BAGADA3	6160000	74000	272000	0
BAGADA4	2660000	124000	86000	0
BAGADA5	10600000	68000	188000	0
NIAREL6	2160000	80000	220800	0
NIAREL7	11820000	148000	1538000	0
NIAREL8	25140000	20690000	2198000	0
NIAREL9	17420000	60000	2444000	0
NIAREL10	4840000	124000	542840	0
BOZOLA11	20340000	68000	1858000	0
BOZOLA12	48860000	38512000	438000	0
BOZOLA13	7040000	200000	516000	0
BOZOLA14	9220000	100000	162000	0
BOZOLA15	9960000	6000	460000	0

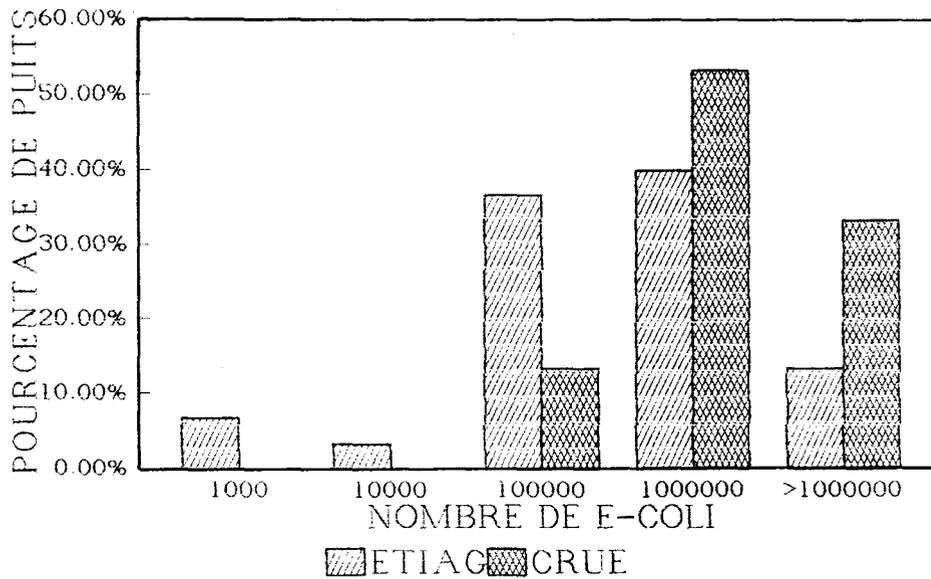
**Tableau 6.3: Nombre moyen de germes par litre (crue)**

R_PUITS	G-TOTAUX	E-COLI	AUTRES COLIFORMES	SALMONELL A
BKONI1	8322222	507778	43333	0
BKONI2	1966667	68889	330000	0
BKONI3	5644444	83333	303333	0
BKONI4	4277778	131111	65556	0
BKONI5	2401111	171111	193333	0
BKONI6	3211111	145556	242223	0
BKONI7	3133333	52222	122222	0
BKONI8	8777778	171111	118889	0
BKONI9	5144444	1141111	140000	0
BKONI10	1644444	250000	83333	0
BKONI11	1755556	581111	721111	0
BKONI12	2066667	125556	478889	0
BKONI13	833333	25556	45556	1111
BKONI14	1677778	391111	267778	0
BKONI15	3711111	140000	175556	0
BAGADA1	1566667	612222	322222	0
BAGADA2	11044444	1364444	494444	0
BAGADA3	14722222	1944444	448889	0
BAGADA4	13500000	357778	382222	0
BAGADA5	1455556	2467778	143333	0
NIAREL6	5755556	893333	181111	0
NIAREL7	2456667	4856667	2283333	0
NIAREL8	5988889	196667	110000	0
NIAREL9	1766667	1358889	606667	0
NIAREL10	13300000	1192222	430000	0
BOZOLA11	7222222	246667	545556	0
BOZOLA12	10344444	436667	438889	0
BOZOLA13	16033333	2682222	6283333	0
BOZOLA14	24700000	1831111	273333	0
BOZOLA15	17688889	2690000	2296667	0

**Figure 6.3: Variation des germes totaux**



**Figure 6.4: Variation des E-coli**



tendances lors d'une étude précédentes (Sanogo, 1989). Cependant, il faut remarquer qu'en général, tous les puits en période de crue sont contaminés.

Par rapport aux normes de l'OMS, on peut distinguer deux groupes de puits pendant l'étiage (Figure 6.3):

- Les puits dont le nombre de germes totaux dépassent mille fois les normes de l'OMS (63,3%);
- Les puits dont le nombre de germes totaux dépassent dix milles fois les normes de l'OMS (36,7%).

Pendant la saison des pluies on peut distinguer trois groupes de puits:

- les puits dont le nombre de germes totaux dépassent cent fois les norme de l'OMS (3,3%);
- les puits dont le nombre de germes totaux dépassent mille fois les normes de l'OMS (56,7%);
- Les puits dont le nombre de germes totaux dépassent dix milles fois les normes de l'OMS (40%).

### Coliformes

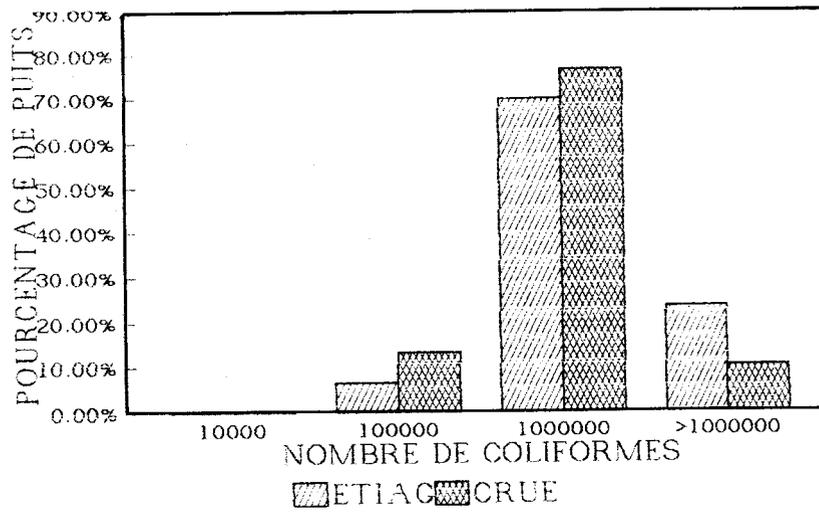
La présence des coliformes témoigne d'une contamination fécale des eaux, surtout lorsqu'ils sont isolés en même temps que les streptocoques fécaux. Selon les normes de l'OMS, une eau de puits doit être exempte de contamination fécale, c'est-à-dire ne doit pas contenir de coliforme fécal (E-coli). Dans les eaux des puits analysés, pratiquement 100% des puits contiennent des E-coli, à l'exception de deux puits (Bankoni 13 et 14), et cela en étiage (Tableau 6.4). Ces deux puits ont certainement été traités.

Par rapport aux normes de l'OMS on peut distinguer cinq groupes de puits:

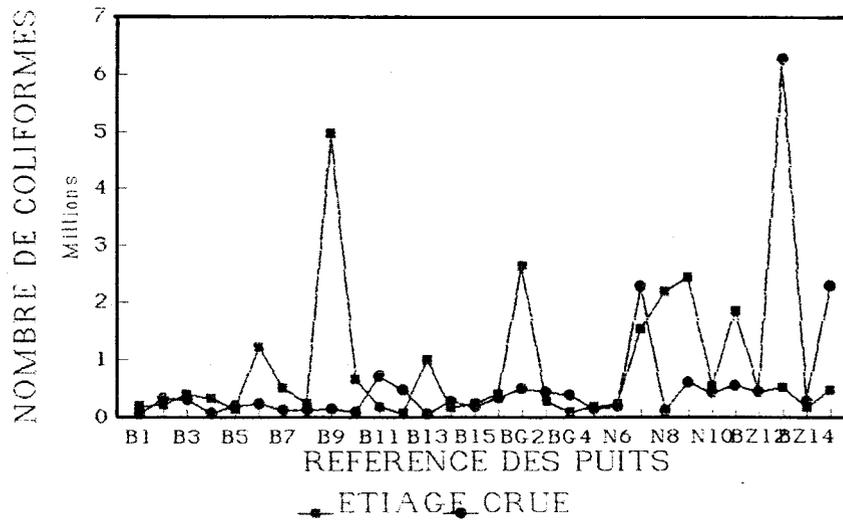
- Les puits où les normes de l'OMS sont dépassés d'un facteur mille.
- Les puits où les normes de l'OMS sont dépassés d'un facteur dix milles.
- Les puits où les normes de l'OMS sont dépassés d'un facteur cent milles.
- Les puits où les normes de l'OMS sont dépassés d'un facteur un million.
- Les puits où les normes de l'OMS sont dépassés d'un facteur supérieur à un million.

Les autres coliformes, même s'il peuvent être retrouvés dans la nature, dépassent largement les normes admises (jusqu'à un facteur dix milles). En effet, pour les eaux de puits, l'OMS fixe 100 germes par litre d'eau. On en dénombre jusqu'à  $4 \cdot 10^6$  germes par litre et plus dans les puits étudiés.

**Figure 6.5: Variation des autres coliformes**



**Figure 6.6: Répartition des coliformes sur les puits**



Le fait que ces coliformes sont toujours isolés en même temps que les streptocoques fécaux atteste de leur origine fécale. Si l'on tient compte du fait que toute la zone d'étude est située au coeur de la capitale, on peut attribuer cette contamination aux puisards et latrines des différentes concessions.

## **CHAPITRE 7 RECOMMANDATIONS**

Pour lutter efficacement contre la pollution à Bamako, il serait très difficile d'éviter l'application des mesures draconiennes. Cela peut donc être difficile à mettre en place par les pouvoirs publics. Comme première mesure facile à appliquer, une politique et une campagne de sensibilisation efficace sur les dangers de la pollution devrait être menée. D'autre part, la population devrait être invitée à se servir pour la consommation des eaux distribuées par les services des eaux de l'E.D.M. Cette solution est simple et facile, et relativement peu coûteuse, puisqu'un seau de 10 à 15 litres ne coûte que 5 F.CFA.

### 7.1- TRAITEMENT DES EAUX DES PUIITS

Le traitement des eaux des puits peut aussi être réalisé à peu de frais. Il s'agit des procédés de traitements des eaux suivants:

Préparer le mélange suivant:

- permanganate de potassium	5g
- sulfate d'alumine	50g
- kaolin lavé	145g

Dans un seau, délayer la quantité nécessaire de ce mélange avec l'eau. Laisser descendre le seau au fond du puits, le remonter plusieurs fois pour agiter. Laissez clarifier et utilisez après quatre jours.

Préparer le mélange suivant:

- chaux vive	10 kg
- eau	40 litres

Mélanger et verser immédiatement et attendre trois jours.

Vider totalement le puits. Ajouter alors 75 à 100 ml d'eau de javel de commerce 10° à 12° chlorométrique par m<sup>3</sup> d'eau. Attendre deux heures, puis vider de nouveau le puits et laisser revenir l'eau.

## 7.2- TRAITEMENT DES EAUX CONSOMMÉES

Il est possible de traiter facilement une quantité limitée d'eau par l'une des techniques suivantes:

- ajouter quelques cristaux de permanganate de potassium jusqu'à coloration rosée permanente. Au bout de 15 mn, il est possible de décolorer l'eau par un cristal d'hyposulfite de sodium.
- pour un litre d'eau, ajouter une goutte d'eau de javel ordinaire. Après une 1/2 heure, il est possible de détruire l'excès de chlore par un cristal d'hyposulfite de sodium.
- bouillir toutes les eaux avant leurs utilisations.

De toutes ces méthodes de traitement des eaux, l'utilisation d'eau de javel ordinaire est la plus pratiquée. C'est elle que nous conseillons à tous les usagers des puits. De plus, tant le goût d'eau de javel persiste, le risque de persistance des pathogènes est amoindri, sinon nul.

## 7.3- DISPOSITIONS DES EAUX USÉES ET DES EXCRÉMENTS

La pollution des eaux souterraines est étroitement liée à celle de la surface du sol, ainsi qu'aux latrines et aux fosses septiques. Ces deux types d'installation sont constitués par des trous de quelques décimètres de diamètre, dont la profondeur peut atteindre deux mètres et plus. Les types peuvent être très diversifiés, utilisant généralement les matériaux locaux, tels les différents systèmes présentés lors du Colloque sur les Problèmes d'assainissement de Lobatsi (CRDI, 1980).

La propagation de la pollution à partir d'une latrine jusqu'aux eaux souterraines, a fait l'objet de plusieurs études qui ont permis de dégager des relations pouvant exister entre différents éléments (Martin et al., 1973; Subrahmanyam et Bhaskaran, 1950; Caldwell et Parn, 1937). Il ressort de ces études que l'extension de la pollution à partir d'une latrine jusqu'aux eaux souterraines, dépend de la vitesse de circulation des eaux. Celle-ci étant largement liée à la structure physique du sol, à sa granulométrie, et au degré de fracturation des roches.

Les études ont montré également que la distance parcourue par les polluants (bactéries et virus) n'est pas plus grande que celle parcourue par l'eau souter-

raine en 4 à 7 jours. Il semblerait par ailleurs que les coliformes ne survivent en moyenne que 4 à 7 jours dans les milieux anaérobies (Lewis et al, 1980; Martin et Morrison, 1973; Subrahmanyam et Bhaskaran, 1950; Caldwell et Parn, 1937).

L'extension de la pollution autour de la latrine diminue au bout de quelques semaines, après formation d'une membrane gélatineuse protectrice sur les parois du sol bouchant la majorité des pores. Ainsi, la distance qui devrait être respectée entre la latrine et l'eau souterraine est celle que peut parcourir l'eau en 8 jours. Mais ceci est délicat quand le sol est fissuré ou avec de grands pores. Ainsi, dans le cas où la nappe aquifère a une pente de 1% avec un sol sableux et fin ( $d < 0,25$  mm), la vitesse de circulation de l'eau souterraine ne dépasse pas 1 m/jour, une distance horizontale de 8 m serait suffisante comme marge de sécurité contre la pollution.

Dans tous les cas, l'examen du sol, la connaissance de la nappe et de la vitesse de circulation des eaux seront nécessaires pour la détermination, le contrôle ou la localisation de la distance sur laquelle il y a doute ou risque de pollution.

Une large partie de la pollution à Bamako, et surtout celle d'origine bactérienne, peut être attribuée aux systèmes de fosses septiques et de puisards qui ne répondent à aucune réglementation, ni à aucun facteur géologique. Cette situation a poussé les responsables administratifs à prendre certaines dispositions. C'est ainsi qu'en 1986, il a été établi un certain nombre de textes réglementant la construction des puisards et latrines dans les périmètres du district de Bamako.

#### 7.4- CONSTRUCTION DES PUISARDS

Selon les premiers articles de ces textes, des modèles types de construction de puisards ont été mis au point. Le district dispose des modèles P01, P02, P03, P04, et P05, dépendant de la nature physique des terrains et du nombre des usagers. Cependant, le seul paramètre utilisé est la perméabilité du sol. Trois types de terrains ont été retenus: les sols perméables, semi-perméables, et peu perméables.

Le sol bamakois est généralement peu perméable ou semi-perméable, et il semble que le seul facteur de la perméabilité, ne puisse constituer une solution satisfaisante pour la diminution des risques de contamination des eaux souterraines. Le degré de fracturation des roches, la direction et l'orientation des

fractures, l'inclinaison de la nappe, etc. sont autant de facteurs sur lesquels doit reposer toute réglementation en matière de construction de puisards ou latrines.

Le Tableau 7.1 résume les caractéristiques des plans de construction des puisards P01 et P04 applicables aux terrains perméables, du puisard P03 pour les terrains peu perméables, et ceux P02 et P05 correspondant aux terrains semi-perméables.

Ces textes et règlements se limitent seulement à ces différents terrains, les terrains imperméables et les sols saturés (nappe haute) ne sont pas pris en compte.

#### 7.5- CONSTRUCTION DES LATRINES

Selon les normes établies par le service d'hygiène, la latrine type comprend une fosse, et un plancher en béton reposant sur un support en béton ou en moellon de section de 40 cm par 40 cm. Il comporte une ouverture pour les deux sections et un trou de ventilation surplombé d'un tuyau d'aération d'une hauteur minimale de 3 m.

La latrine doit répondre selon les normes du Service d'hygiène aux caractéristiques du Tableau 7.2.

#### 7.6- CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES PUISARDS ET LATRINES

Le sol est un système effectif de purification des eaux souillées, la zone non-saturée est la plus importante ligne de défense contre la pollution des aquifères. La maximalisation du temps de résidence des effluents dans la zone non saturée est le facteur déterminant dans le déplacement et l'élimination des bactéries et virus. L'obstruction des pores et la formation d'entraves autour des fosses septiques et des latrines contribuent au ralentissement des écoulements, et par conséquence aux processus de déplacement des pathogènes. Il est important d'éviter des charges hydrauliques importantes durant la première période d'usage de la latrine ou de la fosse septique.

**Tableau 7.1: Caractéristiques des puisards (en cm)**

<i>Caractéristiques</i>	P01	P02	P03	P04	P05
<i>Profondeur totale Cm</i>	300	350	400	450	500
<i>Diamètre Cm</i>	100	150	150	150	200
<i>Diamètre du besace Cm</i>	20	20	20	20	20
<i>Epaisseur de couronne Cm</i>	40	65	90	65	90
<i>Epaisseur de masse Cm</i>	100	150	200	250	300
<i>Profondeur de besace Cm</i>	200	200	200	200	200
<i>Envergure pierres poreuses Cm</i>	20	10-20	10-20	10-20	10-20
<i>Epaisseur de base Cm</i>	200	200	200	200	200
<i>Diamètre du chapeau Cm</i>	8	30	30	30	30
<i>Epaisseur du chape-ciment en Cm</i>	5	5	5	5	5
<i>Epaisseur du chapeau Cm</i>	8	8	8	8	8
<i>La profondeur de point de rejet d'eaux usées dans le besace pour tous les plans est de 20 Cm.</i>					
<i>Dimensionnement.</i>					
<i>Pour les plans P02, P01, et P03, à 15 usagers par jour avec une période de restauration de 12 mois.</i>					
<i>Pour les plans P04 et P05, à 30 usagers avec une période de restauration de 12 mois.</i>					

**Tableau 7.2: Caractéristiques des latrines**

<i>Profondeur totale.</i>	200 Cm
<i>Epaisseur du béton de forme.</i>	5 Cm
<i>Section de la fosse.</i>	150 Cm par 150 Cm
<i>Surface du plancher.</i>	230 Cm par 230 Cm
<i>Epaisseur de la dalle de couverture</i>	8 Cm
<i>Ouverture du trou d'éjection.</i>	5 Cm par 15 Cm
<i>Diamètre du conduit et ventilation des fosse</i>	100 Cm
<i>Dimension du pose-pied</i>	30 Cm par 12 Cm par 6Cm
<i>Le dimensionnement est fixé à 30 usagers avec une période de vidange de deux ans.</i>	

La pollution des eaux souterraines est rapide dans les zones où la nappe est peu profonde et dans les zones où la roche fissurée est limitée par un recouvrement non épais. Généralement le risque de pollution fécale des eaux souterraines est minimal quand l'épaisseur du sol non-saturé fin ( $d < 1\text{mm}$ ) sous la base de la latrine est de plus de 2 m, et lorsque la charge hydraulique ne dépasse pas 50 mm/jour.

Les fissures dans les formations consolidées favorisent un mouvement rapide d'effluents vers les eaux souterraines sous-jacentes. Il en est de même pour les macropores, puisque la charge hydraulique est grande et l'infiltration faible. Les bactéries et les virus qui traversent l'interface de la latrine peuvent être immobilisés par adsorption et peuvent survivre dans les sols humides pour de longues périodes. Par suite d'une grande précipitation, on peut observer une augmentation brusque du nombre de micro-organismes entrant dans l'eau souterraine. La migration des pathogènes, s'observe dans les 100 premiers mètres de la zone saturée, et leur extension est fonction de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines.

Il est cependant difficile d'établir la marge de sécurité entre un puits d'approvisionnement en eau et les fosses septiques environnantes, à cause de la complexité des facteurs tel que la perméabilité et le gradient hydraulique qui contrôle la vitesse d'écoulement en zone saturée.

## CHAPITRE 8 CONCLUSION

Au terme de ces travaux, nous pouvons tirer les conclusions suivantes:

Du point de vue hydrogéologique, la nappe quaternaire de Bamako est contenue dans l'aquifère constitué des alluvions, colluvions et formations latéritiques de la vallée du Niger. Cette nappe est continue comme l'attestent les cartes piézométriques, mais n'est pas homogène.

La piézométrie montre un écoulement général vers le fleuve avec un gradient moyen de la nappe de 1,1% en rive gauche et de 1,3% en rive droite. La nappe est plus étendue en rive droite qu'en rive gauche.

Les valeurs des paramètres hydrodynamiques (transmissivité) déterminées lors des pompages d'essai sont faibles et comprises entre  $10^{-4}$  et  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s. Elles sont semblables aux mesures de perméabilité réalisées à l'infiltromètre:  $2 \cdot 10^{-6}$  à  $4 \cdot 10^{-5}$  m/s. Quand à la porosité utile, celle-ci varie de 3% à 25%. Ce sont donc des formations semi-perméables à potentialité hydraulique limitée.

L'étude chimique a montré que la minéralisation totale est faible. Les eaux sont généralement acides. Les faciès sont chlorurés sodiques, bicarbonatés calciques et magnésiens. D'une manière générale, les eaux de la rive gauche sont plus minéralisées que celles de la rive droite. En outre, on note que les eaux les plus minéralisées correspondent aux quartiers les plus anciens et les plus peuplés. Le problème de la présence et de l'origine du fluor se pose, d'autant qu'on sa persistance dans certains puits pendant la saison sèche (Bozola, Niarela, Bagadadji) alors qu'il disparaît dans d'autres. En outre, il apparaît dans de nouveaux puits (Magnambougou, Daoudabougou).

La contamination des eaux souterraines de la nappe de Bamako est générale. Elle est aussi bien chimique que bactériologique. Elle se manifeste chimiquement par une forte concentration en sels dissous, notamment en chlore et nitrate, indicateurs de pollution. La pollution bactériologique est très élevée et préoccupante. Toutes les eaux analysées au niveau de Banconi, Bagadadji, Niarela et Bozola présentent des germes en très forte quantité (E.Coli,

Enterobacter, Streptocoques fécaux, Pneumoniae, etc). Ces concentrations rendent toutes ces eaux impropres à la consommation humaine.

Les causes de cette pollution chimique et bactériologique sont nombreuses:

- mauvaise évacuation des eaux usées. Les infrastructures d'évacuations sont embryonnaires et vétustes, fonctionnant donc très mal. Ainsi les eaux usées stagnent longtemps et s'infiltrent dans la nappe.
- fosses d'aisances et puisards très souvent en relation directe avec la nappe.
- dépôts sauvages d'ordures et de ferrailles.

Ainsi, le problème de la pollution est très préoccupant. Comme solution nous pouvons faire les propositions suivantes:

- à court terme, il faut sensibiliser les populations et les inciter à traiter l'eau des puits avant consommation. En collaboration avec les services de la santé, pourraient être mis au point après contrôle des procédures de traitements (par exemple à l'eau de Javel).

- à moyen terme, l'alimentation des quartiers périphériques pourrait être assurée par des forages profonds captant la nappe du substratum gréseux. Puisque cette nappe est en relation avec la nappe superficielle, il faudrait cependant vérifier sa possible contamination.

- enfin, des mesures doivent être prises pour une meilleure évacuation des eaux usées et une meilleure conception des fosses d'aisance et des puisards, ce qui diminuera la pollution de la nappe superficielle.

## BIBLIOGRAPHIE

- Ag Guidi, A.M., 1975. Etude par modèle analogique de la nappe phréatique du secteur Est de Bamako. Mémoire de fin d'étude E. N. I. Bamako.
- Aljournatt, M., 1989. Etude hydrogéologique de la partie OUEST de la nappe de Bamako (Hamdallaye Lafiabougou Djikoroni). Mémoire de fin d'étude, E.N.I. Bamako, Mali, Décembre 1989.
- Alkaya, S. et O. Touré, 1989. Hydrogéologie de la nappe quaternaire de Bamako (piézométrie et hydrochimie). Projet de fin d'études, Option Géologie, E.N.I., Mali, 68 p.
- Allen, M.J. and S.M. Morrison, 1973. Bacterial movement through fractured bedrock. *Ground Water* 11(2):6-10.
- Appel, C.A., 1976. A Note on Computing Finite Difference Interblock Transmissivities. *Water Res. Res.*, Vol. 12, No. 3, pp. 561-563.
- Azevedo, J.L.T., F. Durst et J.C.F. Pereira, 1988. Comparaison of Strongly Implicit Procedures for the Solution of the Fluid Flow Equations in Finite Difference Form. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 12, No. 1, pp. 51-62.
- Brooks, D. and I. Cech, 1979. Nitrates and bacterial distribution in rural domestic water supplies. *Water Research*, 13:33-41.
- Brynolf, L.V., 1980. Pollution de l'eau et hygiène au Bostwana. Dans: "Les problèmes d'assainissement dans les pays en développement". Compte rendu de Colloque - Lobatsi (Bostwana). CRDI (Centre de Recherches pour le Développement International), Ottawa, Canada. No 168f. pp67-70.
- Caldwell, E.L., and L.W. Parn, 1937. Groundwater pollution and bored hole latrine. Field research Laboratory of Alabama State Departement of Health Andalousia.
- Carrere, J. M., 1972. Stratigraphie des formations gréseuses attribuées au protérozoïque supérieur de la région de Bamako, Mali B. S. G. F (7), XIV.
- Carrere, J. M., 1975. Le Mali géologique dans son contexte Ouest Africain. Cours E. C. I. C. A. (Mali)
- Castany, G. 1967. Principes et méthodes de l'hydrogéologie.
- Cissé, D. et Y. Singare, 1990. Etude hydrogéologique de la nappe quaternaire de Bamako. Projet de fin d'études, Option Géologie, E.N.I., Mali, 54 p.
- CNREX. Données de sondage géotechnique à Bamako.
- CRDI, 1980 "Le problème d'assainissement dans les pays en développement". Colloque du 14 au 20 Aout 1980 - Lobatsi Bostwana. (Centre de Recherches pour le Développement International), Ottawa, Canada. No 168f.

- Dars, R., 1960. Les formations sédimentaires et les dolérites du Soudan Occidental (Afrique de l'Ouest). Thèse de doctorat es sciences Paris.
- Diallo M. Y., 1987. Etude de la nappe phréatique de Badalabougou à Bako Djikoroni. Projet de fin d'Etudes E. N. I. -Bamako.
- D.N.H.E. Données de forages d'eau dans la ville de Bamako.
- Fraser, P., Chilvers, C., Beral, V. and M.J. Hill, 1980. Nitrate and human cancer: a review of the evidence. *Int. Journal of Epidemiology*, 9(1):3-11.
- Freeze, R.A. et J.A. Cherry, 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 604 p.
- Hagedorn, C., Hansen, D.T., and G.H. Simonson, 1978. Survival and movement of fecal indicator bacteria in soil under conditions of saturated flow. *J. Environ. Qual.* 7(1):55-59.
- Jusserand, D., 1976. Preliminary isotopic (O18/O16) data of some water in Republic of Mali. *Journal Hydrology*, 28: 87-89.
- Katzenelson, E., 1979. Survival of virus. In: Berg G. [ed.] "Indicators of viruses in water and food pp.39-50. Ann Arbor Science, Michigan.
- Koita, O., 1987. Etude piezométrique et chimique de la nappe phréatique entre Magnambougou et Badalabougou Projet de fin d'Etudes E. N. I. , Bamako.
- Kudryavtseva, B.M., 1972. An experimental approach to the establishment of zones of hygienic protection of underground water sources on the basis sanitary bacteriological indices. *Journal of Hygiene, Epidemiology, Microbiology and Immunology.* 16:503-511.
- Lewis, J.W., Foster, S.S., and B.S. Drasar, 1980. The risk of groundwater pollution by on-site sanitation in developing countries. International Reference Centre for Wastes Disposal, Report No 01/1982, Duebendorf, Switzerland.
- MacDonald, M.G. et A.W. Harbaugh, 1984. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groud-water Flow Model. U.S. Geological Survey, Open-File Report 83-875.
- Neuman, S.P., 1973. Calibration of Distributed Parameter Groundwater Flow Models Viewed as a Multiple-Objective Decision Process Under Uncertainty. *Water Resources Research*, Vol. 9, pp. 1006-1021.
- Reisenauer, E., K.T. Key, T.N. Narasimhan and R.W. Nelson, 1982. TRUST: A Computer program for Variably Saturated Flow in Multidimensional, Deformable Media. NUREG/CR-2360 PNL-3975 RU.
- Sanogo F.F., 1987. Etude chimique et pollution de la nappe phréatique des environs du Banconi. Mémoire de fin d'étude, E.N.I. Bamako, Mali, Décembre 1987.
- Sibiya, J.B., 1980. Les services sanitaires et la transmission des maladies. Dans: "Les problèmes d'assainissement dans les pays en développement". Compte

- rendu de Colloque - Lobatsi (Bostwana). CRDI (Centre de Recherches pour le Développement International), Ottawa, Canada. No 168f. pp65-66.
- Sidibé, M. R., 1987. Etude piezométrique et chimique de la nappe phréatique de Bamako en rive gauche du Niger Projet de fin d'Etude E. N. I. , Bamako.
- Stone, H.L., 1968. Iterative Solution of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations. SIAM j. Numer. Anal., Vol. 5, No. 3, pp. 530-559.
- Subrahmanyam, K., and T.R. Bhaskaran, 1950. The risk of groundwater pollution from borehole latrines. The Indian Medical Gazette 85:418-420.
- Traoré, A. Z., 1985. Géologie et hydrogéologie des plateaux Mandingues(Mali) Région de Koula Nonsombougou. Thèse de doctorat 3eme cycle U. S. M. Grenoble (France)
- Travi, Y. et G. Oller, 1980. Contribution à l'étude hydrogéologique des environs de Bamako: Bulletin de l'I.F.A.N. 42-A(1).
- Trescott, P.C. et S.P. Larson, 1977. Solution of Three-Dimensional Groundwater Flow Equations using the Strongly Implicit Procedure. Journal of Hydrology, vol. 35, pp. 49-60.
- Waltz, J.P., 1972. Methods of geologie evaluation of pollution potential at mountain home sites. Ground Water. 10(1) 42-49.
- Weinstein, H.G., H.L. Stone et T.V. Kean, 1969. Iterative Procedure for Solution of Systems of Parabolic and Elliptic Equations in Three Dimensions. Indus. Engineering Chemistry Fundamentals, Vol. 8, No. 2, pp. 281-287.
- World health organisation, 1979. Human viruses in water, wastewater and soil. WHO technical report series No 639. WHO. Geneva.
- World Health organisation, 1978: Nitrates, Nitrites, and N-Nitroso compounds. Environmental Health Criteria 5. WHO Geneva.