



HAL
open science

Géologie et hydrogéologie des plateaux Mandingues (Mali) : région de Koula-Nossombougou

Amadou Zanga Traore

► **To cite this version:**

Amadou Zanga Traore. Géologie et hydrogéologie des plateaux Mandingues (Mali) : région de Koula-Nossombougou. Géologie appliquée. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1985. Français. NNT: . tel-00783566

HAL Id: tel-00783566

<https://theses.hal.science/tel-00783566>

Submitted on 1 Feb 2013

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

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



TRAORE (A.2.)
Ex. n° 1

T H E S E
PRÉSENTÉE À
L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE
DE GRENOBLE

17 OCT. 1985

POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE 3ÈME CYCLE
DE GÉOLOGIE APPLIQUÉE (HYDROGÉOLOGIE)

PAR AMADOU ZANGA TRAORE

UNIVERSITE DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL. (76) 87.46.42

25 AOÛT 2003

GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

DES PLATEAUX MANDINGUES (MALI)

RÉGION DE KOULA-NOSSOMBOUGOU

α

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tel. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail: ptalour@ujf-grenoble.fr

Soutenu le 02 octobre 1985 devant la commission d'examen :

R. BARBIER	Professeur émérite, USMG	Président
J. SARROT-REYNAULD	Professeur, USMG	Rapporteur
M. DRAY	Assistant, Université Paris VI	Examinateur
G. ZAMOLO	Ingénieur géologue, B.R.G.M.	Examinateur

RESUME

La région de Koula-Nossombougou située à environ une centaine de kilomètres au Nord de Bamako fait partie du grand ensemble géomorphologique que constituent les Plateaux Mandingues.

L'étude géologique : coupes d'affleurement et de forage a permis d'y individualiser une série constituée de formations gréso-schisteuses dans lesquelles s'intercale un niveau de calcaires surmontés de jaspes et à laquelle nous avons donné le nom de la région.

La présence de ce niveau de calcaires et de jaspes a conduit à rattacher la série de Koula-Nossombougou à la série de Nara, cambrienne, dont elle serait séparée par le "seuil" précambrien de Kolokani-Banamba.

Les formations de la série de Koula-Nossombougou ne doivent leurs capacités aquifères qu'à la présence d'un réseau dense de fracturations et surtout à celle d'importantes intrusions de dolérites. La mise en place fissurale de ces dernières a provoqué l'élargissement des fractures et la fissuration des zones de contact favorisant l'infiltration et la circulation des eaux.

Les aquifères sont discontinus et présentent une forte hétérogénéité verticale avec la stratification des zones perméables donnant naissance à des nappes semi-captives à captives.

Le niveau des calcaires et des jaspes constitue le principal aquifère.

L'implantation des forages nécessite la mise en oeuvre de méthodes de prospections géophysiques : électrique, magnétique.

La complexité du mode d'infiltration et de circulation se reflète dans la minéralisation, la composition isotopique des eaux, ainsi que les pompages d'essai.

Malgré le déficit pluviométrique de ces dernières années, les nappes se rechargent annuellement.

MOTS-CLES

Plateaux Mandingues, série de Koula-Nossombougou, calcaires-jaspes, dolérites, aquifère fissuré, prospection géophysique, hydrodynamique, géochimie, isotope, recharge.

17 OCT. 1985

UNIVERSITE DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE-GIGNOUX
E 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL (76) 87.46.43

T H E S E
PRÉSENTÉE À
L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE
DE GRENOBLE

17 OCT. 1985

POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE 3ÈME CYCLE
DE GÉOLOGIE APPLIQUÉE (HYDROGÉOLOGIE)

PAR AMADOU ZANGA TRAORE

GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

DES PLATEAUX MANDINGUES (MALI)

RÉGION DE KOULA-NOSSOMBOUGOU

UNIVERSITE DE GRENOBLE
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL (76) 87.46.43

Soutenue le 02 octobre 1985 devant la commission d'examen :

R. BARBIER	Professeur émérite, USMG	Président
J. SARROT-REYNAULD	Professeur, USMG	Rapporteur
M. DRAY	Assistant, Université Paris VI	Examineur
G. ZAMOLO	Ingénieur géologue, B.R.G.M.	Examineur

10081884

AVANT-PROPOS

Cette page est une formalité à laquelle je me soumetts volontiers, d'autant plus que la réalisation de ce travail n'a été possible que grâce à l'effort et à la collaboration de nombreuses personnes et organismes.

Il me faudrait en fait plusieurs pages pour les citer tous, mais l'usage m'impose quelques lignes.

Que ceux qui ne verront donc pas leur nom ici veuillent bien m'excuser.

Mes premiers remerciements vont au Professeur J. SARROT-REYNAULD, qui, après m'avoir accepté dans son Laboratoire m'a encouragé à traiter d'un sujet sur le Mali. Sans ses efforts, critiques et conseils et surtout la chaleur toute africaine que j'ai eue auprès de lui, ce travail n'aurait probablement pas abouti. Je lui exprime toute ma gratitude.

Je remercie également :

Monsieur le Professeur R. BARBIER pour l'honneur qu'il me fait de présider ce jury ;

Monsieur M. DRAY de l'Université de Paris VI pour les dosages isotopiques et sa présence pour juger ce travail ;

Monsieur M. ZAMOLO du B.R.G.M. pour avoir accepté de faire partie de ce jury ;

Les Directions de l'Hydraulique et de l'Energie et du projet PNUD du Mali ont mis à ma disposition les informations et la logistique nécessaire à mon travail. Je remercie tout particulièrement :

Monsieur A. GUERRE, Hydrogéologue du PNUD avec lequel j'ai défini l'orientation de cette étude. Ses efforts dans la recherche hydrogéologique au Mali ont acquis mon admiration et je regrette aujourd'hui qu'il ne soit présent parmi nous ;

Monsieur S. TOGOLA, Hydrogéologue à la D.N.H.E. pour nos discussions enrichissantes et son "acharnement" sur la dolérite.

Je remercie également tout le personnel de l'atelier de forage A.C.II et des équipes de pompage d'essai et de géophysique pour les moments inoubliables passés ensemble.

Je n'oublierai pas mon "esclave" OUATA qui, malgré son âge, m'a tenu compagnie au cours de mes itinéraires géologiques.

Mes derniers mots vont à mes parents et amis qui m'ont de tout temps soutenu et encouragé et qui ont accepté cette longue séparation; ainsi qu'à mes camarades de l'Institut Dolomieu et à toutes celles qui ont dactylographié mon manuscrit.

A tous je dis MERCI.

UNIVERSITE DE GRENOBLE
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MARIUS GIBON
38001 GRENOBLE CEDEX
TÉL. 0438 254613

de l'élément
logique que
à permis d'
schématisme
de jasper et

à l'attacher
dont elle sert

leurs regards
travaux et
ainsi en plus
des fractures
très et la

Les
peut servir
raisonnés à de

Le
équifère.

l'él
nécessaire de p

la
reflète dan
ainsi que les

et
les rapses et

Notes liés à
équifère, f
isotope, rare

"Loin d'être un accessoire dans la Science,
l'Hypothèse est le but, l'âme et la vraie
consistance des constructions scientifiques,
changeante, fragile, mais progressive comme
la Vie".

P. TEILHARD DE CHARDIN

Je dédie ce travail à la mémoire de Kadia.

RESUME

La région de Koula-Nossombougou située à environ une centaine de kilomètres au Nord de Bamako fait partie du grand ensemble géomorphologique que constituent les Plateaux Mandingues.

L'étude géologique : coupes d'affleurement et de forage a permis d'y individualiser une série constituée de formations grésoschisteuses dans lesquelles s'intercale un niveau de calcaires surmontés de jaspes et à laquelle nous avons donné le nom de la région.

La présence de ce niveau de calcaires et de jaspes a conduit à rattacher la série de Koula-Nossombougou à la série de Nara cambrienne dont elle serait séparée par le "seuil" précambrien de Kolokani-Banamba.

Les formations de la série de Koula-Nossombougou ne doivent leurs capacités aquifères qu'à la présence d'un réseau dense de fracturations et surtout à celle d'importantes intrusions de dolérites. La mise en place fissurale de ces dernières a provoqué l'élargissement des fractures et la fissuration des zones de contact favorisant l'infiltration et la circulation des eaux.

Les aquifères sont discontinus et présentent une forte hétérogénéité verticale avec la stratification des zones perméables donnant naissance à des nappes semi-captives à captives.

Le niveau des calcaires et des jaspes constitue le principal aquifère.

L'implantation des forages nécessite la mise en oeuvre de méthodes de prospections géophysiques : électrique, magnétique.

La complexité du mode d'infiltration et de circulation se reflète dans la minéralisation, la composition isotopique des eaux, ainsi que les pompages d'essai.

Malgré le déficit pluviométrique de ces dernières années, les nappes se rechargent annuellement.

Mots clés : série de Koula-Nossombougou, calcaires-jaspes, dolérites, aquifère fissuré, prospection géophysique, hydrodynamique, géochimie, isotope, recharge, Plateaux Mandingues.

INTRODUCTION

La sécheresse qui sévit en zone sahélienne depuis deux décennies et qui touche aujourd'hui des régions d'Afrique autrefois très humides, a entraîné une pénurie d'eau avec la diminution progressive des ressources traditionnelles (cours d'eau permanents, nappes phréatiques).

La nécessité de la recherche et de l'exploitation des eaux souterraines s'est alors imposée comme solution aux difficultés d'approvisionnement en eau des zones rurales et urbaines.

Au Mali, ces actions ont été confiées à différents organismes étrangers, internationaux et religieux dont le P.N.U.D. avec lequel nous avons travaillé.

La zone d'intervention du projet PNUD qui couvre environ 43000 km² dans le Sahel malien au Nord de Bamako est mise à profit depuis une dizaine d'années pour effectuer des recherches méthodologiques.

L'expérience acquise et le volume des travaux exécutés (environ 1500 forages) permettent de faire aujourd'hui un premier point des connaissances dans le domaine de l'hydrogéologie.

C'est cette synthèse que nous tenterons de faire dans la zone de Koula-Nossombougou où étaient concentrées les activités de la campagne 1983-1984.

Nous aurons à aborder les différents aspects de la recherche et de l'exploitation des eaux souterraines : géologie, hydrogéologie, méthodes de prospection, paramètres hydrodynamiques, chimie et isotopes des eaux, ressource en eau.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LE MALI

1.1. CADRE PHYSIQUE

1.2. GEOLOGIE

1.3. HYDROGEOLOGIE

C h a p i t r e I

GENERALITES SUR LE MALI

1.1. CADRE PHYSIQUE1.1.1. Situation géographique - Relief

Le Mali couvre une superficie de 1 204 000 km² s'étendant entre les latitudes 10° à 25° Nord et les longitudes 12° Ouest et 4° Est (fig. 1). Il est enclavé à l'intérieur de l'Afrique de l'Ouest, limité par l'Algérie au Nord et Nord-Est, le Niger à l'Est, le Burkina Faso au Sud-Est, la Côte d'Ivoire et la Guinée au Sud, le Sénégal et la Mauritanie à l'Ouest.

Le relief est assez monotone, constitué de plateaux gréseux de faible altitude dominant de vastes étendues de plaines sablonneuses.

Les plateaux sont généralement recouverts par des cuirasses latéritiques et sont limités par des falaises rectilignes aux pentes très abruptes. Ce sont les Plateaux mandingues au Sud-Ouest qui prolongent le massif du Fouta-Djallon en Guinée. Leur altitude dépasse rarement 600 m. Au Sud-Est les Plateaux Dogons avec la falaise pittoresque de Bandiagara. Ils sont relayés vers l'Est par une succession de buttes et de collines dont la butte de Hombori qui constitue le point culminant du Mali avec 1 555 m d'altitude.

Ces plateaux sont bordés au Nord par de grandes plaines en partie ensablées (plaine du delta intérieur).

Plus au Nord s'étendent de grands ergs jusqu'aux confins algéro-maliens et mauritaniens.

L'Adrar des Iforas à l'extrême Nord-Est constitue une apophyse des massifs cristallins du Hoggar.

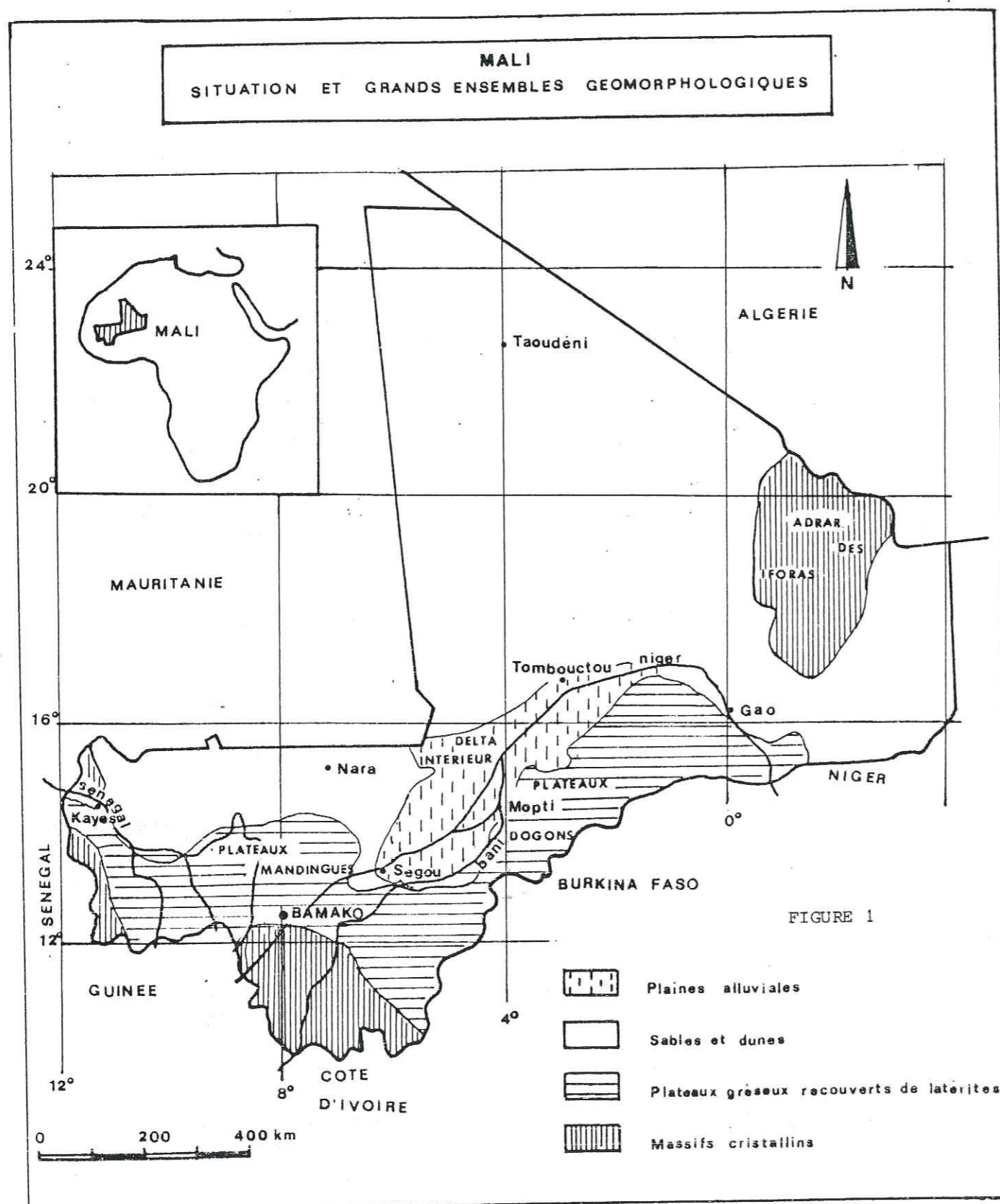
1.1.2. Climat - Végétation

Le Mali est situé dans la zone climatique inter-tropicale caractérisée par l'alternance de deux saisons très contrastées : la saison sèche et la saison des pluies ou hivernage.

L'évolution des saisons au cours de l'année dépend de la position relative des deux masses d'air principales qui soufflent sur l'Afrique de l'Ouest :

- l'air tropical continental chaud et sec venant de l'Est ou du Nord-Est appelé Harmattan ;
- l'air équatorial maritime venant du Sud-Ouest ou Mousson.

La surface de contact entre ces deux masses d'air constitue le Front Inter-Tropical ou F.I.T. ; elle est légèrement inclinée sur les parallèles. C'est au Sud du F.I.T., dans la masse d'air de la mousson, que se produisent des formations orageuses donnant souvent lieu à des précipitations.



Au cours de l'année, le F.I.T. se déplace du Sud au Nord et revient au Sud. Ainsi, au mois de Janvier il situe au Sud de la Côte d'Ivoire, il remonte lentement vers le Nord à partir de Février-Mars atteignant l'extrême Sud du Mali vers Avril-Mai. En Août il est au niveau de Tombouctou. Il redescend à partir de Septembre pour atteindre sa position de départ en Janvier.

Ce mouvement de balancier explique le contraste climatique entre le Nord et le Sud du Mali. Ainsi, on distingue :

- la zone saharienne où les précipitations sont rares (moins de 100 mm par an) ;

- la zone sahélienne limitée au Sud par l'isohyète 700 mm. Elle se caractérise par une longue saison sèche de 8 à 9 mois. Le nombre de jours de pluie ne dépassant pas 30 jours par an. C'est la zone des épineux et des graminés (cram-cram) passant progressivement à une couverture herbacée vers le Sud ;

- la zone soudanienne comprise entre les isohyètes 1300 et 700 mm. La durée de l'hivernage est de 4 à 6 mois. La végétation y est dense avec l'apparition de grands arbres, karité, néré, caïlcédrat etc.

La sécheresse qui sévit dans la zone sahélienne depuis plus d'une décennie a pour conséquence un décalage des isohyètes vers le Sud rendant au domaine saharien et sahélien des surfaces de plus en plus étendues.

1.1.3. Hydrographie

Le système hydrographique du Mali est constitué par les bassins du Haut-Sénégal et du Niger-Moyen.

Sénégal. Long de 1700 km, il a la moitié de son cours au Mali. Il prend sa source au Fouta-Djallon en Guinée ; son cours supérieur appelé Bafing reçoit le Bakoye et le Baoulé en rive droite. A l'aval de Kayes, il est grossi par la Falémé qui forme la frontière avec la République du Sénégal. Le fleuve Sénégal n'est pas navigable sur son trajet au Mali. La construction du barrage de Manantali permettra l'irrigation des plaines alluviales.

Niger. Il prend aussi sa source en Guinée et traverse le Mali du Sud-Ouest à l'Est sur 1700 km.

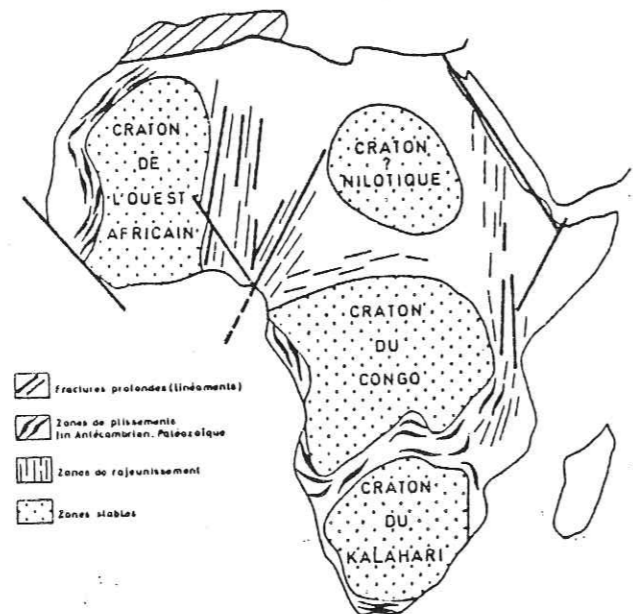
Son principal affluent amont est le Sankarani sur lequel est construit le barrage de Sélingué qui fournit Bamako en électricité.

A la sortie des plateaux mandingues à l'aval de Koulikoro, sa vallée s'élargit progressivement, puis à partir de Ké-Macina se transforme en une vaste plaine alluviale inondée en hautes eaux, formant le Delta intérieur qui se termine près de Tombouctou. A l'entrée du delta, près de Mopti, le Niger est grossi par le Bani et ses différents affluents Bafing, Banifing, Bagoé.

De Tombouctou aux rapides de Labbezanga à la frontière du Niger, le fleuve décrit une vaste boucle dans une zone sablonneuse et désertique entrecoupée par le seuil rocheux de Tossaye.

STRUCTURES D'ENSEMBLE DE L'AFRIQUE
(Carte extraite de G. ROCCI, 1965)

FIG. 2



En raison de l'extension de son cours, de la configuration morphologique de sa vallée et des régimes climatiques qu'il traverse, le régime du Niger est variable dans ses différents tronçons au Mali. A Koulikoro, la crue se situe en Septembre, à Mopti à l'entrée du delta, elle se produit en fin Octobre et en Décembre à la sortie du delta (Kabara). A Gao, les hautes eaux sont atteintes en Janvier.

A Koulikoro, le débit moyen du Niger est de $1550 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un débit de crue de $5290 \text{ m}^3/\text{s}$ et un débit d'étiage de $70 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le Niger compte deux grands biefs navigables séparés par des seuils rocheux : Kouroussa en Guinée à Bamako (374 km) et de Koulikoro à Ansonjo (1400 km). La navigation se faisant uniquement en période de hautes eaux.

1.2. GEOLOGIE

1.2.1. Introduction

L'histoire géologique du Mali se confond avec celle de craton Ouest africain et de sa couverture (fig.3)

Le craton Ouest africain est l'un des quatre grands cratons occupant le continent et qui sont séparés par des zones mobiles. Il a été façonné au cours de deux cycles géologiques principaux :

- le cycle libérien anté 3000 - 2500 Ma ;
- le cycle birrimien 2500 - 1800 + 250 Ma.

L'orogénie éburnéenne (1800 + 250 Ma) qui constitue la fin du cycle birrimien a affecté toutes les roches formées depuis le cycle libérien (BESSOLES, 1977).

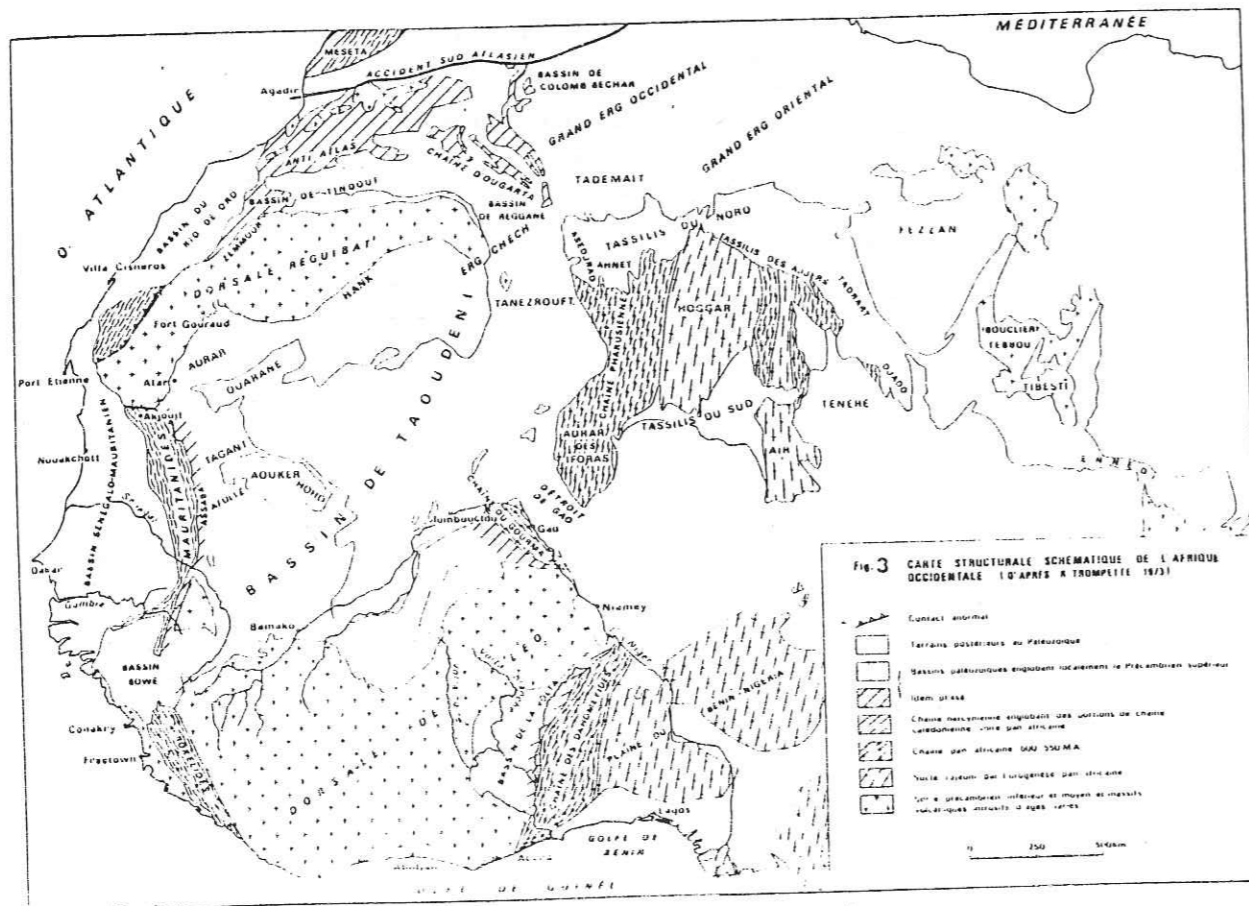
Une phase d'érosion et de pénéplation suit l'orogénie éburnéenne puis s'installe une période de sédimentation autour de 1000 Ma qui se poursuit jusqu'au Carbonifère. Les dépôts de type marin de plate-forme épicontinentale avec un caractère marin plus prononcé vers les bordures du craton se font dans trois bassins principaux : Tindouf, Taoudéni, Volta.

Au Précambrien terminal, l'orogénie pan-africaine (690-620 Ma) remobilise les bordures du craton ainsi que leur couverture. Postérieurement à une période d'érosion, un inlandsis s'installe sur l'aire continentale marquée par un dépôt glaciaire : "tillite".

A la fin de l'Ordovicien, il se produit une seconde glaciation à la suite d'une succession de phénomènes comparable à celle de la fin du Précambrien.

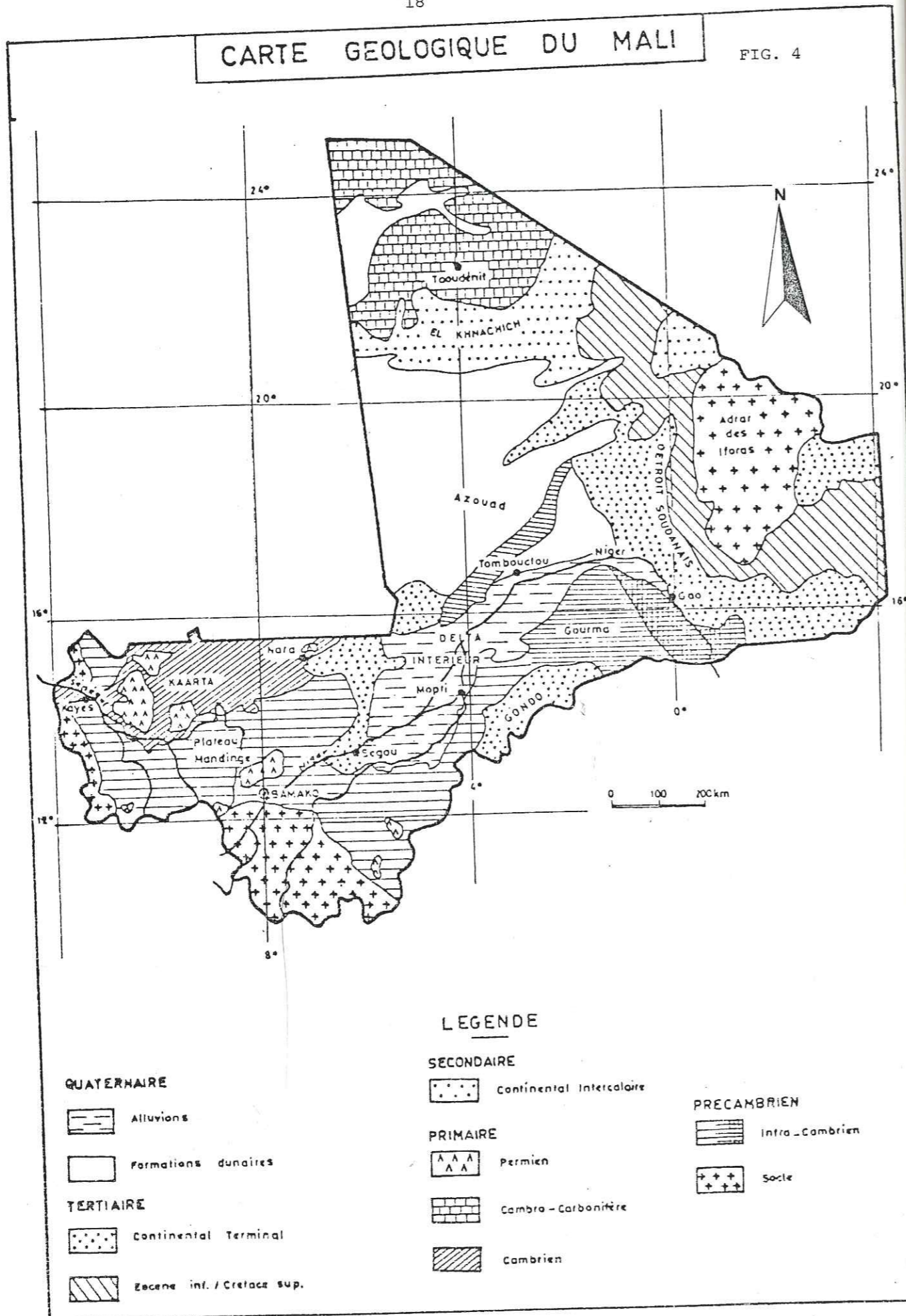
Ces deux dépôts glaciaires connus sous les noms de "tillite inférieure" et de "tillite supérieure" servent de marqueurs lithostratigraphiques des formations Précambrien et Paléozoïque, généralement azoïques.

D'importantes intrusions basiques affectent le craton et sa couverture. Elles se sont mises en place à des périodes allant du Précambrien inférieur au Paléozoïque.



CARTE GEOLOGIQUE DU MALI

FIG. 4



A l'exception des bassins côtiers et de quelques rares régions continentales où subsiste au Secondaire et au Tertiaire une sédimentation marine, le reste de l'Afrique de l'Ouest est soumis à des conditions continentales depuis le Carbonifère supérieur. Le Continental intercalaire ou terminal et les recouvrements sableux ou latéritiques quaternaires constituent les témoins de cette période.

Tous ces ensembles géologiques sont plus ou moins bien représentés au Mali (fig. 4).

1.2.2. Formations du socle

Le cratón est représenté par les fenêtres de Kayes et de Kéniéba à l'Ouest, l'extrémité nord de la dorsale du Man au Sud. Il affleure aussi au Nord-Est dans l'Adrar des Iforas où il a subi en même temps que les formations infracambriennes la remobilisation de l'orogénèse pan-africaine.

Ce sont des granites d'origine et de compositions minéralogiques diverses, ainsi que d'anciens sédiments plissés et métamorphisés : gneiss, micaschistes, quartzites.

1.2.3. Formations sédimentaires

Les formations sédimentaires occupent plus des 2/3 de la superficie du pays. Elles se sont déposées dans la vaste synclise de Taoudéni.

1.2.3.1. Infracambrien et Paléozoïque

- L'Infracambrien affleure en une large auréole sur la bordure sud du bassin de Taoudéni, en discordance majeure sur les formations du socle. Il est représenté par des formations à dominante gréseuse. L'épaisseur est très variable, de 600 m au Sud et Sud-Est, elle augmente vers l'Est pour dépasser 8000 m au Gourma où les faciès deviennent plus schisteux avec des intercalations grés-quartzitiques et calcaires. Au Gourma, les formations infracambriennes ont été plissées et en partie métamorphisées lors de l'orogénèse pan-africaine.

- Le Paléozoïque est surtout présent à l'Ouest, à la frontière avec la Mauritanie, et au Nord. Il est constitué de pélites à passées de calcaires, de grès feldspathiques dans le fossé de Nara, d'âge supposé cambrien, postérieur à la tillite "éocambrienne" (ZIMMERMANN, 1960). Au Nord, il comporte les grès et schistes du Cambro-Silurien, les schistes calcaires et bitumineux du Dévonien, les grès et calcaires du Carbonifère.

1.2.3.2. Post-Paléozoïque

- Le Continental intercalaire est représenté par des dépôts grésosableux avec des passées conglomératiques et d'argiles barriolées. Il affleure au Nord, Nord-Est et à l'Ouest du pays. Les travaux géophysiques montrent que les formations du continental intercalaire pourraient atteindre 500 à 1000 m d'épaisseur. La série est supposée Jurassique par la présence de *Brachyocylon* (BASSOT et al., 1981).

- Le Crétacé supérieur et l'Eocène inférieur sont représentés par des sédiments marins localement lagunaires dans le détroit soudanais, le bassin des Iullemeden et en bordure de l'Adrar des Iforas. Les faciès calcaires et marno-calcaires sont prédominants à la base ; la partie supérieure est constituée de sédiments sableux, sablo-argileux d'origine lagunaire ou continentale.

- Le Continental terminal d'âge oligo-mio-pliocène est formé de grès et de sables peu consolidés. Il affleure dans le fossé de Nara où il recouvre le continental intercalaire dans le bassin des Iullemeden, le Gourma et le détroit soudanais où il fait suite sans discontinuité au Paléocène marin. Son épaisseur varie de quelques dizaines de mètres dans le fossé de Nara, à plus de 1000 mètres dans le détroit soudanais.

- Le Quaternaire a été marqué par de profonds changements de climat qui ont eu pour conséquence la latéritisation, la silicification et la formation de sebkas.

. Les latérites et cuirasses ferrugineuses se sont surtout développées sur les plateaux gréseux et sur le socle. Elles sont d'âge varié, les plus anciennes étant probablement Eocène.

. Les tufs lacustres et les dépôts de sebkas se rencontrent localement en zone saharienne et nord-sahélienne. Les plus connus sont les salines de Taoudéni exploités depuis le Moyen-Âge.

. Les alluvions quaternaires occupent la cuvette nigérienne et au Nord du 14° parallèle s'étendent de vastes superficies de sables dunaires fixés ou mobiles.

1.2.4. Tectonique

Le bassin de Taoudéni est resté en marges des mouvements orogéniques depuis le Précambrien supérieur. Il présente de ce fait une structure assez simple avec les formations récentes affleurant au centre et des pendages centripètes qui excèdent rarement 1°. Au Mali la bordure Est a été impliquée dans les phénomènes orogéniques du pan africain. C'est ainsi que la partie inférieure de la couverture est plissée et métamorphisée dans le Gourma.

Cependant, le socle rigide a été le siège de mouvements épi-orogéniques qui se manifestent par une tectonique cassante plus ou moins active. Ces fractures ont servi de cheminement aux intrusions basiques dans le socle et la couverture. Leur mise en place provoque des rebroussements et une fracturation dans les formations sédimentaires.

1.3. HYDROGÉOLOGIE

1.3.1. Historique des recherches

Les premières études hydrogéologiques furent entreprises par le service hydraulique de l'A.O.F. avec des inventaires de points d'eau, l'exécution de puits et de quelques forages de reconnaissance. Ces travaux et études ont été synthétisés dans la carte hydrogéologique du Soudan (J. ROURE, 1957).

Après l'indépendance (1960), les recherches ont plus particulièrement concerné certaines régions du pays : Gourma, Nord du bassin de Taoudéni, plaine du Gondo. Mais, tous ces travaux avaient pour but des études géologiques, l'hydrogéologie n'étant abordée qu'en compléments et se limitant presque à des inventaires de points d'eau.

Ce n'est qu'à partir de 1967 que l'accent a été mis sur l'hydrogéologie avec la mise en place du projet PNUDMI/67/507. Le projet avait pour mission le "renforcement des Services Gouvernementaux chargés de découvrir et de mettre en valeur les Eaux Souterraines".

A la suite de la sécheresse qui sévit dans la zone soudano-sahélienne depuis le début de la dernière décennie, les activités hydrogéologiques se sont accrues. Il a fallu rapidement passer de la phase de reconnaissance à la phase d'exploitation ; tout en mettant au point une méthodologie de recherche et d'exécution des ouvrages adaptées aux conditions hydrogéologiques.

Au projet PNUD sont venus s'ajouter plusieurs autres projets dont les plus importants sont Mali Aqua Viva (O.N.G.), Helvetas (Suisse).

A partir de 1974 le gouvernement malien a mis en place "l'Opération puits" chargée de l'exécution des ouvrages de grand diamètre, en même temps que plusieurs projets de développement agricole incluaient dans leur programme un volet d'hydraulique villageoise ou pastorale.

Ainsi, près de 4300 forages et 900 puits modernes étaient exécutés par les différents projets en Juillet 1982.

Ces travaux ont permis un progrès considérable de la connaissance hydrogéologique du territoire.

1.3.2. Principaux aquifères

Les ressources en eau souterraine du Mali sont contenues dans deux types d'aquifères : les aquifères relativement homogènes à perméabilité intergranulaire et de grande extension et les aquifères discontinus à perméabilité d'origine fissurale. Les premiers sont localisés dans les formations du Continental intercalaire et terminal tandis que les autres le sont dans le socle et les formations infracambriennes et paléozoïques.

Si la majeure partie des réserves est connue dans les aquifères généralisés, la presque totalité de la population et de l'activité économique du pays est concentrée dans la zone des aquifères discontinus.

1.3.2.1. Aquifères discontinus

. Formations cristallines du socle. Les ressources en eau de ces formations sont essentiellement connues dans le Sud du pays. Les zones aquifères sont localisées dans les fractures du substratum sain et dans les arènes grenues. Les perméabilités sont faibles et dépendent du degré de fracturation et surtout de l'importance de la fraction argileuse associée aux arènes et à l'épaisseur de celles-ci. Les débits des ouvrages de captage sont de l'ordre du m³/h à 20 m³/h dans les cas les plus favorables. Les eaux sont généralement de bonne qualité chimique avec un résidu sec inférieur à 0,5 g/l et des pH compris entre 5,5 et 7,7. Les conditions pluviométriques favorables (1200-2000 mm/an) assurent une recharge saisonnière des zones aquifères.

Formations sédimentaires de l'Infracambrien et du Paléozoïque

Les caractéristiques hydrogéologiques de ces formations sont liées à la nature lithologique qui détermine la compétence à la fracturation.

- Les séries gréseuses à granulométrie très variable sont généralement en disposition tabulaire sous recouvrement latéritique (Plateau gréseux). Elles constituent un ensemble aquifère multicouches avec des zones perméables stratifiées, associées à certains bancs plus fissurés ou à perméabilité intergranulaire, qui sont mises en relation par les réseaux de fracturation subverticales ou les joints de stratification. Les intrusions doléritiques qui ont cheminé par ces fractures ont contribué à la fissuration de certains niveaux. Elles jouent un double rôle hydrogéologique : barrière étanche ou zone de circulation privilégiée.

Malgré cette hétérogénéité horizontale et verticale, les zones aquifères peuvent avoir localement une grande extension (ex. : Plateau Mandingue).

Le recouvrement latéritique est généralement le siège d'une nappe à surface libre qui peut être en relation hydraulique plus ou moins directe avec l'aquifère sous-jacent.

Les perméabilités sont très variables et sont fonction du degré de fracturation. Les transmissivités sont comprises entre 1×10^{-4} et $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Les débits peuvent atteindre $100 \text{ m}^3/\text{h}$ dans certains cas très favorables (Koutiala).

Les eaux sont peu chargées en sels minéraux avec un résidu moyen de $0,3 \text{ g/l}$.

L'alimentation se fait par l'infiltration des précipitations à travers les fissures du substratum affleurant ou de la nappe superficielle sus-jacente qui joue alors le rôle de réservoir tampon.

- Les séries schisteuses sont très peu perméables. Les aquifères sont liés aux intrusions de dolérites (série de Nara) ou aux intercalations de niveaux calcaires et gréseux de la série plissée du Gourma. Ils sont très discontinus et les débits atteignent rarement $15 \text{ m}^3/\text{h}$. Les transmissivités sont comprises entre 1×10^{-6} et $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Le pH est toujours basique et les eaux sont moyennement chargées en sels minéraux avec des résidus secs inférieurs à 1 g/l . Cependant, certaines eaux ont une salinité qui atteint 17 g/l (Nara), avec de fortes concentrations en Nitrates (2500 ppm).

Ces aquifères situés en zone sahélienne ont une alimentation limitée mais non négligeable.

1.3.2.2. Aquifères continus

- Le Continental intercalaire et terminal renferment les plus importantes réserves en eau du Mali. Ces aquifères sont peu connus du fait de leur situation en zone nord-sahélienne et saharienne ; ils ne sont exploités que par quelques forages et puits pastoraux.

Les transmissivités sont généralement élevées ($1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ à Nara) et les eaux de bonne qualité chimique.

Dans le détroit soudanais la nappe du Continental terminal serait saumâtre vers 200 m de profondeur d'après les prospections géophysiques.

- Les formations de recouvrement renferment des nappes locales à perméabilité moyenne, uniquement exploitables par des puits de grand diamètre.

La plus importante est celle des dépôts alluviaux dans le delta central difficile à séparer de la nappe du Continental terminal. La nappe des formations latéritiques est largement exploitée par les villageois et les pasteurs des zones sahéliennes et soudaniennes. Elle joue généralement le rôle de réservoir tampon pour l'alimentation de la nappe de fissure sous-jacente.

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
 MAISON DES GEOSCIENCES
 DOCUMENTATION
 B.P. 53
 F. 38041 GRENOBLE CEDEX
 Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
 Mail: ptalour@ujf-grenoble.fr

25 AOUT 2003

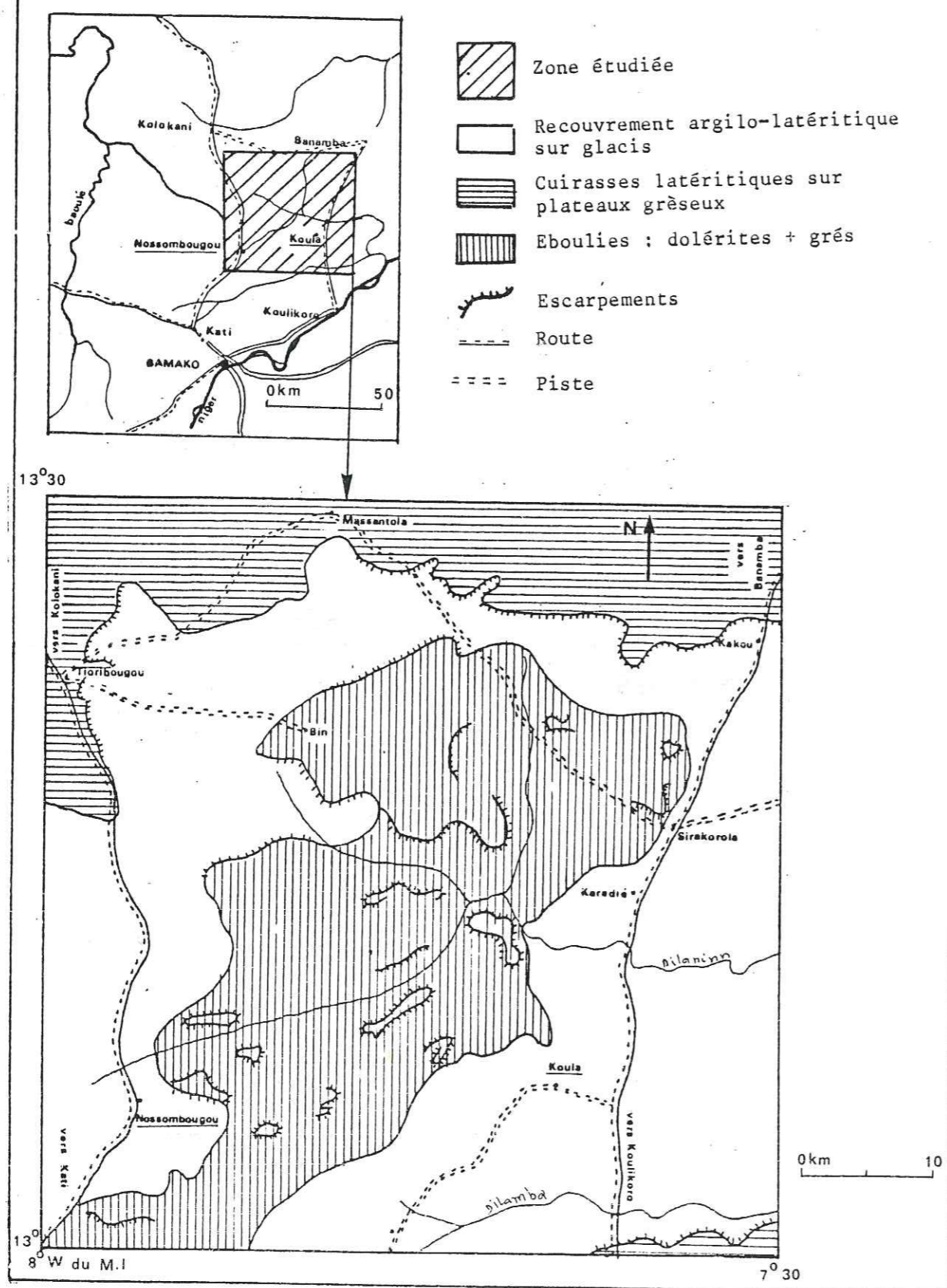
CHAPITRE II

GEOLOGIE DE LA ZONE DE KOULA-NOSSOMBOUGOU

2.1. GENERALITES

2.2. GEOLOGIE

FIG. 5 SITUATION ET GÉOMORPHOLOGIE DE LA ZONE
DE KOULA- NOSSOMBOUGOU



Chapitre I I

GÉOLOGIE DE LA ZONE DE KOULA-NOSSOMBOUGOU

2.1. GENERALITES

2.1.1. Situation

La zone d'étude se situe à une centaine de kilomètres au Nord de Bamako. Elle couvre un demi-degré carré entre les latitudes 13° et 13°30' Nord et les longitudes 7°30' et 8° Ouest, soit une superficie d'environ 2900 km².

A partir de Bamako on y accède par 2 axes routiers praticables toute l'année : Bamako - Koulikoro - Banamba et Bamako - Kati - Kolokani (fig. 5)

2.1.2. Climat

La zone de Koula-Nossombougou est à la transition entre le régime soudanien et le régime sahélien avec une pluviométrie annuelle comprise entre 750 et 900 m.

Depuis 1970 une série d'années plus ou moins déficitaires se sont succédées avec cumul des effets néfastes en particulier sur l'alimentation des aquifères.

La température de l'air varie entre la saison sèche et la saison humide. Les températures mensuelles maximales sont enregistrées en mai-juin (31 - 32° C) et les minimales en janvier-février (25-26° C). La moyenne annuelle est d'environ 28° C.

L'humidité relative est de 15-18% l'après-midi en saison sèche et de 60-80 % en saison humide (ORSTOM).

2.1.3. Géomorphologie

On distingue

- Au Nord les bordures sud des Plateaux de Kolokani et de Babamba qui constituent les prolongements NE des Plateaux mandingues. Ils ont une altitude moyenne de 400 m avec pour point culminant 442 m à Tioribougou. Ils correspondent à d'anciennes surfaces d'aplanissement latéritisées au cours de l'érosion.

Suivant la lithologie et en raison du léger pendage vers le Nord on a formation de petits escarpements à pentes abruptes, ou de replats à pentes douces.

Les zones d'escarpement sont constituées de grès ou de quartzites et forment des falaises faisant front vers le Sud (Kakou) ou vers l'Est (Tioribougou). Les replats sont liés aux schistes et grès schisteux.

- Au Sud une bande, orientée presque SW-NE, de petites collines divise le glacis du Niger. Ces collines ont une forme arrondie à la base et sont constituées de grès schisteux. Des pointements de dolérites apparaissent au sommet formant de petites falaises ou des pitons aux pentes très raides. C'est dans cette bande qu'on observe les plus hauts sommets de la région, l'altitude diminuant vers le Nord (537 m à Ténézana, 445 m à Dossorola).

2.1.4. Hydrographie

Toute la zone est drainée vers le Niger par deux affluents du Koda : le Dilamba et le Dilaninn. Un réseau très dense de petits marigots entaille profondément les différentes falaises et collines. Tous les cours d'eau sont intermittents, ils coulent de quelques heures à quelques dizaines de jours, en fonction des précipitations. Il est à remarquer le tracé parfois rectiligne du réseau hydrographique qui correspond aux principaux linéaments (fig. 6).

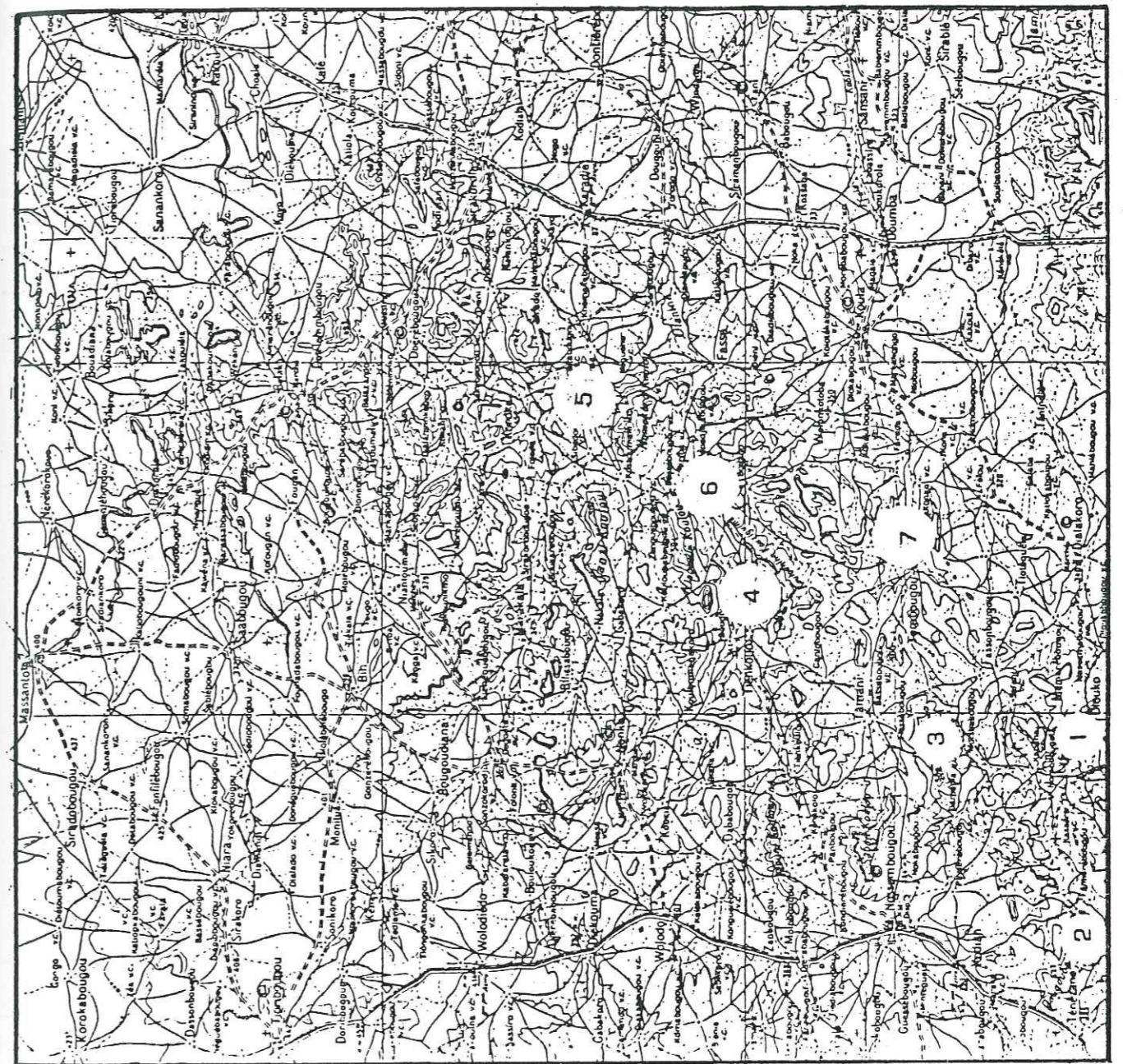
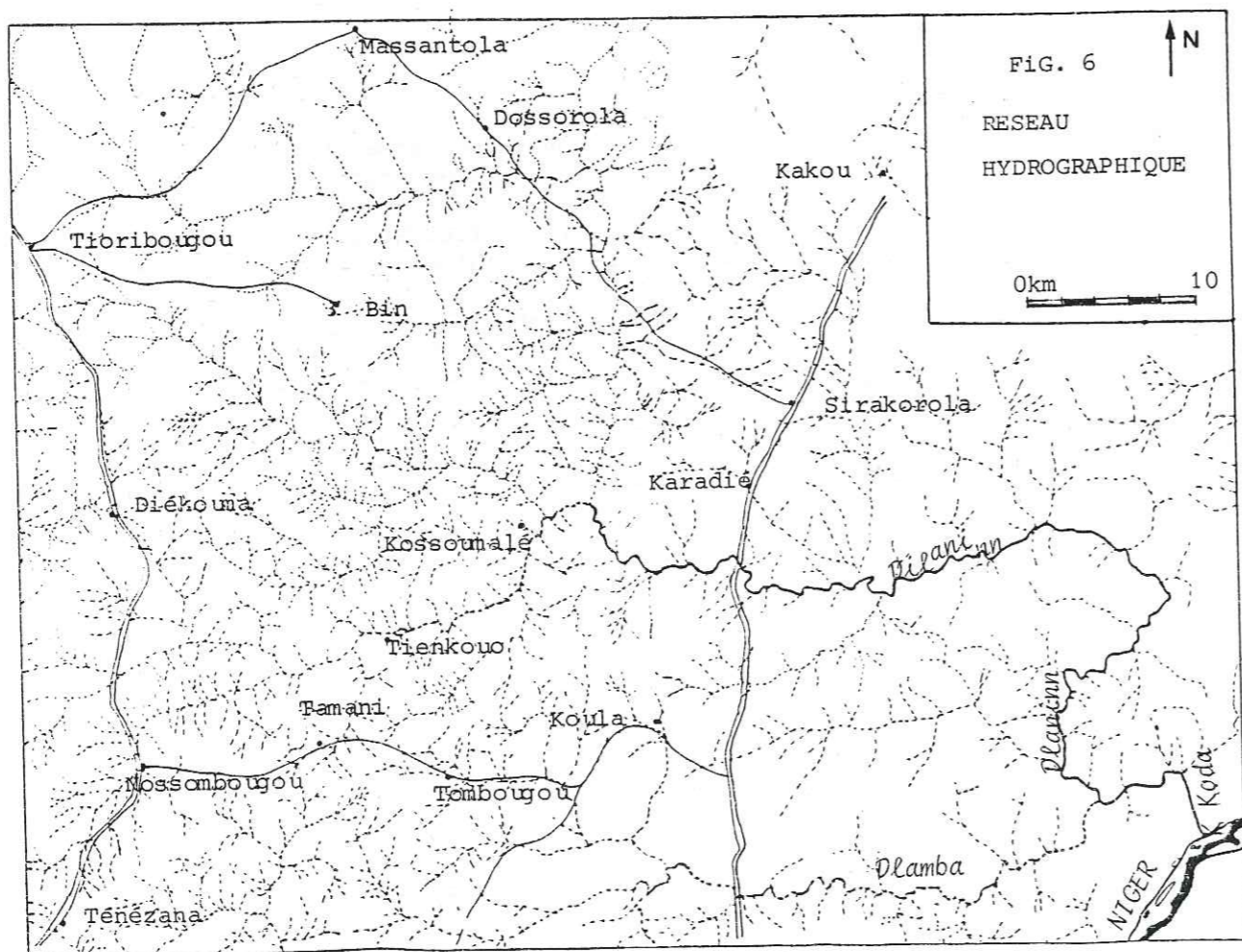


FIGURE 7

CARTE TOPOGRAPHIQUE
SITUATION DES COUPES GÉOLOGIQUES

- 1- Coupe à l'Est de Ténézana
- 2- Coupe du Dougouba Koulou
- 3- Coupe de Bafébougou
- 4- Coupes du Niagoulé Koulou
- 5- Coupe du Nomokoro Koulou
- 6- Coupe du Koulouninn Kouziguina
- 7- Coupe de Tombougou

2.2. GEOLOGIE

L'omniprésence des dolérites dans la zone de Koula-Nossombougou rend particulièrement difficile l'étude des formations sédimentaires. L'altération en boules caractéristique des dolérites, fait que les éboulis s'étendent sur de grandes surfaces masquant les formations sédimentaires. C'est ce qui explique probablement les surfaces exagérées attribuées aux dolérites sur les esquisses géologiques établies dans le cadre des études hydrogéologiques du Projet PNUD.

C'est en essayant de préciser les contours de ces dolérites que nous avons découvert un niveau de calcaires surmontés de jaspes.

Les jaspes avaient été signalés par DARS en 1961 au Sud Ouest de notre zone à Dio, mais il n'avait pas pu observer les formations sous-jacentes.

Grâce à des coupes d'affleurements (qui ne sont pas aussi rares qu'on le présumait) et aux résultats des forages nous avons pu définir une nouvelle série que nous désignons "série de Koula-Nossombougou".

La position de cette série dans l'échelle stratigraphique régionale pose un problème que nous soulèverons, sans pour autant le résoudre. Le temps ne nous ayant pas permis de faire des corrélations avec les séries voisines.

2.2.1. Description des coupes d'affleurements

2.2.1.1. Coupe à l'Est de Ténézana (fig. 8).

Cette coupe déborde un peu de la zone d'étude vers le Sud. Nous l'avons choisie en raison des renseignements qu'elle donne sur la partie inférieure de la série.

On observe de haut en bas :

8. Cuirasse latéritique
7. Grès oolitiques à ciment pélicieux glauconieux
6. Alternance de schistes et de grès schisteux
5. Grès moyens à grains jointifs silicifiés
4. Grès fins très durs ; lités, avec des niveaux de quartz et des niveaux rougeâtres d'oxyde de fer
3. Sill de dolérite à grains moyens
2. Schistes gris à noirs avec présence de petits cristaux de pyrite
1. Grès grossiers riches en oxyde de fer. Couleur rougeâtre. Présence de quelques galets plus ou moins arrondis de quartz (1 cm de diamètre).

Cette coupe permet d'observer en affleurement un sill de dolérite (niveau 3) ce qui est rare du fait de l'altération en boules de la dolérite rendant difficile l'observation directe du mode de gisement. C'est aussi dans cette zone qu'on rencontre en affleurement, le faciès du niveau 7 (grès oolitiques glauconieux) qui est difficile à identifier dans les forages à cause de sa ressemblance avec la latérite surtout à l'état altéré.

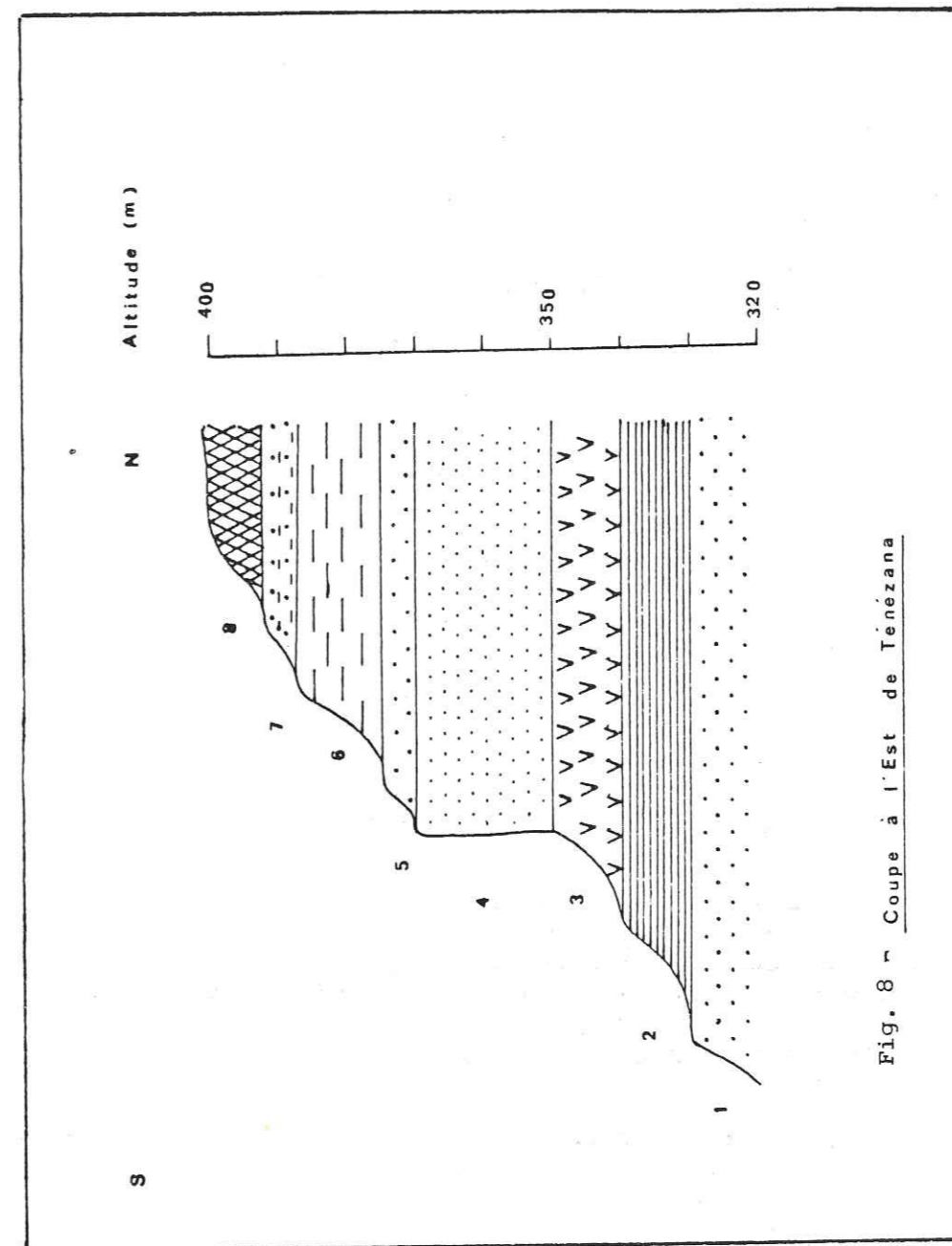


Fig. 8 - Coupe à l'Est de Ténézana

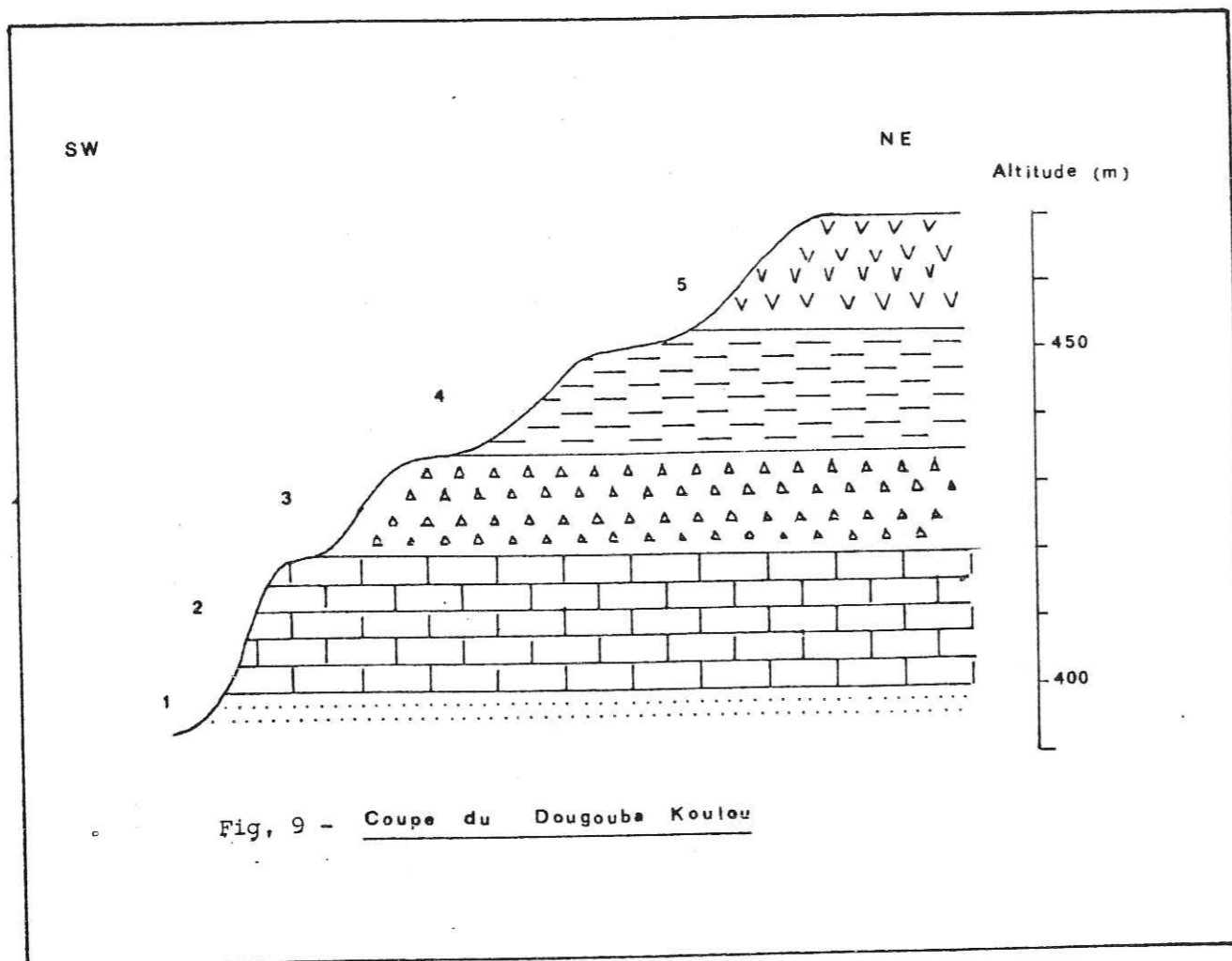


Fig. 9 - Coupe du Dougouba Koulou

2.2.1.2. Coupe du Dougouba Koulou (fig.9)

C'est une colline située à l'Est de Ténézana sur laquelle se situe le point culminant du secteur. La coupe est faite sur le flanc ouest.

On y distingue de haut en bas :

5. Dolérite à grains fins et moyens
4. Schistes gris se débitant en dalles
3. Jaspes multicolores (gris, rose, rouge) présentant un aspect chaotique. Ils sont très fissurés et se désagrègent au coup de marteau
2. Calcaires cristallins gris à blancs, en bancs de quelques décimètres. A l'affleurement ils présentent parfois un aspect schisteux. Comme dans le niveau précédent on y note une intense fissuration
1. Grès fins rougeâtres très diaclasés finement lités.

Notons que sur le flanc est les niveaux de jaspe et de schistes disparaissent sous la dolérite. C'est aussi à cet endroit que l'on observe la plus grande épaisseur de calcaire : plus de 20 m.

2.2.1.3. Coupe de Bafébougou (ex. Moribabougou) (fig. 10)

On y distingue de haut en bas :

6. Cuirasse latéritique
5. Dolérite grenue à grain moyen
4. Grès grossiers durs à grains de quartz jointifs
3. Microconglomérat avec des galets de quartz plus ou moins arrondis de 2 à 3 cm de diamètre pris dans un ciment gréseux
2. Grès moyens à grossiers peu consolidés avec des galets de quartz
1. Jaspes.

Un peu plus à l'Est de cette coupe on observe 5 mètres de schistes entre les Jaspes et les grès moyens friables.

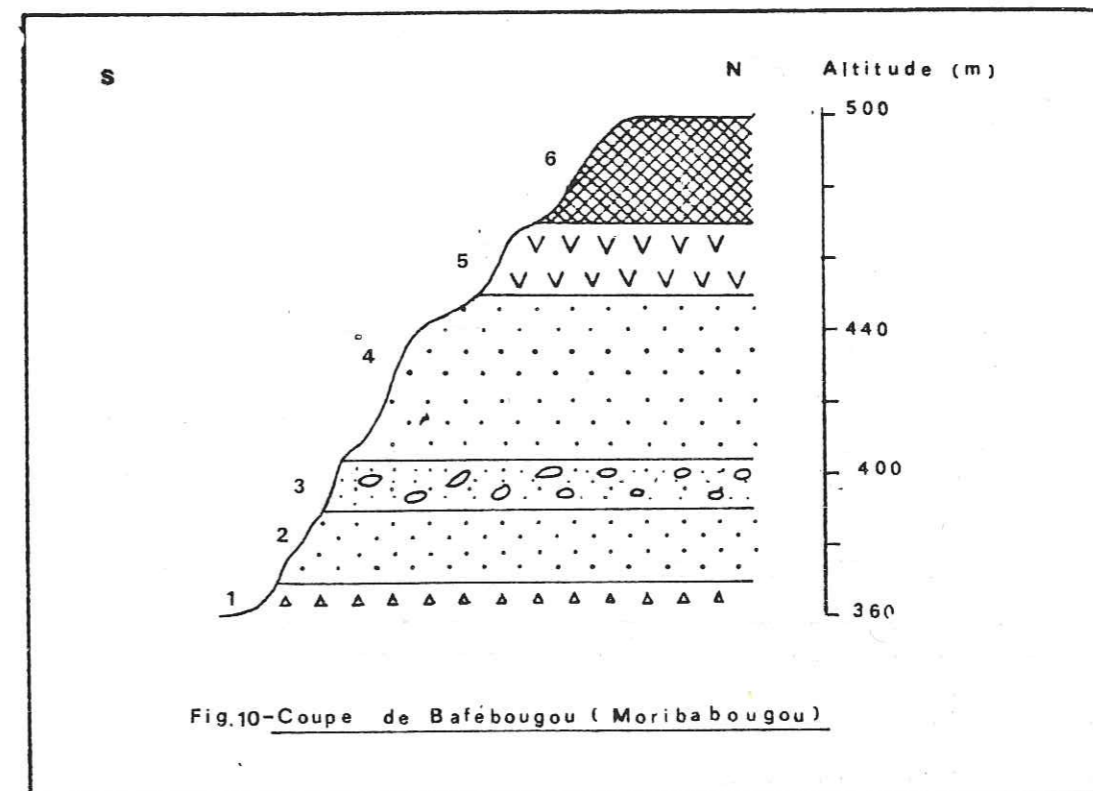


Fig. 10 - Coupe de Bafébougou (Moribabougou)

2.2.1.4. Coupes du Niagoulé Koulou (fig. 11)

Nous présenterons 2 coupes de cette colline située au Nord de Tienkouo : les deux coupes sont intéressantes : la première permet d'observer 150 m d'affleurement dans la série et sur la seconde existe la seule source du secteur.

Coupe 1

De haut en bas nous avons :

11. Dolérite à grains moyens
10. Alternance de grès et d'argilites en bancs décimétriques. Les niveaux gréseux ont une granulométrie fine à grossière, avec une présence de micas. Ils sont très fracturés et ont un débit caractéristique en parallélépipèdes tronqués sur un sommet.

Les niveaux d'argilites sont généralement lessivés par l'érosion, quand ils sont épargnés on y observe des microplissements, provoqués par la mise en place des dolérites sus-jacentes.

9. Niveau de grès fins à moyens peu consolidés à stratifications obliques
8. Schistes gréseux se débitant en plaquettes
7. Grès moyens blancs s'effritant au coup de marteau
6. Grès fins à moyens avec des passées grossières, dures, très diaclasées. Ils présentent un escarpement aux pentes abruptes, de 20 mètres environ
5. Schistes gris noirs en bancs décimétriques à métriques
4. Dolérite très fine, diaclasée, dure, cassure tranchante
3. Schistes gris se débitant en dalles diaclasées
2. Jaspes multicolores en petits blocs
1. Schistes gris clairs feuilletés.

Coupe II

Cette coupe se situe à environ 1,5 km à l'Est de la précédente au niveau de Tiekourabougou (hameau de Tienkouo). Elle suit à peu près la piste qui va vers Kouloubabougou.

On y distingue de haut en bas :

5. Grès fins à moyens à grains de quartz jointifs avec des niveaux grossiers et présence de galets de quartz de 1 à 2 cm de diamètre
4. Grès moyens quartziques avec une forte proportion de galets de quartz.

C'est à ce niveau qu'on observe une source qui d'après les villageois est permanente. Le débit en début mai était de quelques dizaines de litres par heure.

3. Schiste gris en bancs métriques avec interstratification d'un sill de dolérite fine, dure
2. Jaspes
1. Schistes gris clairs feuilletés à débit en plaquettes.

2.2.1.5. Coupe du Koulouninn Kouziguina (fig. 12)

Cette colline est située au Sud du Niagoulé Koulou. La coupe est sur la piste de Bouado à 4 km de Tienkouo.

De haut en bas on observe :

7. Dolérite fine à moyenne
6. Grès schisteux se débitant en plaquettes
5. Grès quartzitique micacé en parallélépipèdes tronqués
4. Schistes en bancs décimétriques

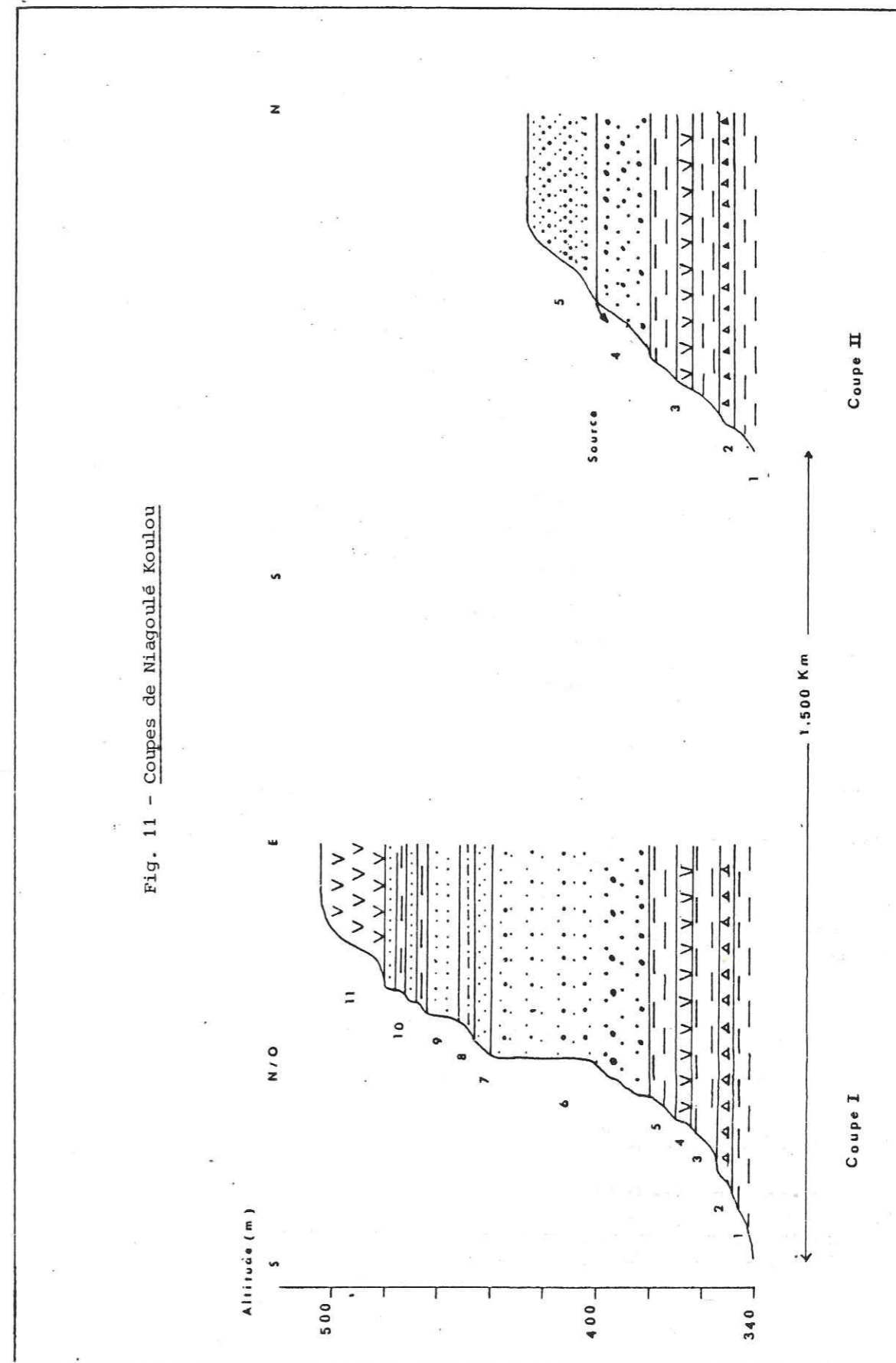
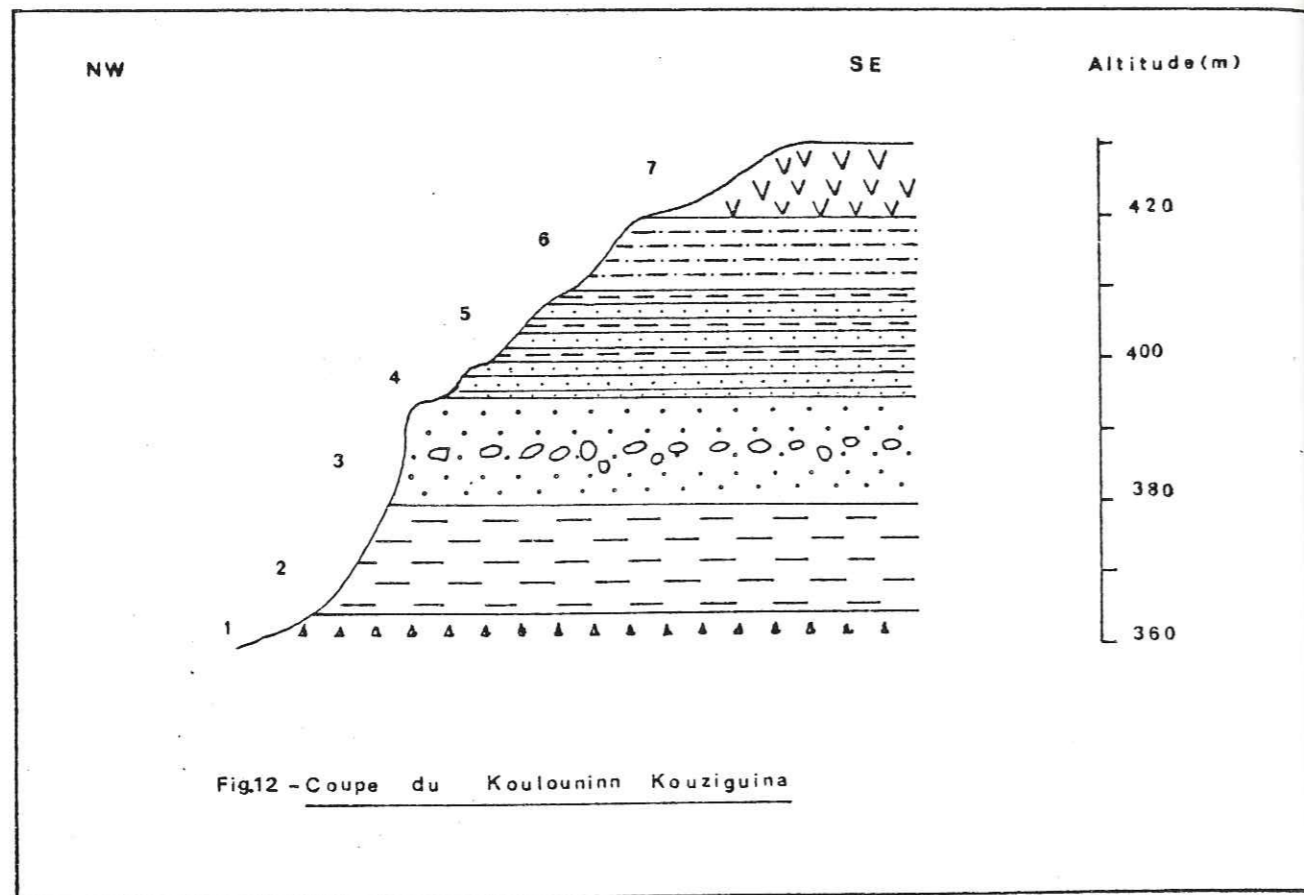


Fig. 11 - Coupes de Niagoulé Koulou

3. Grès grossier microconglomératique
2. Schiste gris clair
1. Jaspes.

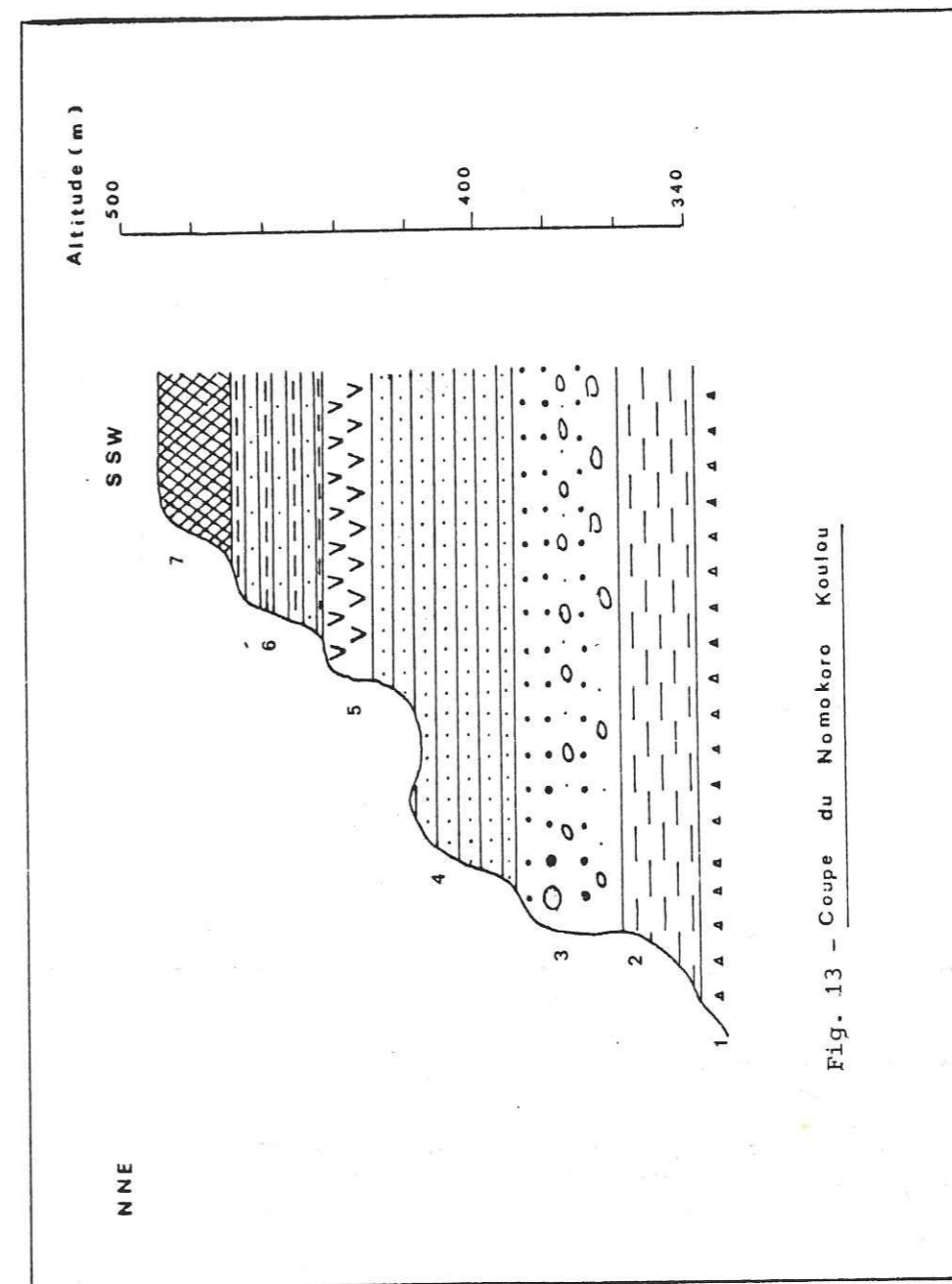


2.2.1.6. Coupe du Nomokorokoulou (fig. 13)

Nous avons fait cette coupe sur l'ancienne piste allant de Kossoumali à Fassa longeant la colline par le flanc nord.

Elle présente de haut en bas :

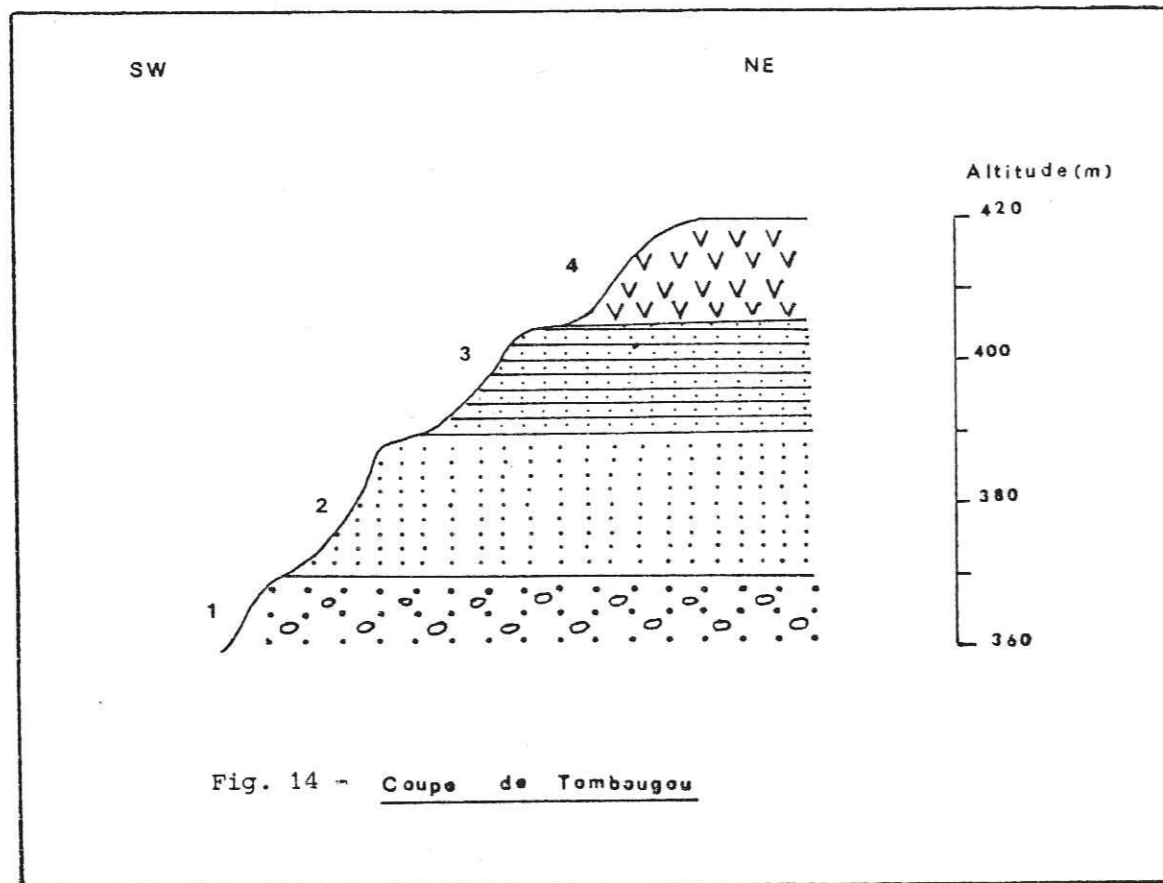
7. Latérite
6. Grès fin micacé se débitant en parallélépipèdes
5. Dolérite fine interstratifiée présentant par endroits des stries orthogonales. Elle est noire, dure avec un son métallique au coup de marteau
4. Schiste plus ou moins gréseux en bancs décimétriques
3. Grès grossier microconglomératique peu consolidé
2. Schiste micacé gris clair en petites plaquettes
1. Jaspes en petits bloc chaotique avec parfois des blocs recimentés par de la latérite secondaire.



2.2.1.7. Coupe de Tombougou

Elle est située au Nord de Tombougou sur la piste allant vers Bouado On y distingue de haut en bas :

4. Dolérites fines moyennes
3. Grès schisteux fins se débitant en plaquettes
2. Grès moyens à grossiers peu consolidés, altération en carapaces de tortue
1. Microconglomérat à galets de quartz et de jaspes.

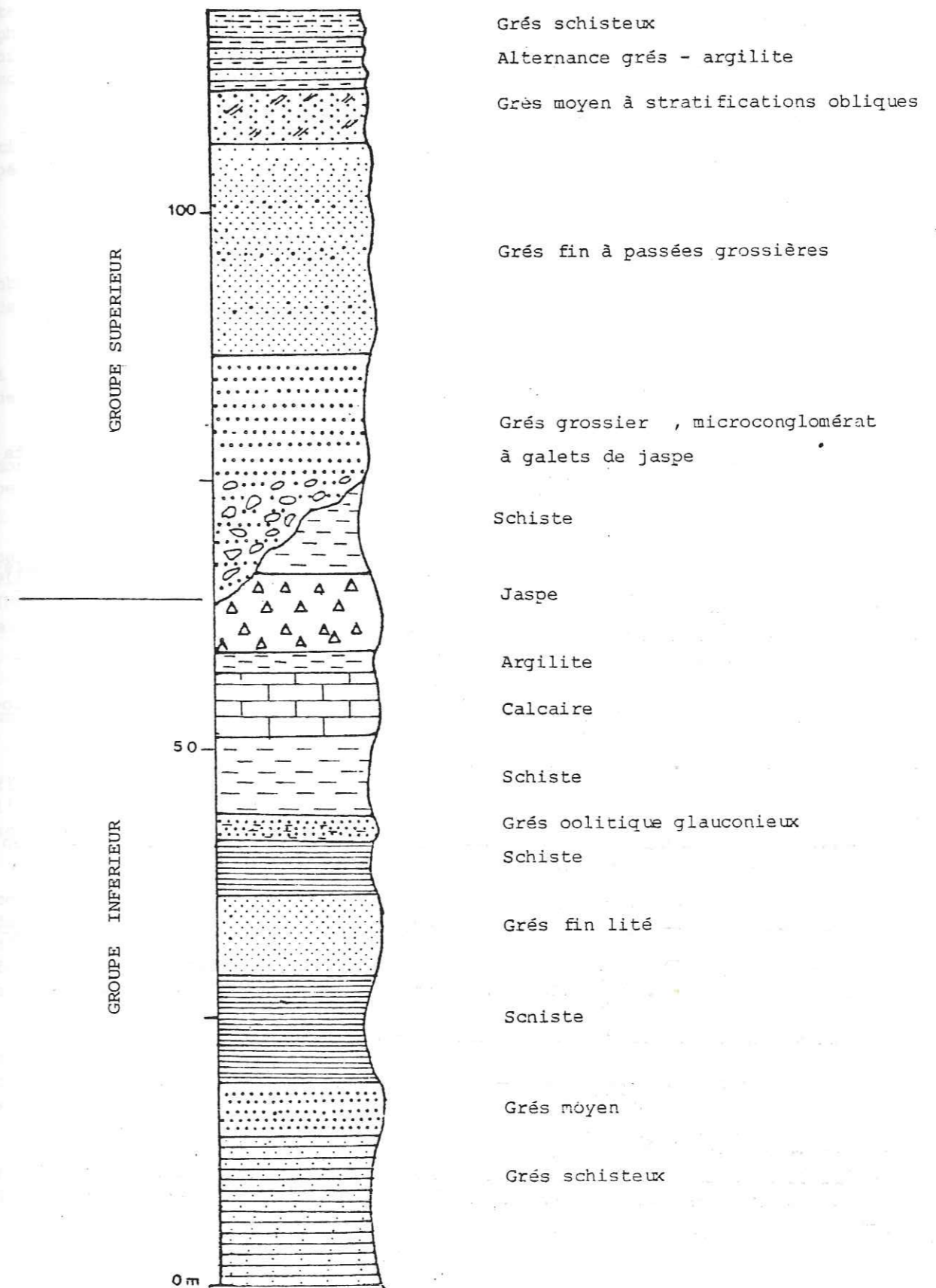
2.2.2. Coupe lithostratigraphique synthétique (fig. 15)

La description des coupes d'affleurement et les données de forages nous ont permis d'établir une coupe lithostratigraphique synthétique de la série de Koula-Nossombougou. L'existence d'une discordance de ravinement nous a amené à y distinguer 2 groupes principaux.

2.2.2.1. Groupe inférieur

Il affleure essentiellement au Sud du secteur étudié où sa limite inférieure n'est pas connue. Il se caractérise, à la base par des dépôts détritiques avec une alternance de grès et de schistes, et au sommet apparaissent des faciès carbonatés (calcaires) et siliceux (jaspes).

FIG. 15 - COUPE LITHOSTRATIGRAPHIQUE SYNTHÉTIQUE DE LA SÉRIE DE KOULA - NOSSOMBOUGOU



Formations détritiques

Ces formations présentent des faciès très variés d'Ouest en Est rendant difficiles les corrélations entre les différents niveaux.

A l'Ouest, on observe la succession stratigraphique suivante de bas en haut :

- Grès moyens à grossiers avec la présence de galets de quartz d'un centimètre de diamètre. Ce sont les grès durs pauvres en ciment avec les grains souvent jointifs dus à une silicification. Leur épaisseur à l'affleurement est d'une dizaine de mètres.

- Schistes gris à noirs en dalles. On y a noté la présence de petits cristaux de pyrite au contact d'un sill de dolérites. L'épaisseur est d'environ 10 m.

- Grès fins quartzitiques avec une alternance de lits millimétriques clairs (quartz) et rougeâtres (oxyde de fer). Ces grès présentent un réseau de diaclases suborthogonales qui leur donne un débit en parallélépipèdes rectangulaires.

Ils sont parfois surmontés par un niveau de grès moyens à grains jointifs riches en oxydes de fer.

L'épaisseur totale est d'environ 25 mètres.

- Grès schisteux à schistes en bancs ou en dalles. Certains niveaux schisteux sont très indurés et donnent un son métallique au coup de marteau. Leur puissance est d'environ 10 m.

- Grès oolitiques verdâtres à aspect schisteux. Les oolites essentiellement constituées de glauconie, sont prises dans un ciment phylliteux riche aussi en glauconie. Ces grès s'altèrent facilement en latérite et prennent alors une coloration rougeâtre. L'épaisseur est d'environ 5 m.

A l'Est du secteur la succession stratigraphique est de bas en haut :

- Grès schisteux à schistes. Le sommet de cette formation qu'on observe en affleurement est constitué de grès schisteux micacés se débitant en dalles ou en plaquettes. La base reconnue par les forages est constituée de schistes, gris foncé ou violacés contenant de la pyrite et de la magnétite. La puissance totale dépasse 40 m.

- Grès moyens à grains roulés en bancs métriques avec des joints de stratification décimétrique de grès schisteux feuilletés. Ces grès sont très pauvres en ciment, les grains étant généralement jointifs.

Notons la présence d'horizons de grès fins tendres avec des traces d'oxyde de fer.

La puissance totale est d'une quinzaine de mètres.

- Alternance gréso schisteuse. Les niveaux gréseux ont généralement une granulométrie fine avec des horizons quartzeux. Les schistes de couleur noir à gris foncé sont parfois micacés.

Leur puissance totale dépasse 50 m.

Formation des calcaires-jaspés

Cette formation se présente en fait en intercalation entre un niveau schisteux. Sa continuité dans le secteur nous a amené à la prendre comme repère stratigraphique. Elle semble reposer en concordance sur les formations détritiques inférieures bien que les nombreuses variations de faciès dans ces dernières nous incitent à être moins catégorique.

La partie supérieure a été ravinée par l'érosion avant le dépôt des formations supérieures comme l'attestent les variations d'épaisseur du niveau schisteux supérieur.

Nous y distinguons de bas en haut :

- Schistes se débitant en petites plaquettes ou en dalles. Localement on observe des argillites jaunâtres très fracturées (Karadie). L'épaisseur maximum est de 10 m.

- Calcaires dolomitiques (faible effervescence avec HCl), saccharoïdes blancs à gris foncé. On y observe souvent de petits cristaux d'apatite surtout au voisinage de la dolérite.

Ils se présentent en petits bancs décimétriques à centimétriques qui leur donnent de loin un aspect feuilleté. Ils sont très fissurés et se désagrègent en petits morceaux au coup de marteau.

Les affleurements sont localisés au Sud Ouest où on observe 20 m de calcaires sur la colline Dougouba Koulou. A une dizaine de kilomètres plus à l'Est entre Pintiérébougou et Kabana l'épaisseur se réduit à 1 m pour disparaître plus à l'Est (Moribabougou). A l'Ouest on les rencontre dans les forages (Diarrabougou). Leur extension nord se situe vers Diékouma.N.

La disparition des calcaires à l'Est du secteur nous amène à penser à un dépôt sous forme de lentille.

- Jaspés. Ils sont de couleur rougeâtre, rose, gris ou gris foncé. Ils affleurent en blocs chaotiques éparpillés sur de grandes surfaces (quelques km² à l'Ouest de Fassa). Certains blocs peuvent atteindre 2 m de diamètre et on y observe souvent des galets plus ou moins arrondis de Jaspés.

L'épaisseur des jaspés est estimée à 20 m, c'est toujours au niveau de la colline Dougouba Koulou que nous avons observé la plus grande épaisseur. L'extension des jaspés est plus grande que celle des calcaires. Le niveau est assez continu d'Ouest en Est où on le rencontre soit en affleurement soit en profondeur dans les forages. DARS (1961) les signale aussi plus à l'Ouest à Dio. Nous les rencontrons aussi plus au Sud vers Bamako à une vingtaine de km de Nossombougou.

L'absence de structure sédimentaire et l'aspect chaotique des affleurements nous avaient amené à considérer les jaspés comme des brèches tectoniques. Mais la continuité du niveau et surtout la position stratigraphique ne laissent aucun doute sur l'origine sédimentaire.

Le bassin sédimentaire n'était pas stable ; en effet il semble y avoir eu émergence des dépôts de jaspés avec reprise de l'érosion (présence de galets de jaspés dans certains blocs).

- Schistes parfois gréseux se débitant en dalles. Ces schistes sont souvent très indurés et donnent un son métallique au coup de marteau (Doujouba Koulou). L'épaisseur est de 15 m.

2.2.2.2. Groupe supérieur

Il occupe toute la partie Nord du secteur et un couloir central d'orientation SO-NE. Ce sont des formations détritiques à granulométrie moyenne à grossière localement microconglomératique. Les faciès sont plus fins vers le sommet. Leur puissance totale est mal connue du fait de la présence de la dolérite qui les recouvre en permanence.

La plus grande puissance observée est de 100 m à Tienko.

Dans ce groupe on distingue de bas en haut :

- Grès moyens à grossiers peu consolidés, blancs ; avec des niveaux riches en oxydes de fer (hématite). On y observe par endroits des phénomènes de silicification dus aux circulations d'eau de surface.

Ces grès sont très diaclasés et l'érosion différentielle leur donne un aspect de carapace de tortue. Ils affleurent au centre et Nord-Est du secteur où les femmes les exploitent pour la vaisselle des ustensiles en bois ou des calebas-ses.

Les grès grossiers passent par endroits à un microconglomérat avec des galets de quartz et parfois de jaspes (Tombougou) de 2 à 3 cm de diamètre. Notons que DARS (1960) décrit un faciès microconglomératique de même nature à Néguela au Sud-Ouest de notre secteur.

La puissance totale est estimée à quelques 35 mètres.

- Au dessus on observe des faciès plus fins passant à des grès schisteux avec des niveaux grossiers et des galets de quartz. La plus grande épaisseur a été observée à Tienkouo (40 m) où l'on note un escarpement de grès fins très diaclasés en petits bancs décimétriques. Ces grès fins peuvent passer latéralement à des schistes se débitant en dalles.

- Le niveau de grès fins schisteux est surmonté par des grès moyens, friables à stratifications obliques que nous n'avons observé qu'à Tienkouo. Son épaisseur est de 10 m.

- Le sommet est occupé par une alternance de lits de quartzites micacés, durs, et d'argilites gris clair très tendres. Ce niveau est toujours recouvert par de la dolérite dont la mise en place a provoqué une intense fracturation des lits durs et un microplissement des niveaux d'argilites. L'érosion lessivant les argilites il ne reste sur place que de petits blocs de quartzites en parallélépipèdes tronqués sur un sommet très caractéristique. Ce niveau est assez continu dans la partie centrale du secteur. Son épaisseur peut atteindre 10 m.

Notons enfin que nous avons observé 5 m de grès schisteux au dessus du niveau des quartzites sur la colline Koulininn Kouziguina au Sud Est de Tienko.

2.2.3. Dolérites

Elles sont omniprésentes dans le secteur où elles couvrent plus de la moitié de la superficie.

Ce terme de dolérite englobe en fait des roches de nature pétrographique diverse. Certains auteurs utilisent les termes de gabbros ou de diabases.

Ce sont des roches volcaniques grenues à microgrenues, parfois micropegmatiques, à patine gris clair. La cassure fraîche est noire gris foncé ou verte. Elles sont constituées de phénocristaux de plagioclases, souvent visibles à l'oeil nu, pris dans une matrice de composition minéralogique très variée (olivine, augite, magnétite, etc.).

On rencontre 2 faciès principaux dans le secteur.

- Un faciès grenu à grain moyen dur. L'abondance des cristaux de Feldspaths allongés et entrelacés lui donne une couleur gris clair.

- Un faciès très fin, noir à gris foncé interstratifié dans les formations schisteuses. On y note souvent des stries suborthogonales profondes d'un centimètre. Cette surface striée est très riche en magnétite (poussière attirée par l'aimant).

Il semble y avoir eu plusieurs stades d'intrusions doléritiques en Afrique de l'Ouest. La première ayant débuté au cours de l'orogénèse panafricaine (SAVADOGO, 1984) et la plus récente datant du Jurassique inférieur (DOSO, 1975). Elles se sont mises en place sous forme de dykes, sills, laccolites, à la faveur du réseau de fracturation et des joints de stratification.

L'étude du mode de gisement est rendue difficile sur le terrain par l'altération en boules caractéristiques des dolérites.

2.2.3.1. Les dykes. Ils occupent les grands linéaments visibles sur les photographies aériennes. Leur épaisseur est variable le long de la même fracturation (50 à 100 m) et leur longueur peut atteindre des dizaines de kilomètres. Les dykes sont en général subverticaux, ils peuvent cependant présenter un fort pendage. Leur mise en place provoque des rebroussements dans les schistes et une dislocation des bancs de grès. On note aussi des phénomènes de métamorphisme de contact.

Il semble que les dykes de dolérites soient plus fréquents dans des zones lithologiques homogènes (grès ou schistes). Dans le secteur de Koula-Nossombougou où la série est hétérogène ils sont rares.

Une étude dans le cercle de Banamba montre que les linéaments de direction ENE-OSO sont injectés de dolérites tout au long de leur tracé, tandis que les linéaments N-S ne sont injectés qu'aux abords des linéaments précédents.

2.2.3.2. Les sills. Ils se mettent en place dans les joints de stratification entre les schistes et les grès. Leur épaisseur est très variable: 5 à 10 m. Les sills sont probablement des extensions de dykes ou de massifs. Dans ce dernier cas il est difficile de les différencier des extrémités des grands massifs. La géophysique est alors qu'un grand apport. Au cours de nos itinéraires géologiques, nous avons observé trois niveaux de sills.

Leur mise en place s'accompagne en général d'une fracturation des roches encaissantes. L'extension de cette zone fracturée dépend de l'épaisseur du sill et de la nature lithologique des roches encaissantes.

2.2.3.3. Les massifs doléritiques (laccolites)

Ils occupent les sommets des collines et forment souvent des falaises aux pentes raides très diaclasées. Leurs dimensions peuvent atteindre plusieurs dizaines

de kilomètres. Les études géophysiques montrent des variations brusques d'épaisseur au fur et à mesure qu'on s'éloigne des massifs. Ce phénomène de bisautage est confirmé par certains forages. C'est ce qui nous a conduit à l'hypothèse d'une mise en place sous forme de laccolites. Le magma originel chemine par les fractures sub-verticales. Dans les formations tendres (schistes, argilites) peu compétentes à la fracturation il se produit un "bombement" des couches et propagation latérale du magma. La fracturation des bancs gréseux et les microplissements des niveaux schisteux, observés à proximité des massifs doléritiques, confirmeraient ce schéma de mise en place.

Le toit des laccolites présente généralement des irrégularités dues à des extensions latérales dans les plans de moindre résistance (joints de stratification, schistosité), donnant ainsi naissance à des sills.

Dans une étude sur les dolérites du Mali, S. TOGOLA (1984) distingue 3 zones d'intrusions sous forme de laccolites :

- les zones de laccolites bien individualisés où les foyers sont éloignés les uns des autres,
- les zones de laccolites aux foyers assez voisins de telle sorte que leurs extrémités peuvent se confondre ou se superposer,
- les zones de laccolites à foyers très proches et parfois sécants. On a donc affaire à une masse s'étendant sur plusieurs dizaines de km², résultant de la fusion des différents laccolites.

La localisation des foyers est très difficile sur le terrain. Elle est souvent relative à la morphologie, le point d'épaisseur maximale se situant généralement au droit du foyer. Cependant comme le souligne TOGOLA il peut y avoir des phénomènes d'inversion de relief du fait de l'érosion.

La mise en place de la dolérite a beaucoup perturbé la stratigraphie des formations encaissantes. Son ascension à travers d'anciennes fractures a probablement provoqué des rejets. La position topographique des niveaux de calcaires et de jaspes conforte cette idée. Les jaspes en effet affleurent à différentes altitudes entre Ténézana au Sud-Ouest et Tama au NE ; tandis qu'on le retrouve en profondeur entre ces 2 localités. De part et d'autre de la colline de Fassa constituée de dolérite on note une différence d'altitude de plus de 100 m. Les jaspes affleurent sur le flanc Est et à Fassa au pied de la colline le forage les rencontre à 70 m de profondeur.

Conclusion

Les dolérites occupent une place importante au sein des formations infracambriennes des plateaux mandingues. Elles sont variées tant par leur minéralogie que par leur mode de gisement.

Les études récentes nous permettent d'écarter l'hypothèse de grands massifs de type granitoïde avec un foyer unique. Les massifs de dolérites sont en effet un ensemble de petits amas aux foyers proches et souvent sécants.

Cependant beaucoup de questions restent posées, notamment sur la genèse et la localisation des foyers intrusifs, leur relation avec la tectonique. Les réponses à ces questions contribueraient beaucoup à la compréhension des mécanismes hydrauliques de ces régions. En effet, comme nous le verrons plus loin la dolérite joue un rôle hydrogéologique important.

2.2.4. Formations de recouvrement

2.2.4.1. Latérites. Elles sont très répandues dans le secteur. Suivant la position géomorphologique on distingue :

- Une latérite primaire sommitale, formant une cuirasse compacte, alvéolaire de couleur rouge brique parfois noire. Elle occupe les sommets des plateaux gréseux à l'altitude moyenne de 400 m

- Une latérite de pente intermédiaire, se moulant sur le relief, rosée à rouge, pisolitique, d'aspect plus ou moins microconglomératique. Elle est plus argileuse

- Une latérite de fond de vallée souvent recouverte par les argiles et silts, assez compacte, gravillonnaire, ocre rouge à ocre jaune.

2.2.4.2. Alluvions - Colluvions

Ce sont des dépôts fins, argileux et silteux de quelques mètres d'épaisseur. Ils apparaissent dans la vallée sur des largeurs de quelques centaines de mètres.

2.2.5. Tectonique

Les formations sédimentaires des plateaux mandingues présentent une structure tabulaire avec un léger pendage (1°) vers le NE. Elles sont affectées par un réseau de fractures et de failles à faibles rejets, qui se manifestent le plus souvent en surface par des linéaments plus ou moins visibles sur les photographies aériennes. Ces fractures constituent généralement des zones de drainage comme le montre le tracé rectiligne de certains cours d'eau.

Les intrusions doléritiques ont provoqué des fissurations dans les roches encaissantes dures et des microplissements dans les formations tendres.

Les principales directions tectoniques qu'on observe sur les photographies aériennes sont :

- Un réseau ENE - WSW de grande extension (plusieurs kilomètres de long), au tracé rectiligne ou courbe. Ce réseau est généralement injecté de dolérites

- Un réseau NW - SE et NE - SW d'extension plus réduite.

Sur les affleurements, on observe un dense réseau de diaclases plus ou moins ouvertes. Les mesures de terrain ne mettent pas en évidence des directions privilégiées. Cependant 3 directions apparaissent fréquemment : N 10° - N 20°, N 110° - N 120° et N 160° - N 170°.

2.2.6. Carte géologique

L'esquisse géologique du secteur de Koula-Nossombougou (fig. 16) a été dressée à partir de la carte topographique I.G.N. - ND - 29 - XI de Banamba au 200 000ème. Elle résume nos observations de terrain et les données des différents forages exécutés dans la zone. Le tracé des contours géologiques et des principaux linéaments a été précisé à partir des vues aériennes Mali Sud KLM - 78 au 50 000ème.

Nous n'avons pas reporté le recouvrement (latérite, alluvion), malgré son rôle hydrogéologique important.

Le tracé des limites géologiques ne concorde pas toujours avec les groupes lithologiques que nous avons définis plus haut. C'est ainsi que nous avons individualisé les calcaires et les jaspes de leur rôle aquifère. Ils n'affleurent donc pas partout étant souvent recouverts par quelques 20 à 30 m de schistes.

2.2.7. Problème de la position stratigraphique de la série Koula-Nossombougou

2.2.7.1. Extension de la série

DARS R. (1961) a décrit en partie la série de Koula-Nossombougou sur des affleurements dans la plaine de Dio à Fanafiekoro et Néguela, c'est-à-dire à la limite Sud-Ouest de notre zone d'étude. La succession qu'il donne de la coupe de Fanafiékoro est la suivante de haut en bas :

- " - Grès blanc grossier siliceux conglomératique..... 4 m environ
- Conglomérat siliceux à galets de jaspe..... 2 m
- Jaspes multicolores..... 20 m
- Dolérites..... 4 m".

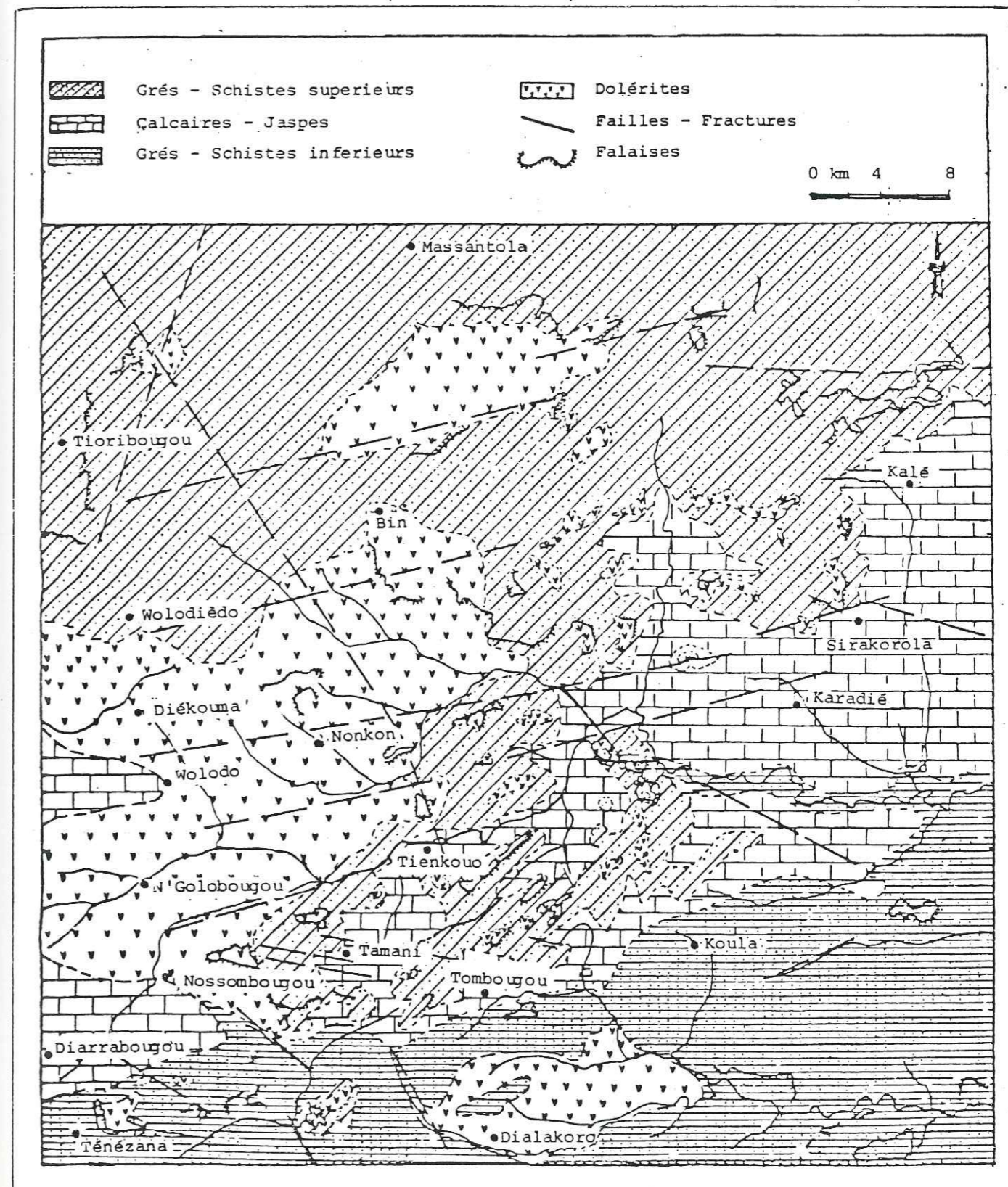
Elle concorde bien avec nos propres observations.

Dans la coupe de Néguela au km 3 (p. 60) il signale 10 m de "schistes rougeâtres en plaquettes" entre les grès grossiers et le conglomérat à galets de jaspes que nous n'avons rencontré nulle part dans notre zone.

Par ailleurs DARS décrit un "calcaire silicifié" à Diéro II (22 km au SE de Fana) et l'affleurement de calcaire de Finénakéléké (SE de Dioïla) signalé par SPINDLER J.P. (1950).

Nous pensons que ces calcaires sont l'équivalent de ceux que nous avons observés dans notre zone d'étude. Nous y reviendrons.

FIG. 16 - ESQUISSE GEOLOGIQUE DE LA ZONE DE KOULA - NOSSOMBOUGOU



2.2.7.2. Hypothèses sur ses relations avec les autres séries des Plateaux mandingues

N'ayant pu observer les formations sous-jacentes des jaspes, DARS émettait deux hypothèses :

- Les jaspes pourraient appartenir à la Série de Sotuba.
- Ils seraient un faciès latéral de la Série de Nara.

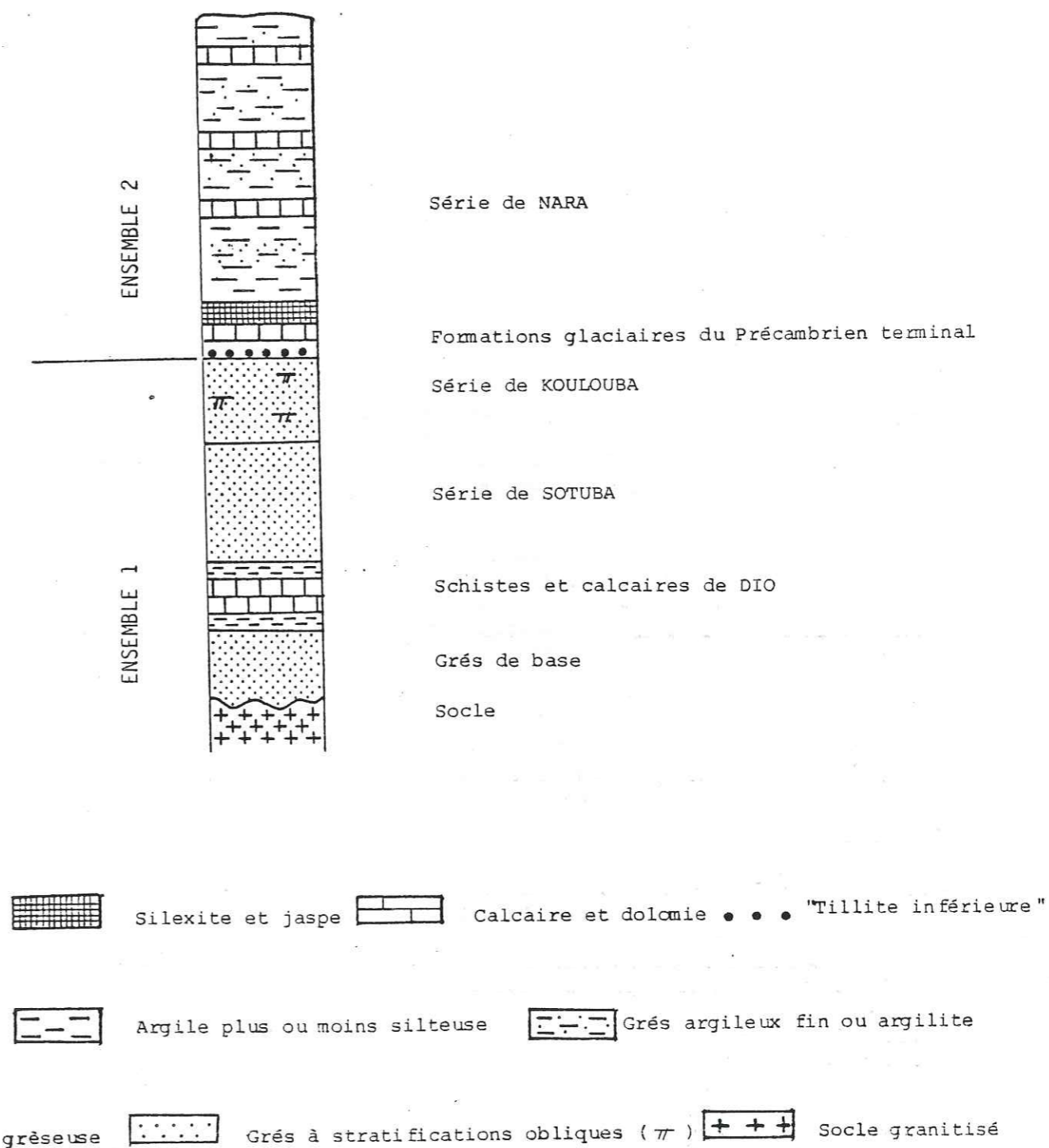
Il rattache en outre avec doute les calcaires dolomitiques de Finéna-Kélékélé et les calcaires silicifiés de Diero II à la Série de Nara et propose l'échelle stratigraphique suivante pour les formations des Plateaux Mandingues :

Série	Faciès	Age
Koulouba	Grès Grès à stratification entrecroisée	Gothlandien Ordovicien ?
Sotuba	Grès, psammites et pélites glauconieux	Cambrien ?
Nara	Schistes, pélites et grès feldspathiques Jaspes Calcaire dolomitique à Stromatolithes Tillite ?	Infra-Cambrien supérieur ?
Série de Base	Grès et arkose	Infra-Cambrien inférieur ?
Socle	Granites et roches métamorphiques	Birrimien ?

Tableau 1: Echelle stratigraphique de la feuille de Bamako-Est (DARS R. 1961).

A la suite des travaux de ZIMMERMANN H. (1960) et de BENSE C. (1964), la Série de Nara est considérée comme postérieure à la Tillite "éocambrienne" donc d'âge Cambrien ; ce qui conduit DEYNOUX M. (1971) à proposer l'échelle stratigraphique suivante pour le Mali occidental (fig.17).

Fig. 17. Echelle lithostratigraphique du Précambrien supérieur et du Paléozoïque du Mali occidental (d'après DEYNOUX, 1971)



L'échelle stratigraphique de DARS se trouve ainsi totalement renversée ; en outre les formations de la plaine de Dio sont situées à la base de la couverture post-éburnéenne.

2.2.7.3. Discussions

Nous n'avons pas eu le temps de sortir du cadre de notre zone d'étude pour rechercher d'éventuelles relations de la Série de Koula-Nossombougou avec les séries voisines des Plateaux mandingues, malgré tout les hypothèses que nous venons de citer méritent une discussion à la lumière de nos observations.

Il ne fait aucun doute que les formations de la plaine de Dio définies par DARS appartiennent à la série de Koula-Nossombougou telle que nous l'avons décrite. D'ailleurs les affleurements des jaspes de Dio se raccordent bien avec la carte que nous avons établie.

L'hypothèse de DEYNOUX de placer cette série en dessous des formations de Sotuba nous paraît peu vraisemblable. En effet l'altitude moyenne des affleurements du niveau de calcaires-jaspes est d'environ 400 m dans la zone de Koula-Nossombougou correspondant à la côte des grès de Sotuba aux environs de Bamako. La Série de Koula-Nossombougou ne peut donc être placée en dessous de cette Série de Sotuba si l'on tient compte du léger pendage (1°) vers le Nord de la couverture sédimentaire ; aucune faille majeure n'étant signalée jusqu'à présent dans la région. Tout au plus pourrait-on la considérer comme la partie supérieure de la Série de Sotuba.

Par contre la seconde hypothèse de DARS n'est pas à rejeter systématiquement, non pas la position stratigraphique de la Série de Nara, mais l'appartenance à cette Série, du niveau de calcaire-jaspe. Ce qui revient à avancer l'hypothèse d'un âge Paléozoïque de la Série de Koula-Nossombougou, tout au moins pour les formations au dessus du niveau glauconieux.

Les actuels plateaux de Kolokani-Banamba et du Mandingue constituaient probablement des paléoreliefs qui sont restés émergés lors de la transgression du début Paléozoïque, individualisant ainsi le bassin de Nara et celui que nous appelons de Nossombougou (fig. 18). CARRERE (1972) ébauchait l'hypothèse de "la permanence d'un vaste seuil, dit le Kolokani-Mandingue, durant une longue période, après le dépôt de la série de Sotuka*".

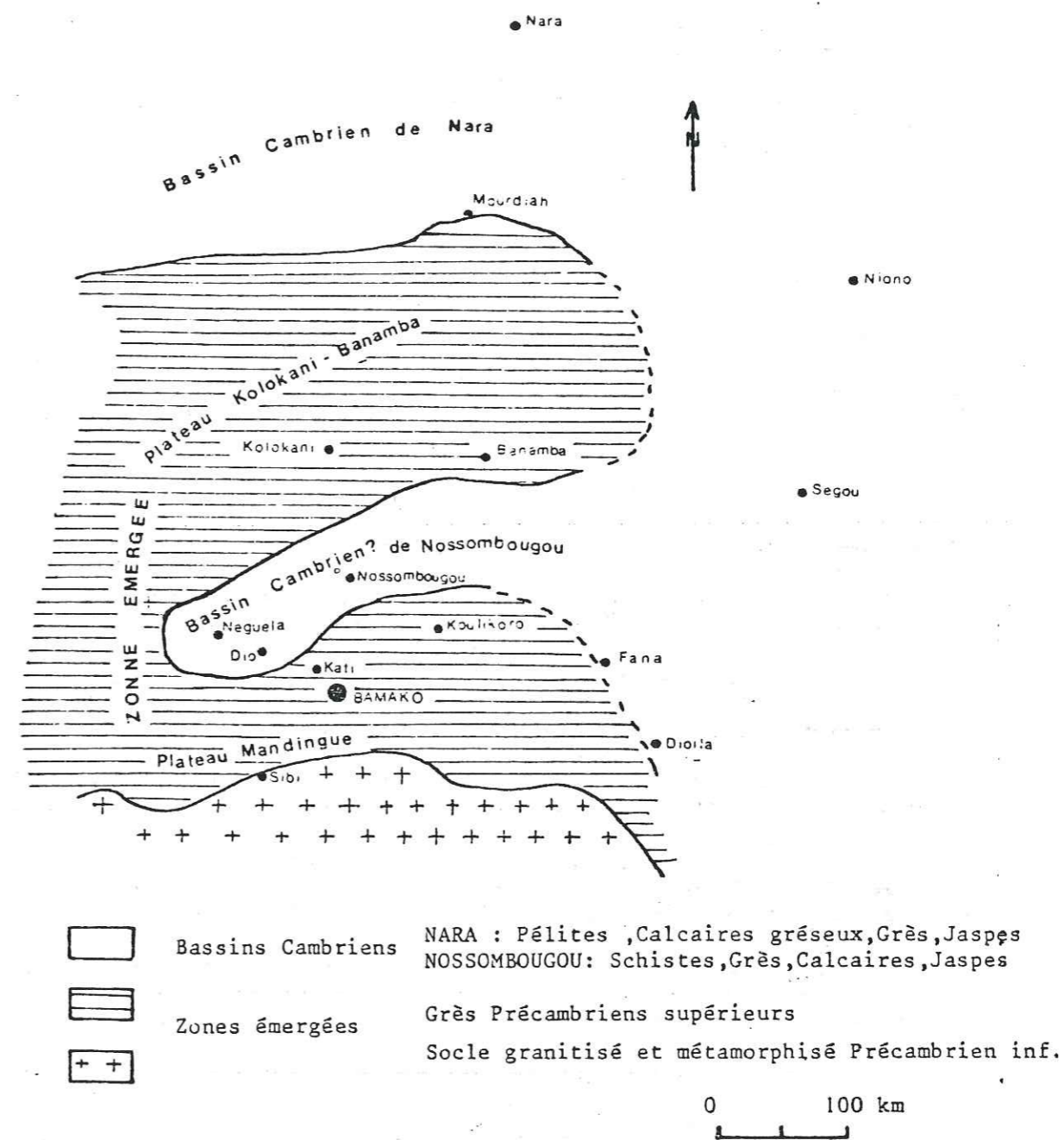
Les bassins de Nara et de Nossombougou constituent probablement des zones d'effondrement liées au réseau de fractures continental de direction WSW - ENE ; fractures qui ont été empruntées par le magma basique.

Le fait que l'on rencontre dans les forages, dans la partie Est de la zone, des schistes gris foncé à violacés riches en magnétites et en pyrite pourrait être en faveur d'une relation entre les deux bassins.

* Il semble qu'il y ait eu un article sur ce sujet, mais malheureusement nous n'avons pas pu avoir les références.

FIG. 18 - ESSAI DE RECONSTITUTION PALÉOGÉOGRAPHIQUE AU CAMBRIEN

RÉGION NORD DE BAMAKO



2.2.8. Conclusions

La Série de Koula-Nossombougou présente des caractéristiques lithologiques différentes de celles du reste des Plateaux mandingues.

Elle est constituée par une alternance de séquences schisteuses et de bancs gréseux, dans laquelle s'intercale un niveau de calcaires surmontés de jaspes. Une autre originalité de la Série est l'importance des intrusions de roches basiques, essentiellement des dolérites.

La Tillite "éocambrienne" qui sert de repère lithostratigraphique dans le bassin de Taoudéni, pour distinguer les formations du Précambrien de celles du Paléozoïque n'est pas reconnue dans cette partie du Mali. Ce qui a conduit jusqu'à présent à situer toutes les formations des Plateaux mandingues dans l'Infracambrien.

Cependant l'individualité de la Série de Koula-Nossombougou nous conduit à envisager la possibilité de conditions de sédimentation voisines de celles de la Série de Nara d'âge cambrien.

De grandes cassures ayant affecté la couverture infracambrienne auraient provoqué l'effondrement de certains compartiments dont ceux de Nara et de Nossombougou. Ces fossés ont été envahis par la mer cambrienne. Dans le cas du bassin de Nossombougou étroit (moins de 100 km sur le méridien de Nossombougou) et probablement peu profond, on peut envisager la succession des événements majeurs de la façon suivante :

- Dépôt des sédiments détritiques du groupe inférieur dans un bassin légèrement subsident à la fin de ce dépôt avec apparition de faciès glauconieux et du niveau de calcaire-jaspe.

- Une première intrusion basique a lieu à travers les fractures. Le magma traverse tout le groupe inférieur et s'épanche sous l'eau et est probablement interstratifié avec les derniers dépôts de schistes (présence de dolérites fines avec des stries orthogonales). Cette intrusion semble s'être produite alors que le dépôt de jaspes était peu consolidé et explique probablement l'aspect chaotique de ce niveau.

- Les intrusions s'accompagnent d'un soulèvement du bassin provoquant une émergence de certains niveaux. Après une période d'érosion s'installe une phase continentale avec le dépôt du groupe supérieur.

- Une seconde intrusion basique importante couronne enfin la série et est à la base du relief actuel.

Signalons que de telles conditions de sédimentation ont été proposées par BASSOT J.P. (1963) pour la Série de la Falémé au Sénégal et par LILLE R. (1967) pour la Série de Silibabi en Mauritanie.

Dans l'hypothèse d'un âge Cambrien de la Série de Koula-Nossombougou la question se pose de savoir si la tillite "éocambrienne" existe ou non ? Il nous est difficile de donner une réponse. Il est vraisemblable qu'elle ne s'y soit pas déposée. Les dépôts glaciaires qui provenaient d'un inlandsis situé au Nord : dorsale Réguibat, bassin de Tindouf, Anti-Atlas et qui progressaient vers le Sud (DEYNOUX, 1980) ont pu être arrêtés au niveau du bassin profond de Nara (+ 1000 m de sédiment d'après la géophy-

sique) par le paléorelief de Kolokani-Banamba. La limite entre les deux bassins se situerait dans l'axe Banamba-Niono.

Cette hypothèse demande à être vérifiée par des observations de terrain supplémentaires et surtout par des études pétrographique et sédimentologique que nous nous proposons de réaliser dans l'avenir.

CHAPITRE III

HYDROGEOLOGIE DE LA ZONE DE KOULA-NOSSOMBOUGOU

3.1. AQUIFERES SUPERFICIELS

3.2. AQUIFERES DU SUBSTRATUM FISSURE

3.3. CONCLUSION

C h a p i t r e I I I

HYDROGEOLOGIE DE LA ZONE DE KOULA - NOSSOMBOUGOU

Entité géologique, la série de Koula-Nossombougou constitue également une entité hydrogéologique. La lithologie particulière et surtout l'importance des intrusions de dolérites font que l'on rencontre dans la zone des conditions hydrogéologiques assez peu représentées dans le reste des Plateaux Mandingues. Les massifs doléritiques "calvaire" des hydrogéologues travaillant au Mali, il y a à peine deux ans, sont devenus maintenant un indice encourageant pour l'existence de zone aquifère.

Les ressources en eau souterraine de la zone sont contenues dans deux principaux types d'aquifères :

- un aquifère superficiel qui se situe dans les formations latéritiques et la frange altérée du substratum;
- un aquifère dit profond ou de fissure dans les zones fracturées du substratum rocheux.

Ces deux aquifères peuvent être en communication hydraulique plus ou moins directe suivant la nature du substratum.

3. 1. AQUIFERES SUPERFICIELS

Ils sont très répandus dans la zone et sont exploités grâce à des milliers de puisards par la population locale. La nappe est à surface libre. Son épaisseur et son importance sont variables suivant le contexte géomorphologique local et la nature lithologique du substratum. L'épaisseur est de l'ordre de 15 à 20 m sur les grès et peut dépasser 30 m sur les dolérites et les schistes.

Le milieu aquifère est de type intergranulaire avec une porosité totale importante. Mais la porosité utile est très variable, fonction de la fraction argileuse. C'est ainsi que les réserves les plus importantes sont sur les grès, malgré la faible épaisseur de l'altération, par rapport aux schistes ou dolérites présentant une frange altérée plus grande mais aussi une forte fraction fine.

La perméabilité est en général faible.

La différenciation verticale des profils latéritiques entraîne des variations des caractéristiques hydrauliques avec la profondeur :

- dans la zone aérée, les perméabilités verticales sont nettement plus élevées que les perméabilités horizontales (densité des racines, fissuration des zones cuirassées, terriers d'insectes, etc...). Les porosités sont aussi fortes (résistivité électrique de plusieurs centaines de ohm/mètres à plus de 2 000 ohm/mètre). Ceci favorise l'infiltration des eaux de précipitations et assure une bonne alimentation de ces aquifères.

- dans la zone de battement de la nappe, perméabilité et porosité utile sont plus faibles du fait de la prédominance argileuse, et dépendent

alors de la fraction sableuse.

- dans la zone saturée à la base des profils latéritiques et surtout dans la frange altérée du substratum, si celle-ci est gréseuse, la porosité et la perméabilité croissent. Mais la perméabilité reste toujours insuffisante pour la production de débits importants par des ouvrages de petits diamètres.

Les débits exploités atteignent exceptionnellement $10 \text{ m}^3/\text{jour/puits}$. Des débits importants peuvent être obtenus dans certaines conditions favorables par des puits modernes de gros diamètres.

3.2. AQUIFERES DU SUBSTRATUM FISSURE

3.2.1. Contexte hydrogéologique général

Les formations géologiques de la zone d'étude, par l'importance des séquences schisteuses et la resiliification des niveaux gréseux, présentent une porosité primaire très faible. Cependant, la fracturation plus ou moins intense qui les affecte leur confère une porosité secondaire de type fissural.

L'importance de la zone fracturée dépend de la compétence des formations et du type de fracturation. Ainsi on a des zones aquifères localisées, ou semi-généralisées à généralisées.

3.2.1.1. Aquifères localisés

Ces aquifères sont associés aux grandes fractures uniques qui se présentent sur les photographies anciennes sous forme de grands linéaments de plusieurs kilomètres, voir de quelques dizaines de kilomètres de long. Ces linéaments occupés ou non par des dolérites s'accompagnent d'une zone fissurée très étroite (quelques dizaines de mètres au plus) qui peut être le siège d'accumulation d'eau.

La localisation de ces aquifères est très difficile surtout si la fracture est occupée par un dyke de dolérite. Elle nécessite l'utilisation de prospections géophysiques et l'implantation des forages demande une grande précision (quelques mètres près).

Les débits instantanés peuvent être importants ($10 \text{ m}^3/\text{h}$), mais les rabattements induits sont très élevés.

Dans le cas où les fractures sont injectées de dolérites, la diminution de la perméabilité avec la profondeur est très rapide à cause du colmatage des fissures par les argiles résiduelles.

Ce type d'aquifère est rare dans la zone de Koula-Nossombougou où il est généralement associé aux aquifères semi-généralisés.

3.2.1.2. Aquifères semi-généralisés à généralisés

Les zones d'intense fracturation, s'étendant sur plusieurs km^2 et parfois sur plusieurs dizaines de km^2 , apparaissent dans les conditions suivantes :

- forte densité de linéaments ;
- présence de bancs de roches compétentes (grès, calcaires, jaspes)

encadrées par des niveaux schisteux ;

- alternance gréso-schisteuse en petits lits ;
- bordures de massifs épais de dolérites (laccolites, sills).

Le schéma hydrogéologique est assez complexe. L'aquifère associé aux zones fracturées est morcelé dans l'espace par les intrusions doléritiques et les plages de roches saines et compactes. Dans le plan vertical on note une stratification des venues d'eau avec des zones perméables associées préférentiellement à certains bancs plus fissurés qui sont mises en relation par les réseaux de fracturations subverticales.

Les eaux souterraines sont de ce fait contenues dans un aquifère discontinu constituant un ensemble multicouches à nappes semi-captives à captives.

Les résultats des travaux de forage et les données nouvelles sur la géologie de la région de Koula-Nossombougou permettent une meilleure connaissance du comportement hydrogéologique des différentes formations de la série.

3.2.2. Comportement hydrogéologique des différentes formations de la série de Koula-Nossombougou

3.2.2.1. Formations du groupe inférieur

Le groupe inférieur moins le niveau de calcaires-jaspes peut être considéré à l'échelle de la zone comme le "substratum" général des nappes souterraines par la prédominance des niveaux schisteux. Cependant ce caractère lithologique a favorisé l'intrusion des dolérites sous forme de sills ou de laccolites provoquant ainsi des zones très fracturées au contact des roches encaissantes, pouvant constituer des réservoirs d'eau souvent importants.

3.2.2.2. Niveau des calcaires et jaspes

Ce niveau, intercallé entre deux séquences schisteuses et affecté par une microfissuration intense, présente des potentialités aquifères très importantes. Quand on sait par ailleurs que les schistes supérieurs peuvent être localement absents, les jaspes étant directement surmontés par des grès grossiers, les conditions hydrogéologiques sont réunies pour un bon réservoir souterrain. A tous ces facteurs il faut ajouter les intrusions doléritiques qui, bien que morcelant l'aquifère, ont provoqué l'ouverture des fissures et leur intercommunication donnant lieu à des perméabilités souvent élevées ($1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ par pompage d'essai).

La répartition des débits d'essai fournis par 33 forages captant ce niveau montre l'importance de cet aquifère (Tableau ci-dessous).

Débit m^3/h	5	5 - 10	10 - 20	20 - 50	50
Nombre de forages	2	9	14	7	1
Pourcentage	6%	27,3%	42,4%	21,2%	3%

Tableau 2. - Répartition des débits des forages captant l'aquifère des calcaires-jaspes

On note que plus des 2/3 des forages ont un débit supérieur à $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ce qui est exceptionnel dans les plateaux mandingues où le débit moyen est de l'ordre de $5 \text{ m}^3/\text{h}$.

Le problème essentiel de cet horizon aquifère réside dans des difficultés de forage. La technique du "marteau fond-de-trou" désagrège ce niveau microfissuré provoquant des éboulements souvent difficiles à maîtriser. Cela a été par exemple le cas à Karadié où l'éboulement des jaspés a créé une caverne de plus de 2 m de diamètre au fond du forage. Le débit qui était de plus de $100 \text{ m}^3/\text{h}$ au cours du forage est tombé à $20 \text{ m}^3/\text{h}$ après que l'on ait pu le maîtriser.

3.2.2.3. Formations du groupe supérieur

Ces formations sont beaucoup plus perméables que celles du groupe inférieur, surtout avec le niveau de grès grossiers microconglomératique qui peut présenter localement de fortes perméabilités.

Cependant ces formations constituent un mauvais aquifère, les eaux qui s'y infiltrent ne rencontrant pas généralement de niveau imperméable suffisant pour s'y accumuler, elles jouent de ce fait le rôle de zone d'alimentation pour les aquifères sous-jacents. Ce rôle est d'autant plus important que ces formations affleurent largement dans la région d'étude et forment avec les dolérites les reliefs.

Dans certaines conditions favorables (présence de bancs de quartzites, de niveaux grés-schisteux), les grès grossiers forment localement des aquifères. C'est le cas dans toute la partie nord de la zone étudiée. Mais très souvent les épaisseurs captées sont faibles pour fournir des débits importants (5 à $10 \text{ m}^3/\text{h}$).

3.2.2.4. Dolérites

"La présence de dolérite est intéressante si son gisement est un dyke formant barrage souterrain. Si la dolérite est en sill, il est préférable d'arrêter le fonçage dès qu'on atteint la roche éruptive saine" (DARS, 1961).

Tel a été le comportement des hydrogéologues jusqu'à ces trois dernières années, et on ne peut dénombrer les forages abandonnés sur la dolérite considérée comme sans intérêt hydrogéologique. Ainsi des localités entières se voyaient-elles condamnées à plus ou moins long terme à se déplacer, leur approvisionnement en eau étant apparemment sans solution du fait qu'elles sont situées sur la dolérite. Or, comme le dit TOGOLA *"l'esprit de terroir, le respect de l'esprit des ancêtres, etc, sont très développés (chez les habitants) ; en se déplaçant ils perdent leurs droits."*

C'est dire l'acuité et la complexité du problème, d'autant plus que les seules ressources disponibles (nappes superficielles) s'épuisent avec la succession d'années pluviométriques déficitaires.

Certains hydrogéologues se sont souvent trouvés confrontés à des situations dramatiques et ont commencé à se poser la question du comportement hydrogéologique de cette roche qui devenait un "mythe" (TOGOLA, 1984).

Grâce aux travaux menés dans certaines régions du Mali et notamment dans la zone de Koula-Nossombougou, l'on a pu mieux cerner le problème.

Comme nous l'avons entrevu tout le long de ce chapitre, la dolérite

constitue un facteur essentiel des accumulations d'eau dans les formations sédimentaires de la zone de Koula-Nossombougou.

Son rôle est double :

- hydraulique : elle peut être une barrière ou au contraire un couloir privilégié des circulations d'eau ;

- hydrogéologique : sa mise en place fissurale au sein des formations sédimentaires s'accompagne de phénomènes tectoniques secondaires créant ainsi des conditions favorables à la formation de zones aquifères. Parmi ces phénomènes secondaires rappelons :

. l'élargissement de certaines fractures ou fissures existantes ;

. l'induration et la fissuration secondaire des roches encaissantes au contact avec le corps intrusif ;

. le rebroussement ou le microplissement de certains niveaux plus ou moins tendres.

L'importance de ces aquifères dépend de la nature lithologique des roches encaissantes et de l'épaisseur du massif intrusif.

Notons que le réseau de diaclases conjuguées affectant les dolérites et qui est à l'origine de leur altération en boules caractéristiques, favorise l'infiltration des eaux de précipitation, et font d'elles des zones d'alimentation possible pour les aquifères.

Les dolérites constituent également des aquifères dans certaines conditions favorables : sills plus ou moins épais, extrémités des laccolites.

Les tableaux (3a-3b) montrent bien l'importance de la dolérite dans les conditions aquifères des formations de la zone de Koula-Nossombougou.

C'est surtout au mur des massifs doléritiques que l'on rencontre les venues d'eau les plus importantes (N'Djila : $20 \text{ m}^3/\text{h}$, Diékouma : $8 \text{ m}^3/\text{h}$).

On remarquera que certains massifs sont très productifs : $17 \text{ m}^3/\text{h}$ à Mamaribougou, $14 \text{ m}^3/\text{h}$ à Donéguéla.

Tableau 3 a - Forages ayant traversé la dolérite dans la zone de Koula-Nossombougou (Extrait TOGOLA, 1984)

Localité	Forage	Prof. totale (m)	Prof. dolérite (m)		Profondeur venues d'eau (m)	Débit (m ³ /h)	Séquence lithologique
			toit	mur			
Tiessembougou	F1	69	18	43,5	32 et 43	5	D/GSc
	F2	49	18	43,5	42		"
Sirablé	F2	91	17	57	41-52-58	4,7	D/Sc/G
	F3	70	17	57	41-58		D/Sc
Fani	F1	103	67	83	40,50	0,1	GSc/D/GSc
	F2	115	43,5	105	41,5	1,6	"
Siramambougou	F1	94	38	49	33 à 38	6	J/D/C/Sc/G
	F4	61	39	50	33 à 38	9	J/D/C
Kossaba	F1	100	43-99	49-?	43	0,1	Sc/D/GSc/D
	F2bis	64	37	47	31-51 à 54	2,8	Sc/D/GSc
Wolonkotoba	F1	55	27	35	32-33-35-39	4	J/D/C/Sc
	F4	82	24-51	26-62	31	0,2	D/GSc/D/GSc
Bouana	F1	85	19	33,5	28 à 33,5	1,3	D/GSc
Tombougou	F1	79	51	67	68-70 à 76	11,7	J/Sc/D/GSc
Donéguéla	F2	106	49-68	52-?	42,6-48 à 50	4	Sc/D/GSc/D
Dialakoro	F1	106	23	54,5	54-97-101	8,7	D/G/Sc
	F2	61	14	51,5	39,5-51,5-57,5	20,3	
Mamaribougou	F1	100	37	61	-	sec	GSc/D/Sc
Siramangoni	F1	55	27,5	45	45,20	20	Sc/D/GSc
Banani	F1	70	10	52,5	58,5 à 64	17,5	D/Sc/G
	F2	91	15	51,8	33,8-69	2,5	"
Koula	F2	136	74,5	122,5	127	0,7	Sc/D/GSc
Kabana II	F1	100	80	93,5	97	7	GSc/D/Sc
N'Golobougou	F1	114,5	18,5	113,5	113,5	10	D/C
Warala	F1	145,5	18	136,6	70-145	8,7	D/C/GSc
Diékouma N	F1	133	9,5	127	133	8,7	D/C
N'Gabakoro T	F1	95,5	11	92	95	28	D/C/
Nonkon	F1	83,5	17	70	72,5-79,5	6,3	D/G
	F2	139	10	93	127-129	2,5	D/G
Siémon	F1	137	19	126,5	136,5	8,7	D/C
Dourako	F1	141,5	15	120,5	suintement à 120	-	D/Sc
N'Djila	F1	131,5	8,5	127,5	131,5	>20	D/C artésien
Wolodiédo	F1	151	25-102	93-140	Fract.colmatées à 147 et 150 m	-	Sc/D/G/D/Sc/G

Lithologie : C : calcaires D : dolérites J : jaspes G : grès
GSc : grès schisteux Sc : schistes.

Tableau 3 b - Forages captant l'aquifère de la dolérite.

Localité	Forage	Prof. totale (m)	Prof. dolérite (m)	Profondeur venues d'eau (m)	Débit (m ³ /h)	Lithologie
Noumoubougou	F2	61	19	28-44-50 à 55	3,6	D
Kona	F1	91	69	60,5	0,1	GSc/D
Félou	F1	70	26	59,8	6,2	GSc/D
Donéguéla	F1	89	53	81-84,5	14	GSc/D
Mamaribougou	F2	70	28	64,8-66,5	17,5	GSc/D
Nonkon	F3	70	12	44 - 59,8	8,7	D

Lithologie : C : calcaires ; D : dolérites ; J : jaspes ; G : grès ;
GSc : grès schisteux ; Sc : schistes.

3.2.3. Rapport entre la profondeur des venues d'eau et le débit

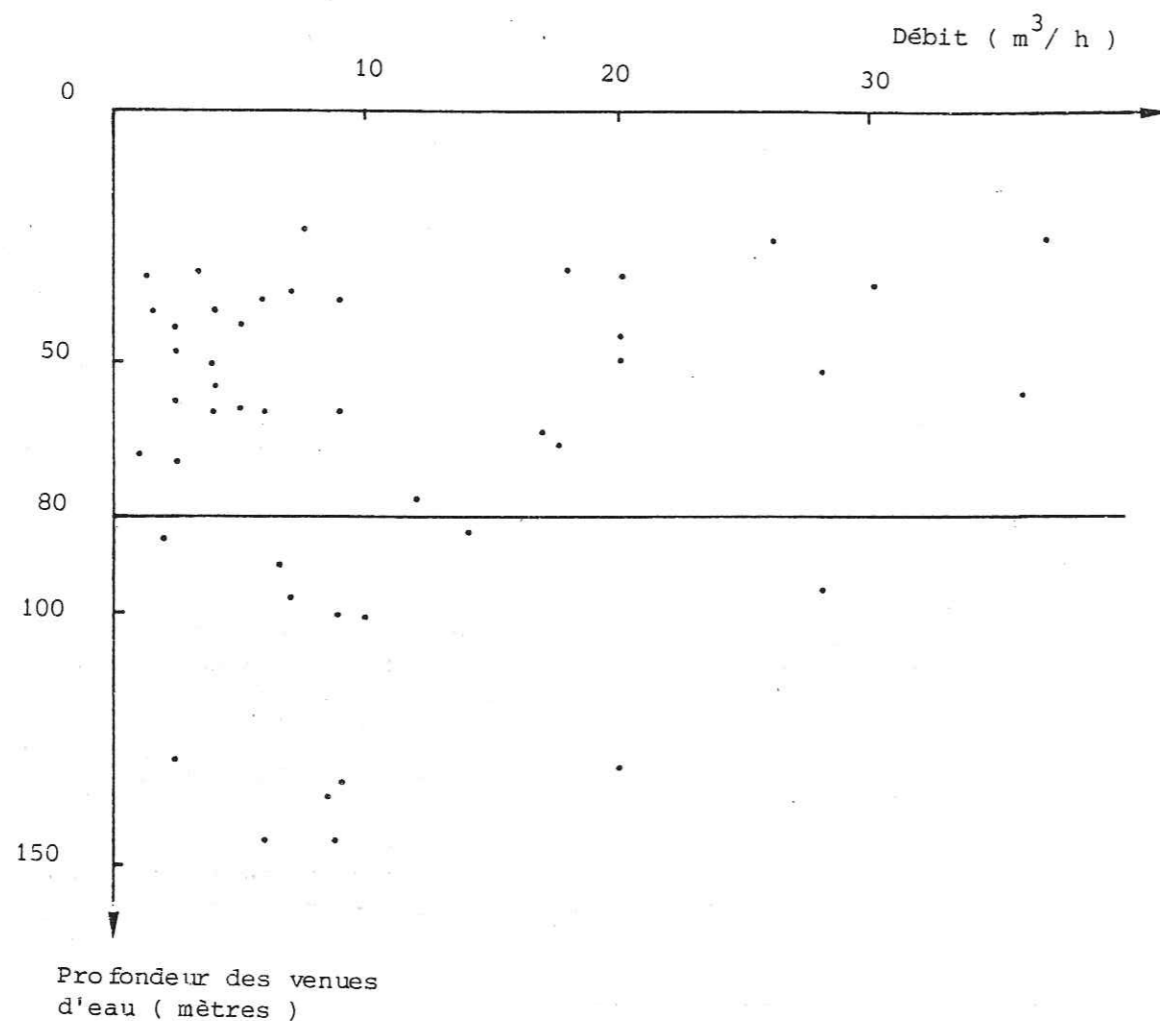
De l'analyse des résultats d'environ 980 forages dans les formations gréseuses, on avait abouti aux conclusions suivantes :

"Près de 80 % des venues d'eau assurant un débit mesurable à l'air-lift, c'est-à-dire au minimum quelques centaines de litres/heure, sont localisées entre 20 et 60 mètres de profondeur. Au-dessous de 80 m, elles sont rares, et, au-delà de 100 m, elles deviennent exceptionnelles et de faible importance même si quelques venues d'eau plus profondes ne sont pas exclues."

"Les grès infra-cambriens ne sont donc aquifères que sur une épaisseur limitée n'excédant pas, en général, les 100 premiers mètres sous la surface et les débits exploitables sont principalement rencontrés dans la tranche des 50 premiers mètres (PNUD, 1982)".

Ces conclusions, à la lumière des résultats obtenus dans notre zone d'étude, ne se justifient pas. On note sur la figure 19 qu'il n'existe pas de relation simple entre la profondeur des venues et le débit ; en outre, les venues d'eau à plus de 80 mètres de profondeur ne sont pas si exceptionnelles et les débits sont importants (plus de 20 m³/h dans le forage artésien de Djila avec la venue d'eau à 131 m de profondeur).

Fig. 19 Relation entre profondeur des venues d'eau et le débit



Les conclusions du rapport PNUD sont cependant logiques quand on sait que moins de 2% des forages ont atteint une profondeur totale de 100 m et que la profondeur moyenne des forages est de 50 m contre plus de 90 m dans la zone de Koula-Nossombougou.

Si en milieu fissuré on note en général une fermeture des fractures avec la profondeur, diminuant ainsi les conductivités hydrauliques (C. LOUIS, 1975), le contexte particulier, lié aux intrusions de la dolérite, fait que les eaux de précipitation peuvent s'infiltrer à une très grande profondeur comme semble le confirmer la minéralisation élevée de certaines eaux souterraines.

Il n'est donc pas raisonnable de se fixer une profondeur limite au-delà de laquelle il n'existe pas d'accumulation d'eau exploitable. Les seules contraintes ne pouvant être uniquement que d'ordre technique et/ou économique.

3.3. CONCLUSION

La zone de Koula Nossombougou présente des conditions hydrogéologiques particulières en raison de la présence du niveau de calcaires et de jaspe, et de l'importance des intrusions doléritiques.

La dolérite, bien que morcelant les aquifères, a par sa mise en place fissurale provoque une fracturation secondaire des formations sédimentaires propice à des accumulations d'eau importantes.

Le comportement hydrogéologique des différentes formations de la série peut être schématisé par la figure 20.

- Les formations du groupe supérieur, par leur granulométrie plus ou moins grossière et la fracturation qui les affecte et du fait qu'elles affleurent largement dans la région, favorisent l'infiltration des eaux de précipitation, alimentant les aquifères sous-jacents. Localement elles peuvent être aquifères à la faveur d'un sill de dolérite ou d'un banc compact. Ces nappes sont généralement en liaison hydraulique avec la nappe superficielle des formations latéritiques.

- Le niveau des calcaires et des jaspes très fissuré et reposant sur des schistes, constitue le principal aquifère de la région.

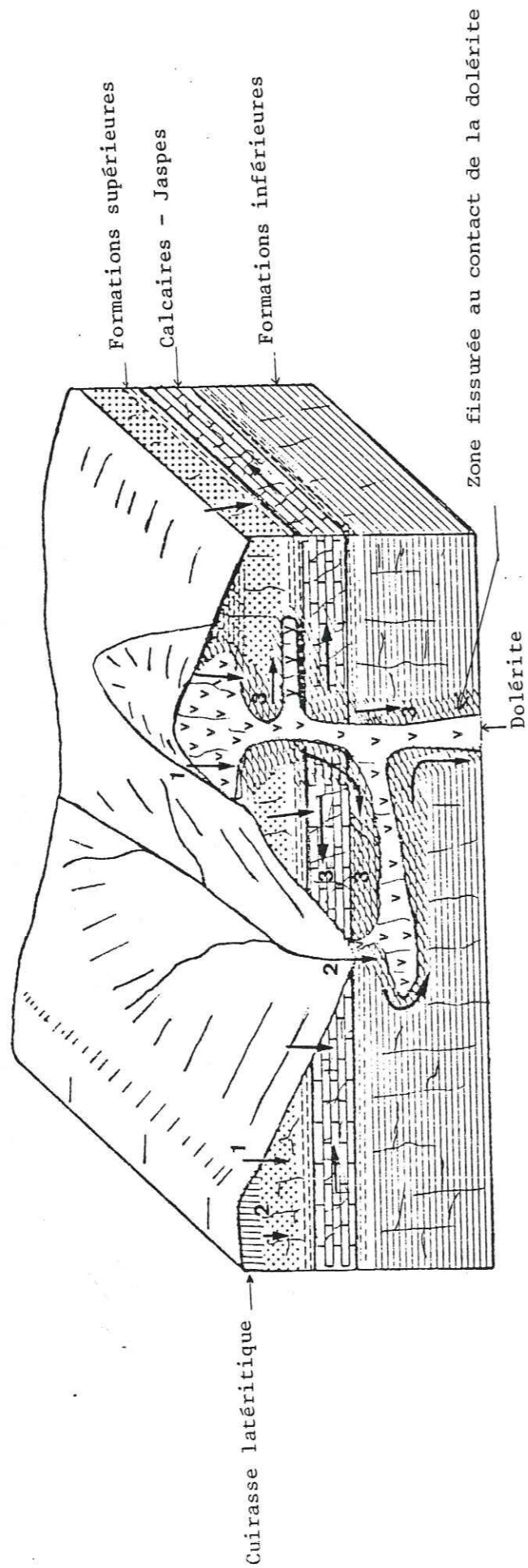
- Les formations du groupe inférieur ne doivent leur possibilité aquifère qu'à la présence de la dolérite.

- La dolérite, outre qu'elle a provoqué des conditions aquifères favorables dans les formations sédimentaires, participe également à l'alimentation des nappes et elle est aquifère.

En résumé, les nappes d'eau souterraine de la région d'étude sont contenues dans un aquifère discontinu, à perméabilité de fissure, morcelé dans l'espace par la dolérite et par les plages de roches compactes et constituant un ensemble multicouche avec des zones perméables stratifiées qui sont mises en relation par les fractures subverticales ou par les zones fracturées au contact des intrusions de dolérite.

Le schéma hydraulique complexe qui en découle rend difficile l'interprétation des données géochimiques, isotopiques et des pompages d'essai.

Fig. 20 Bloc-diagramme schématisé des infiltrations et circulations d'eau dans les formations de la série de Koula - Nossombougou



- 1 - Infiltration directe par les fissures des roches affleurant.
- 2 - Infiltration indirecte soit à partir des fonds de marigots, soit à partir de la nappe des formations latéritiques.
- 3 - Zones de circulation et d'accumulation possible des eaux (contacts encaissant/dolérite, calcaire, jaspes)

CHAPITRE IV

METHODES DE PROSPECTION ET IMPLANTATION DES FORAGES

4.1. INTRODUCTION

4.2. METHODES HYDROGEOLOGIQUES ET GEOMORPHOLOGIQUES

4.3. METHODES GEOPHYSIQUES

4.4. EXEMPLES D'IMPLANTATIONS

4.5. CONCLUSIONS

Chapitre IV

METHODES DE PROSPECTION ET IMPLANTATION DES FORAGES

4.1. INTRODUCTION

Les principales ressources en eaux souterraines de la région sont localisées dans des aquifères fissurés, souvent très profonds. Leur exploitation nécessite généralement des ouvrages de petit diamètre.

Le caractère discontinu des nappes fait que l'implantation de tout ouvrage doit être précédée d'une étude détaillée. Devant le manque de structures adéquates le Gouvernement malien, dès les années 60, a confié au PNUD le "Renforcement des Services gouvernementaux de Recherche et de Mise en Valeur des Ressources en Eaux". Une méthodologie a donc été mise au point.

Elle n'a cessé de s'améliorer au fil des ans, comme l'atteste le taux de réussite des forages productifs*, qui est passé de 25 % à 70 % entre 1974 et 1983 et à presque 90 % en 1984.

Ces résultats encourageants ont été obtenus grâce à une imbrication étroite entre les différentes méthodes, géomorphologie, hydrogéologie et géophysique. Les résultats de chaque forage sont systématiquement confrontés avec les hypothèses hydrogéologiques et géophysiques qui ont défini son implantation avec une réinterprétation, le cas échéant.

4.2. METHODES HYDROGEOLOGIQUES ET GEOMORPHOLOGIQUES

Elles comportent les études de terrain classiques (géologie, géomorphologie, photogéologie) et l'inventaire des points d'eau traditionnels. Cette première étude permet d'établir le programme de l'étude géophysique.

- L'inventaire des points d'eau traditionnels permet de recueillir des informations sur les nappes superficielles (piézométrie, épaisseur du recouvrement latéritique, nature des horizons aquifères et du substratum...etc.). L'évaluation des ressources et des besoins en eau de chaque village, sur la base de 40 l/jour/habitant (recommandation de la "Décennie de l'eau potable et de l'assainissement") est faite afin de fixer les priorités.

* Un forage est considéré productif quand son débit est au moins égal à 1 m³/h.

- La Géomorphologie est d'un apport appréciable aux investigations de terrain. Son importance n'a d'ailleurs pas échappé aux villageois. Les sites des villages sont dans de petites dépressions peu marquées en bordure des plateaux latéritiques, ou dans les vallées plus ou moins larges entre les collines. Dans le premier cas les puits sont à mi-pente entre les plateaux et le fond de la cuvette, et dans le second, sur les replats entre le cours d'eau et les collines. On le voit ces implantations répondent au souci de traverser une épaisseur suffisante de recouvrement, mais aussi de mettre les ouvrages à l'abri des eaux de ruissellement.

Pour l'hydrogéologue, le principal indice géomorphologique est le réseau hydrographique. Son tracé correspond généralement à celui des fractures. Il permet ainsi de localiser avec une plus ou moins bonne précision, les linéaments visibles sur les photographies aériennes et souvent masqués au sol par le recouvrement et la végétation.

Dans les larges vallées où le tracé du réseau hydrographique est parfois mal défini, les linéaments sont repérés grâce à l'alignement de certains arbres.

Une fois la fracture localisée, l'hydrogéologue, dans son implantation, doit avoir le même souci que le villageois : être aussi près que possible de la fracture afin d'atteindre l'aquifère mais suffisamment éloigné pour éviter l'inondation.

- Géologie et photo-interprétation

L'inexistence de carte géologique dans nos régions fait que les photographies aériennes constituent l'outil principal de l'hydrogéologue. Elles permettent, une première esquisse géologique, et surtout d'établir une carte de linéaments qui servira de support à l'étude géophysique.

Une bonne connaissance de la géologie et surtout de la lithostratigraphie est un préalable à la recherche d'eau souterraine. Outre qu'elle permet une bonne interprétation des profils et sondages géophysiques, elle aide l'hydrogéologue dans sa prise de décision concernant l'abandon ou la poursuite d'un forage. Il arrive aussi que le site le plus favorable implanté par le géophysicien ne soit pas à proximité immédiate du village. C'est à l'hydrogéologue, compte tenu du contexte géologique et hydrogéologique, de changer ou non de site.

Enfin la connaissance du contexte géologique et hydrogéologique permet dans certains cas d'abaisser le coût du forage en économisant l'étude géophysique avec une chance de réussite (Takoumata).

4.3. METHODES GEOPHYSIQUES

Plus de 90 % des forages sont implantés après étude géophysique. Cette part privilégiée de la géophysique s'explique par le fait que l'hydrogéologue ne dispose que d'un nombre de critères d'implantations limités ; critères qui sont des indications de surface, répercutant plus ou moins distinctement des anomalies du substratum à travers les formations de recouvrement. Le géophysicien, en revanche, a un ensemble de paramètres quantitatifs, aussi bien dans le plan vertical qu'horizontal, qui lui permettent de définir, avec une plus grande précision, l'anomalie dans le substratum, sa géométrie et ses caractéristiques.

Trois méthodes géophysiques sont utilisées au Mali dans la recherche d'eau souterraine : électrique (résistivité), magnétique et sismique réfraction.

Dans notre secteur seules les deux premières sont employées ; la sismique s'adaptant mal aux conditions géologiques. Ces méthodes sont utilisées seules ou combinées suivant le contexte géologique local.

4.3.1. Méthodes électriques

Les zones fracturées par les vides qu'elles présentent et pouvant être plus ou moins remplies d'eau, constituent des compartiments conducteurs dans un milieu électriquement résistant. La méthode des résistivités est de ce fait assez bien adaptée aux différents problèmes à résoudre. Elle est en outre aisée à mettre en oeuvre.

Elle comporte les profils de résistivités et les sondages électriques.

Le dispositif de mesure est celui de Schumberger. Rappelons brièvement que ce dispositif est un quadripôle AMNB rectiligne et symétrique avec un rapport AB/MN variable (compris entre 4 et 20). fig. 21

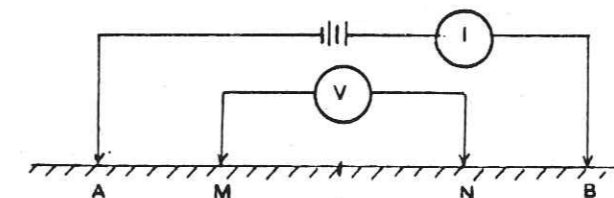


Fig. 21 - Dispositif SCHUMBERGER

AB est la ligne d'envoi de courant et MN la ligne de réception. La profondeur d'investigation augmente avec la distance AB fig. 22 .

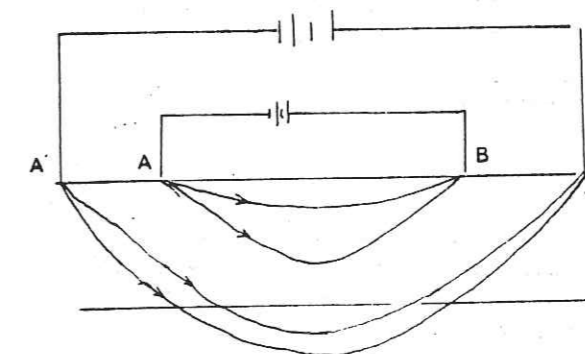


Fig. 22 Sondage électrique

- Le profilage électrique permet de localiser sur le terrain les discontinuités du substratum reconnues par l'hydrogéologie sur les photographies aériennes. Il se fait par trainé simple avec les longueurs AB de 200 à 300 m et les lignes de réception de 10 à 15 m.

- Les sondages électriques sont exécutés sur les points favorables du profil électrique. Ils permettent de reconnaître les niveaux perméables et de fournir au foreur une séquence probable des terrains à traverser ainsi que la profondeur optimale à atteindre. Les lignes d'émission AB ont une longueur de 600 à 1000 m.

4.3.2. Méthode magnétique

Cette méthode est très utilisée dans notre secteur, où les intrusions doléritiques sont fréquentes. Ces intrusions ausein des séries sédimentaires entraînent une variation significative du champ magnétique total.

Principe

Il existe en tout point du globe un champ magnétique dit normal qui résulte d'un champ interne d'origine mal connue, et d'un champ externe lié aux courants induits de l'ionosphère.

Le champ total qui est un vecteur espace est défini par 3 composantes : les composantes horizontale H ou verticale Z, l'inclinaison I et la déclinaison D. L'unité de mesure est l'oersted ; mais on emploie généralement le gamma (γ), $1 \text{ gamma} = 10^{-5} \text{ oersted}$.

Les différentes roches de l'écorce terrestre qui sont soumises à l'action du champ s'aimantent et créent un champ magnétique supplémentaire d'intensité $\vec{I} = k \vec{H}$

k est la susceptibilité magnétique et caractérise l'aptitude de la roche à s'aimanter. Elle dépend de la teneur des roches en minéraux ferromagnétiques (magnétite, ilménite).

En unité C.G.S la susceptibilité magnétique des roches sédimentaires ne dépasse pas 200, alors qu'elle peut atteindre 5000 dans les dolérites (P. LASFARGUES, 1966).

Si dans une région donnée, les roches sous-jacentes ont une susceptibilité magnétique constante, les variations du champ magnétique restent faibles, d'un point à un autre du sol. Mais la présence d'une roche à susceptibilité magnétique supérieure à celle des terrains encaissants crée un champ magnétique \mathcal{H} dit anormal. On aura donc un champ résultant $\mathcal{H} + \Delta \mathcal{H}$ appelé anomalie magnétique. C'est la détermination de cette anomalie qui constitue l'objet de la prospection magnétique.

Appareils de mesure et mise en oeuvre

Au cours d'une prospection magnétique on mesure soit la variation de la composante verticale du champ ΔZ soit le champ total.

Dans notre secteur c'est le champ total qu'on mesure avec un magnétomètre à proton, portatif.

La mise en oeuvre sur le terrain ne présente pas de difficultés particulières. La longueur du profil à exécuter dépend de l'anomalie à étudier.

Dans le cas d'un dyke de dolérite les mesures commencent à 100 m environ de la limite latérale Sud pour une orientation E-W du dyke. Pour les orientations N-S le sens du profil importe peu. Les mesures sont généralement distantes de 20 m, mais cet écartement doit être réduit à 10 voire 5 m au fur et à mesure qu'on s'approche du corps intrusif, afin de localiser avec précision les limites latérales.

Dans les zones d'intrusions sous forme de massifs les profils doivent être exécutés perpendiculairement aux structures géomorphologiques (collines, zones d'écoulements des eaux). Les profils atteignent souvent 2000 m de long.

4.4. EXEMPLES D'IMPLANTATIONS

Il n'y a pas de règles générales d'implantation des forages. La diversité des aquifères fait que chaque site requiert une interprétation spécifique des différents méthodes mises en oeuvre.

Nous présentons ici les cas les plus fréquents que l'on rencontre.

4.4.1. Aquifères associés aux linéaments

Qu'ils soient injectés ou non de dolérites, les grands linéaments visibles sur les photographies aériennes, sont difficiles à repérer sur le terrain. C'est alors à la géophysique de préciser la position.

- Dans le cas d'un linéament sans intrusion doléritique un profil électrique suffit généralement pour localiser la fracture qui présente alors une anomalie conductrice. Un ou deux sondages électriques permettent de déterminer le site favorable qui se situe généralement au coeur de la fracture.

- Si le linéament est injecté de dolérites en plus du problème de localisation (cas de dyke enfoui), il faut déterminer avec précision les épaisses de l'intrusion. Il est dans ce cas conseillé de faire 2 profils électrique et magnétique, toujours suivis de sondages électriques.

Dans le cas où le dyke de dolérite est vertical ou subvertical la localisation est facile, le contact avec les roches encaissantes étant assez franc. Mais la zone fracturée associée est très réduite et les débits faibles. C'est le cas à Sébélikélé (fig. 23).

Lorsque le dyke est incliné, sa localisation est mal aisée, l'anomalie magnétique pouvant être décalée par rapport au filon. La zone fracturée peut être importante au toit du filon. Pour l'implantation, il est conseillé d'exécuter un ou deux forages peu profonds afin de déterminer le pendage. Le site du forage de captage devra être choisi de manière à descendre beaucoup plus bas que le niveau statique local (puits traditionnel) avant d'atteindre le contact de roches encaissantes-dolérite (TOGOLA, 1984).

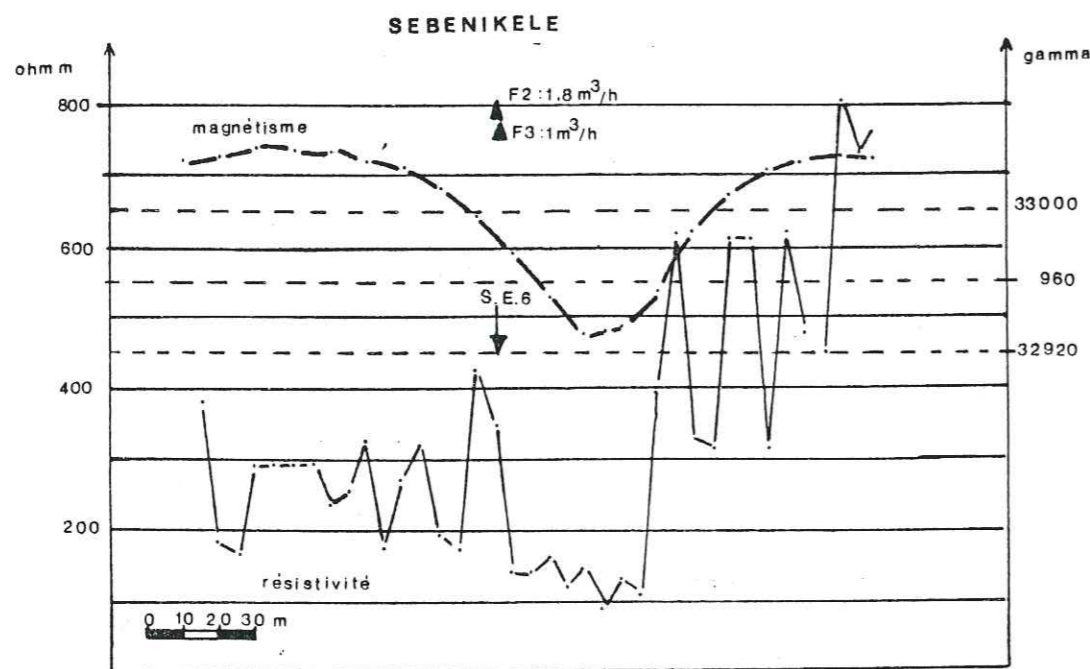


Fig. 23 Sébenikélé - Profils magnétique et électrique

4.4.2. Aquifères associés à une fracturation semi généralisée

L'implantation au niveau de l'aquifère des calcaires-jaspés ne pose pas de problème particulier et relève des méthodes hydrogéologiques classiques. La géophysique n'étant nécessaire que pour éventuellement déterminer la profondeur.

Par contre les aquifères associés aux massifs doléritiques demandent l'association étroite entre toutes les méthodes géologiques, géophysiques, résultats des forages.

4.4.2.1.- Tiessembougou (fig. 24).

Le profil magnétique présente des ondulations plus ou moins symétriques dont l'amplitude croît régulièrement vers le NW (100 gammas au SE et 300 au NW). Il marque la présence de dolérite à plus ou moins faible profondeur.

Le sondage électrique S.E. 7, exécuté dans la zone de faible amplitude magnétique donne une courbe à 4 terrains, avec 2 couches conductrices et 2 résistants.

La coupe géologique du forage, donne 3 formations. On note cependant que la dolérite est très fissurée sur 12 mètres environ et que c'est à ce niveau qu'apparaissent les venues d'eau. La 2ème courbe conductrice correspond donc à ce niveau de dolérite fissurée aquifère.

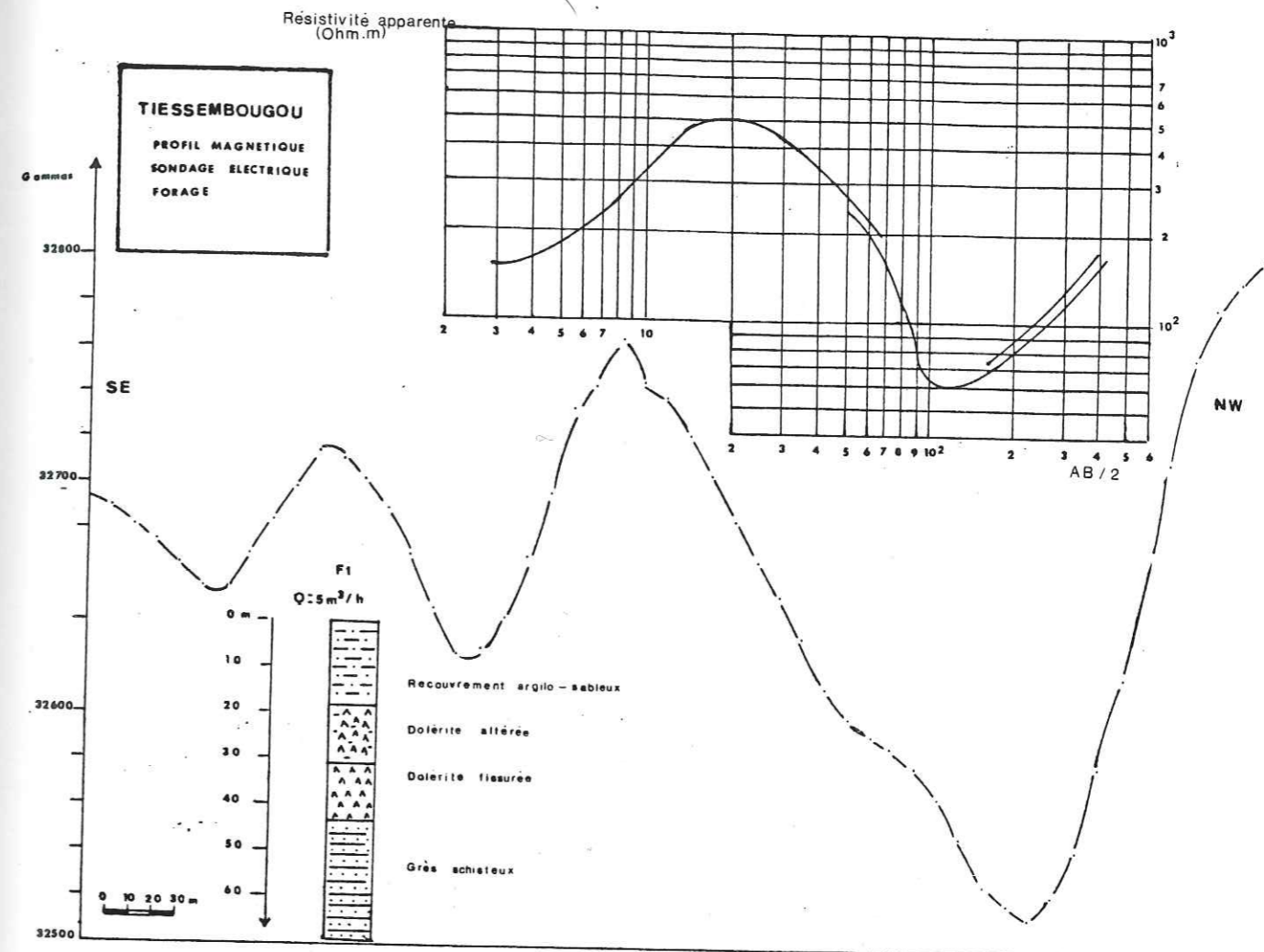


Fig. 24 Tiessembougou - Profil magnétique, sondage électrique et coupe de forage.

4.4.2.2. - Sirablé (fig. 25 et 26)

Cette localité est située à l'Est de Tiessembougou. Le profil magnétique présente des ondulations plus irrégulières que précédemment. On note un léger accroissement du champ magnétique vers le Sud. Cette variation est très marquée sur le profil électrique où la résistivité passe de quelques dizaines d'ohm.m au Nord à plus de 1000 ohm. mètres au Sud. Le sondage S.E.1 est effectué dans la zone de brusque variation du profil électrique qui correspond aussi à un léger pic sur le profil magnétique.

La courbe est du même type qu'à Tiessembougou (4 terrains) et la séquence lithologique est la même, mais l'allure est différente. La deuxième courbe conductrice est peu marquée en raison d'une faible fissuration de la dolérite. On observe aussi une sorte de "stabilisation" de la fin de la courbe notant probablement la fin des grès schisteux ou une variation de faciès.

Fig. 25 Sirablé - Profils magnétique et électrique, coupe de forage

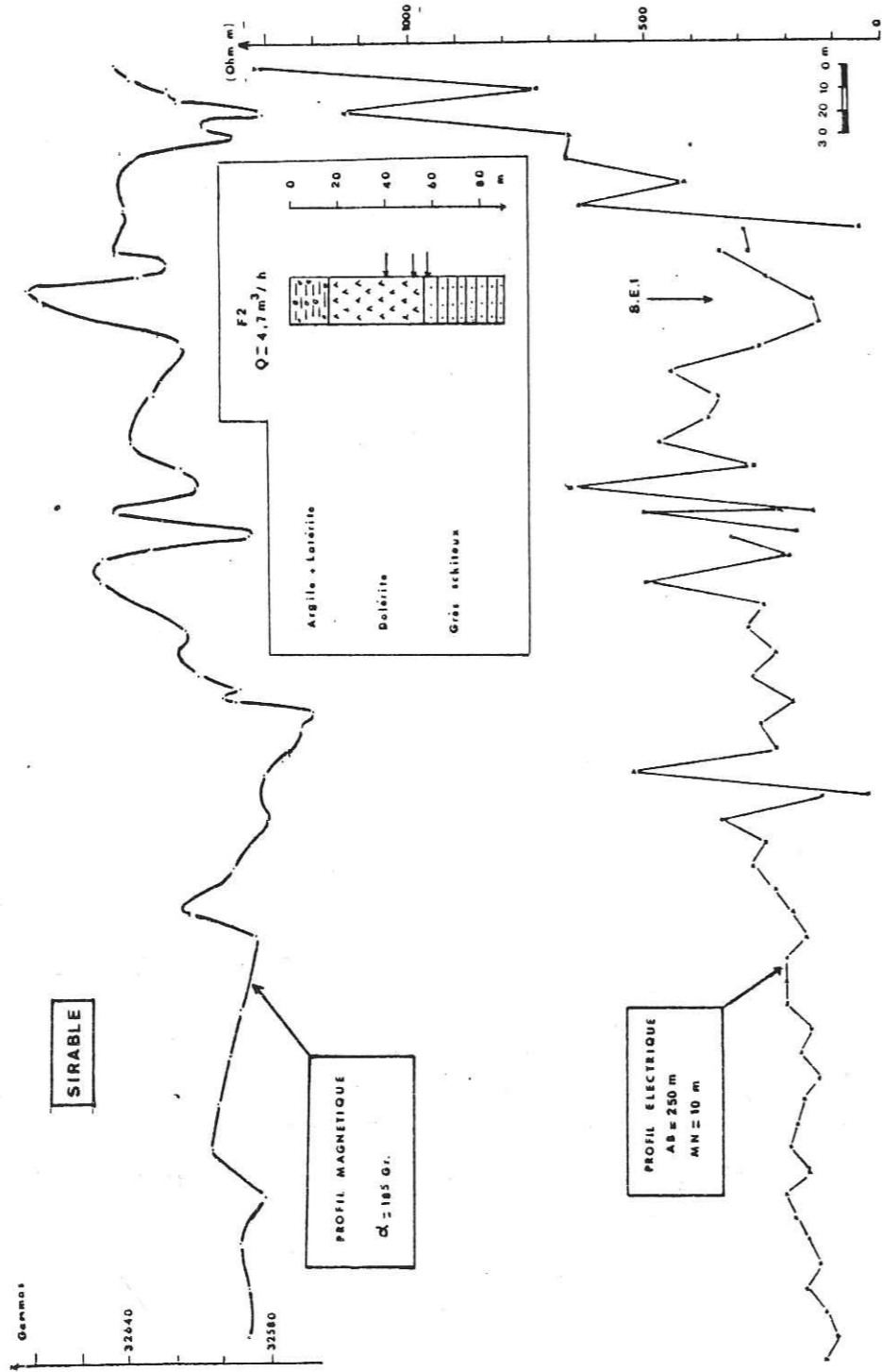
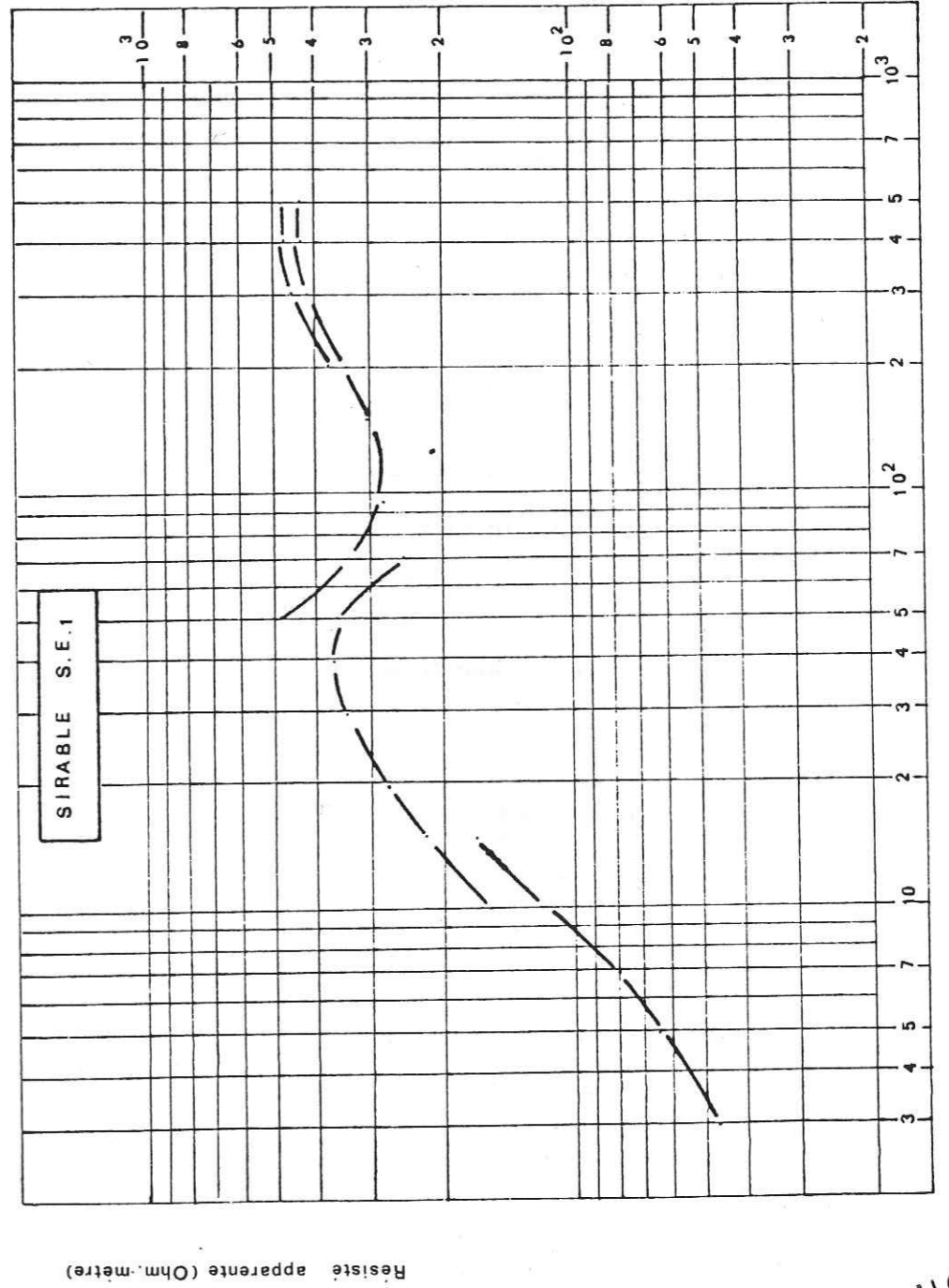


Fig. 26 Sirablé - Sondage électrique



25 AOUT 2003

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail: ptalour@ujf-grenoble.fr

4.4.2.3- Bassala (fig. 27 et 28)

Ce village n'est pas situé dans notre secteur d'étude.

Ce site a posé un problème d'implantation à partir des courbes de sondage dont la résolution a permis une connaissance meilleure du rôle hydrogéologique de la dolérite.

Le profil magnétique présente une large anomalie limitée au Sud par un pic à plus de 33000 gammas et au Nord par une série de petites oscillations d'amplitude de plus en plus faible.

Trois sondages électriques exécutés à environ 200 mètres l'un de l'autre sur le profil, donnent des courbes d'allure différente.

Les sondages S.E.11 et S.E.13 au Sud ont un début de courbe en fond de bateau, par contre la courbe du S.E.12 débute par un escalier montant ; la résistivité apparente tombant brusquement de 2000 ohm.mètres à 40 ohm.mètres.

Les interprétations géophysiques ont donné les séquences lithologiques suivantes :

- recouvrement, dolérite, grès pour S.E.11 et S.E.13
- recouvrement, grès (quartzite), dolérite, grès pour S.E.12.

On constatait aussi un accroissement de l'épaisseur de la dolérite du Nord vers le Sud.

Le forage F1 implanté sur le S.E.11 donne la coupe géologique suivante :

- 0 m à 17 m - recouvrement argileux
- 17 m à 63 m - Dolérite saine
- 63 m à 70 m - Grès fracturés
- 70 m à 81 m - contact grès-dolérite

On note un suintement à la cote - 70 m avec un débit de 100 l/h.

Devant l'insuffisance du débit la sondeuse a été déplacée vers le Nord sur le S.E.12, où la courbe laisse présager une zone fracturée au contact de la dolérite.

- 0 à 2 m - limons
- 2 à 8 m - Latérite
- 8 à 38 m - Grès quartziques
- 38 à 54,50 m - Dolérites
- 54,50 à 70 m - Grès.

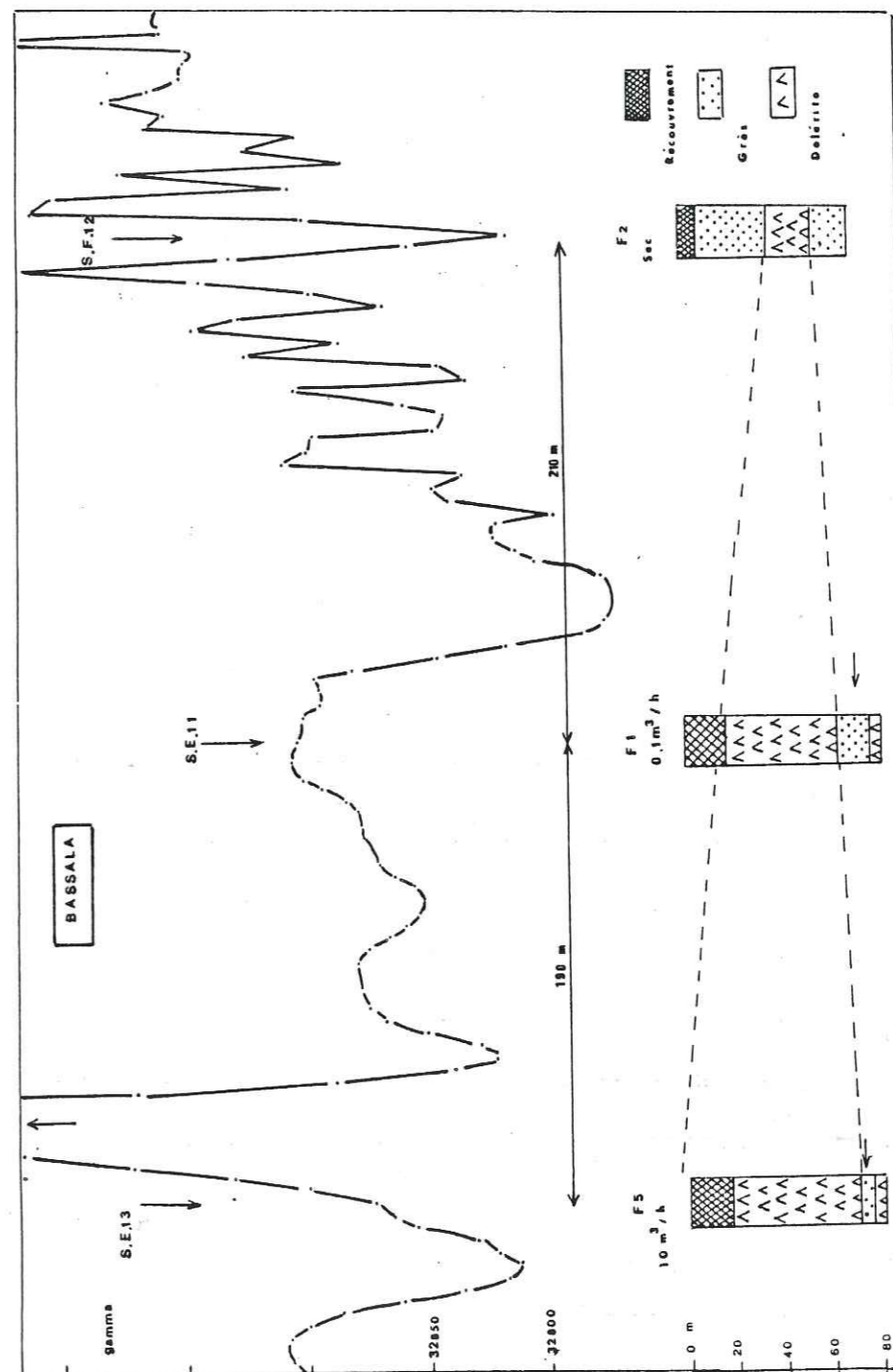
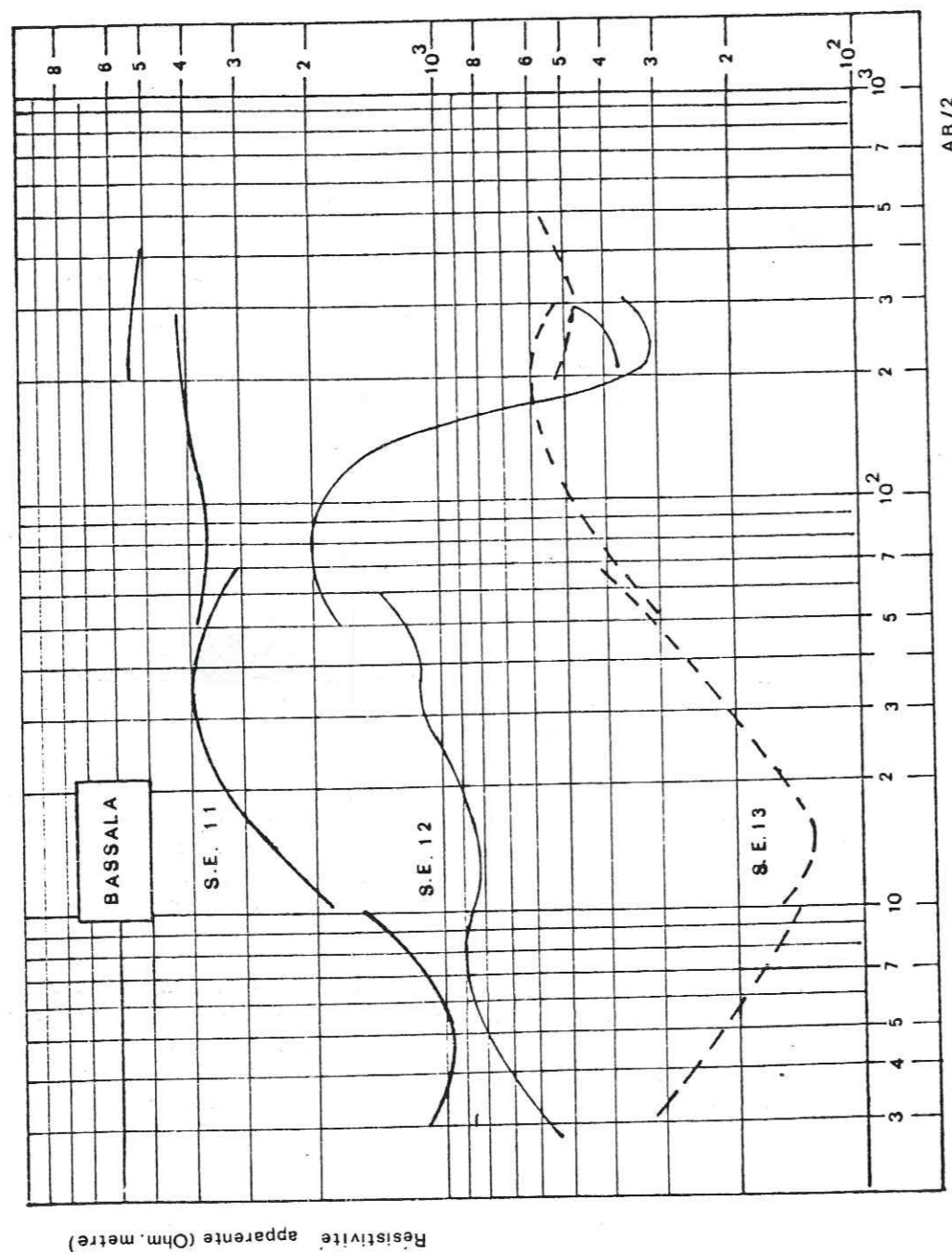


Fig. 27 Profil magnétique, coupe de forage.

Fig. 28 Bassala - Sondages électriques



Ce forage est sec, on a seulement observé une humidité à 55 m sans débit mesurable. Un troisième forage exécuté à 5 mètres est aussi négatif.

Il a fallu tenter un 4ème forage sur le S.E.13 sans grand espoir, les fortes épaisseurs de dolérite s'étant jusqu'à présent révélées stériles. La coupe géologique est presque la même que celle du F1, avec cependant une diminution de recouvrement (15,5 m) et un accroissement de l'épaisseur (52,50 m) de la dolérite. Il a atteint 91 mètres de profondeur totale avec 3 venues d'eau dans les grès et un débit de 3,2 m³/h. Un 5ème forage à 10 m du F5 a fourni 10 m³/h.

Malgré une assez bonne interprétation des courbes de sondages électriques (concordance avec les coupes géologiques des forages), le choix du site favorable n'a pas été facile.

Les sills de dolérite peu épais (30 à 50 m) se comportent généralement sur les courbes de sondage électrique comme des conducteurs, laissant penser à des zones fracturées aquifères. Il faut être prudent car ces sills sont le plus souvent stériles. Les faibles résistivités sont dues aux argiles provenant de l'altération des dolérites.

4.5. CONCLUSION

Les méthodes géophysiques adaptées à la recherche d'eau souterraine dans le secteur sont les méthodes de résistivité et les méthodes magnétiques. Pour être efficaces elles doivent être associées à des études géologique et hydrogéologique de détail.

Les profils magnétiques et électriques ne posent généralement pas de problème d'interprétation. Les anomalies sont très souvent bien nettes et permettent une assez bonne localisation des structures géologiques (faille, dyke, etc.).

L'interprétation des sondages électriques est par contre délicate. L'hétérogénéité des faciès amène le géophysicien à proposer plusieurs interprétations, ce qui rend difficile le choix du site favorable. Il n'existe pas une allure de courbe de sondage type favorable à l'implantation. L'épaisseur et surtout la profondeur des différentes courbes sont les critères déterminant l'implantation.

La longueur de la ligne AB (1000 m) ne permet pas toujours de déterminer l'épaisseur du dernier résistant (faible profondeur d'investigation). Ceci peut être gênant surtout dans le cas des dolérites où c'est le mur qui présente l'intérêt hydrogéologique. Des lignes d'envoi de courant plus longues que 1000 m sont donc à conseiller dans de tels contextes.

CHAPITRE V

CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES : POMPAGES D'ESSAI

5.1. INTRODUCTION

5.2. METHODE DE POMPAGE

5.3. INTERPRETATION DES POMPAGES

5.4. CONCLUSION

C h a p i t r e V

CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES : POMPAGES D'ESSAI

5.1. INTRODUCTION

Les forages à débit suffisant (5 m³/h) font généralement l'objet de pompages d'essai de 12 à 24 heures de durée. Les forages étant très souvent doublés sur chaque site, on dispose dans bien des cas de mesures sur l'ouvrage capté et au moins un piézomètre d'observation.

L'évolution des rabattements dans ces ouvrages suit les lois générales de l'hydrodynamique, aussi bien à la descente qu'à la remontée ; et permet ainsi l'utilisation des méthodes classiques d'interprétation en vue de l'évaluation des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères testés.

La nature fissurée et discontinue, la complexité des échanges hydrauliques sont à l'origine de phénomènes anormaux rendant difficile le choix d'une méthode d'interprétation. Aussi avons-nous utilisé pour chaque essai différents schémas afin de déterminer les convergences ou divergences entre les résultats. C'est ainsi que nous avons utilisé en plus des méthodes classiques (THEISS, JACOB, BOULTON, HANTUSH...etc.) la méthode récente spécifique au milieu fissuré de T. THIERY et al. (1984).

5.2. METHODE DE POMPAGE

Le pompage se fait par émulsion : "air-lift". Cette technique consiste à envoyer de l'air comprimé dans l'eau du forage par un tube d'air. Il se produit un mélange air-eau, de densité inférieure à celle de l'eau qui est refou- lée en surface par le tube d'eau.

Cette méthode présente quelques inconvénients :

- Les mesures de débit ne sont pas très précises (le débit à la sortie est un mélange d'air et d'eau). Nous le mesurons à l'aide d'un fût de 200 l.

- Le débit qui dépend de la hauteur d'eau au dessus de la sortie de l'air comprimé n'est pas constant au cours de l'essai. Nous avons noté des variations de 50 % entre le début et la fin du pompage, dans certains forages

- La mesure des rabattements est souvent difficile du fait de la surface agitée de l'eau dans le forage.

5.3. INTERPRETATION DES POMPAGES5.3.1. Site de Tombougou5.3.1.1. Hydrogéologie

L'aquifère est constitué par un horizon de grès schisteux fissurés au mur d'un sill de dolérite.

La coupe lithologique du forage (F1) est identique à celle du piézomètre (F2) situé à 5 m. Elle est la suivante :

- 0 - 16 m : recouvrement argilo-sableux
- 16 - 17 m : jaspes
- 17 - 51 m : schistes à grès schisteux
- 51 - 67 m : dolérites
- 67 - 79 m : grès schisteux très fissuré de 67 à 76 m.

Dans le forage F1 les venues d'eau se situent à 68 m et de 70 à 76 m de profondeur. Dans le F2 on ne note qu'une seule venue d'eau à 68 m.

La nappe est captive (niveau statique à 11,70 m de profondeur).

Les forages ont un diamètre, de 6 1/2" jusqu'à 31 m de profondeur, et sont munis d'un tubage plein, et de 4 1/2" jusqu'à la profondeur finale, le trou étant nu.

5.3.1.2. Pompage

Le pompage a duré 12 h au débit moyen de 11,60 m³/h. Le rabattement final était de 19,10 m pour le forage et 9,77 m pour le piézomètre.

Devant cet écart de rabattements entre les 2 ouvrages qui rappelons-le sont distants de 5 m, nous avons interverti forage et piézomètre. Ce nouvel essai a duré 4 h au débit de 14,40 m³/h avec persistance du phénomène précédent (14,29 m et 6,92 m de rabattements respectifs).

Le phénomène ne semble donc pas lié à la qualité des ouvrages (pertes de charge élevées dans le forage d'essai).

5.3.1.3. Interprétation

Les mesures des rabattements dans le forage et le piézomètre sont données en annexe.

Nous avons reporté les rabattements spécifiques en fonction du diagramme semi-logarithmique et les rabattements en fonction du temps en diagramme bilogarithmique (fig. 29 et 30).

On note des rabattements initiaux très élevés dans les forages pompés suivis d'un ralentissement: C'est un phénomène que l'on rencontre fréquemment au cours des pompages d'essai dans notre région d'étude. Il semble lié aux pertes de charge anormale et la stratification des venues d'eau.

L'allure des courbes et la coupe de forage suggèrent 2 hypothèses pour l'interprétation :

- Une nappe captive dans un aquifère multicouches avec transfert d'eau entre les différents niveaux perméables (schéma de Boulton) ;
- ou une nappe captive dans des fissures groupées horizontales (schéma de THIERY et al.).

Nous appliquerons donc ces deux méthodes ainsi que la méthode semi-logarithmique de Jacob.

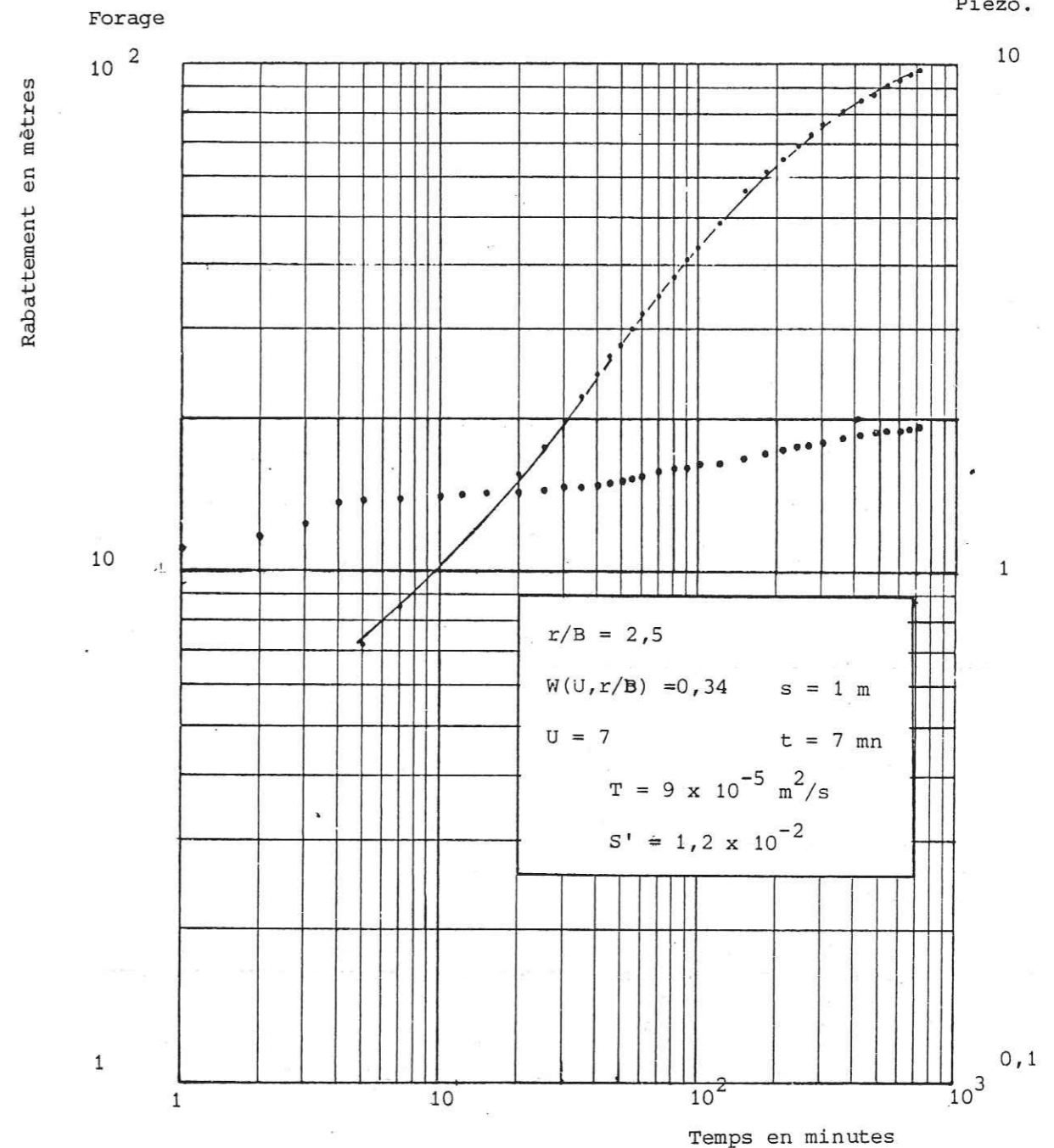


FIG. 29. Pompage d'essai -TOMBOUGOU (premier essai)

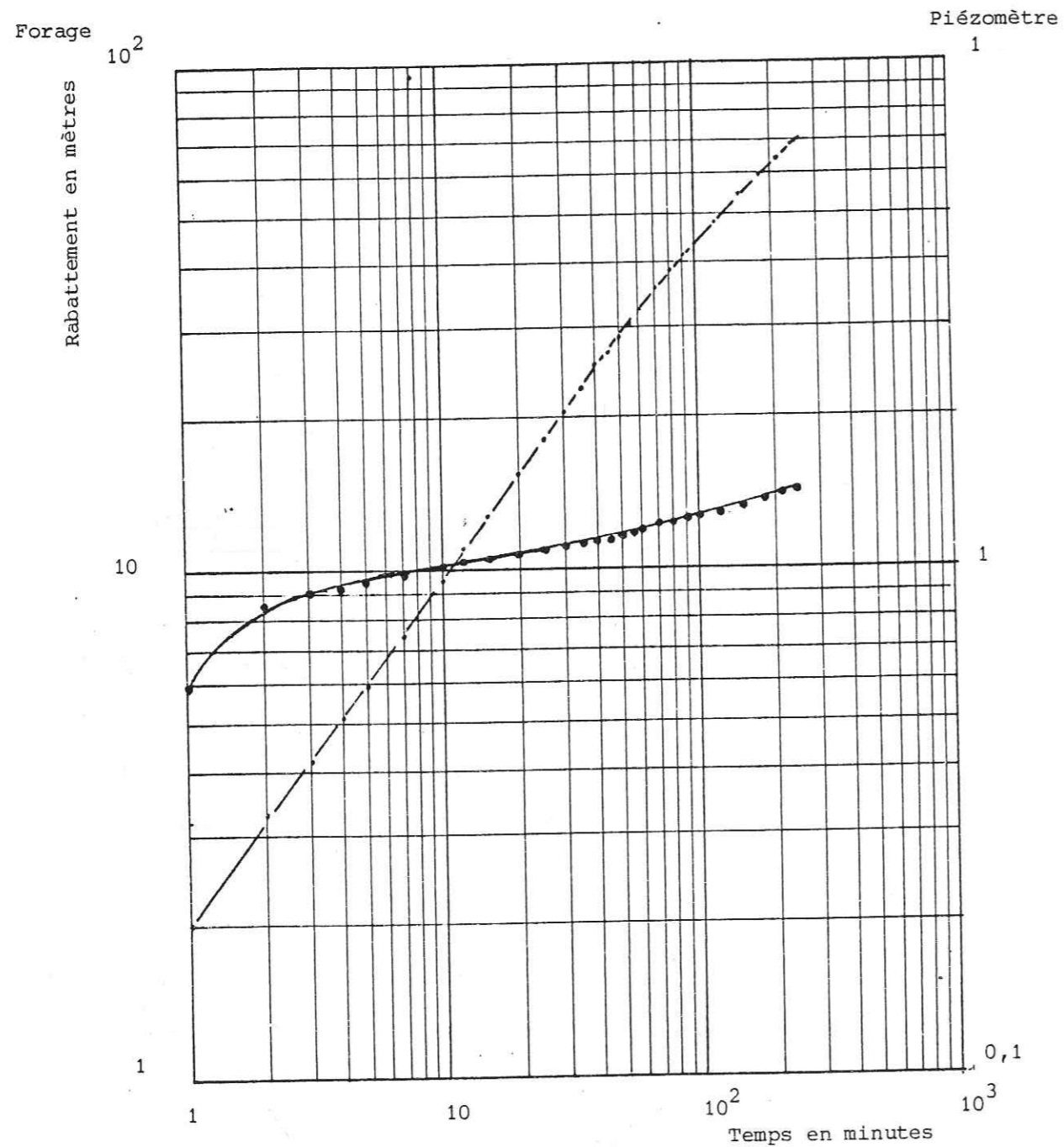


FIG. 30 - Pompage d'essai : TOMBOUGOU (deuxième essai)

Méthode de Boulton

Nous n'interpréterons que la courbe du piézomètre obtenue pour le premier essai.

La meilleure superposition se fait avec les courbes-types de la famille B. On a pour $r/B = 2,5$.

$$W(U, r/B) = 0,34 \quad s = 1 \text{ m}$$

$$U = 7 \quad t = 7 \text{ mn}$$

$$\text{d'où } T = \frac{0,08}{s} \quad W(U, r/B) = 0,325 \text{ m}^2/\text{h} = 9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S' = \frac{4Tt}{r^2U} = 1,2 \times 10^{-2} \text{ (avec } r = 5 \text{ m)}.$$

Méthode de Jacob

En retenant les valeurs précédentes, on pourra utiliser l'approximation de Jacob pour un temps de pompage $t = \frac{10 r^2 S}{4T}$

$$\text{soit } t = \frac{10 \times 25 \times 1,2 \times 10^{-2}}{4 \times 0,325} = 2,3 \text{ h} = 140 \text{ mn.}$$

Les droites tracées à partir de ce temps ont pour pentes :

-1er essai

$$\text{Forage : } i = 0,54 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h})$$

$$\text{d'où } T = \frac{0,183}{i} = \frac{0,183}{0,54} = 0,34 \text{ m}^2/\text{h} = 9,4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Piézomètre } i = 0,61 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h})$$

$$\text{d'où } T = \frac{0,183}{i} = 0,3 \text{ m}^2/\text{h} = 8,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$t_0 = 26 \text{ mn}$$

$$S = \frac{2,25 T t_0}{r^2} = 1,2 \times 10^{-2}$$

-2nd essai

Le tracé des droites est moins précis, on a par exemple au piézomètre $i = 0,51 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h})$ soit $T = 0,36 \text{ m}^2/\text{h}$.

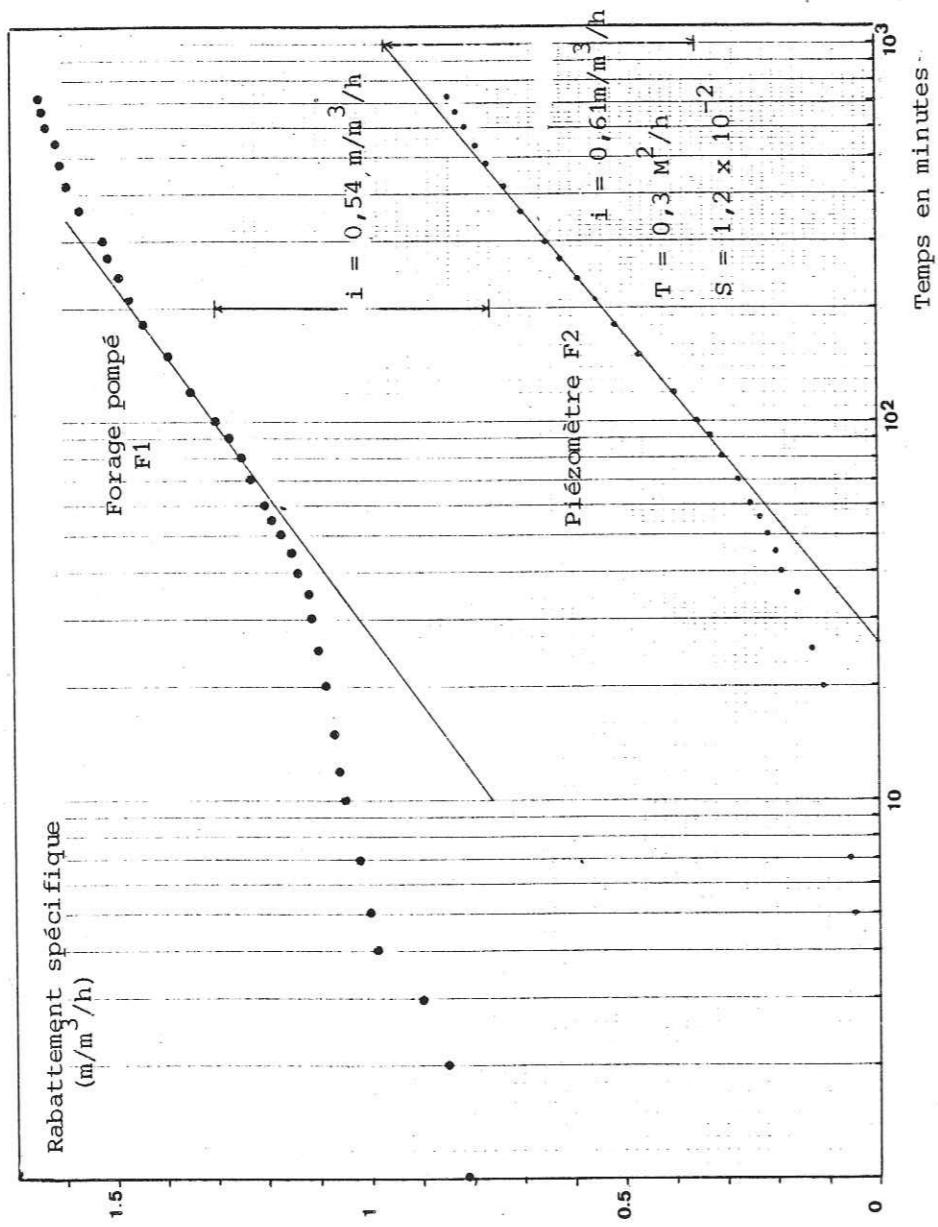


Fig. 31 - POMPAGE D'ESSAI : TOMBOUGOU (Premier essai) - Descente

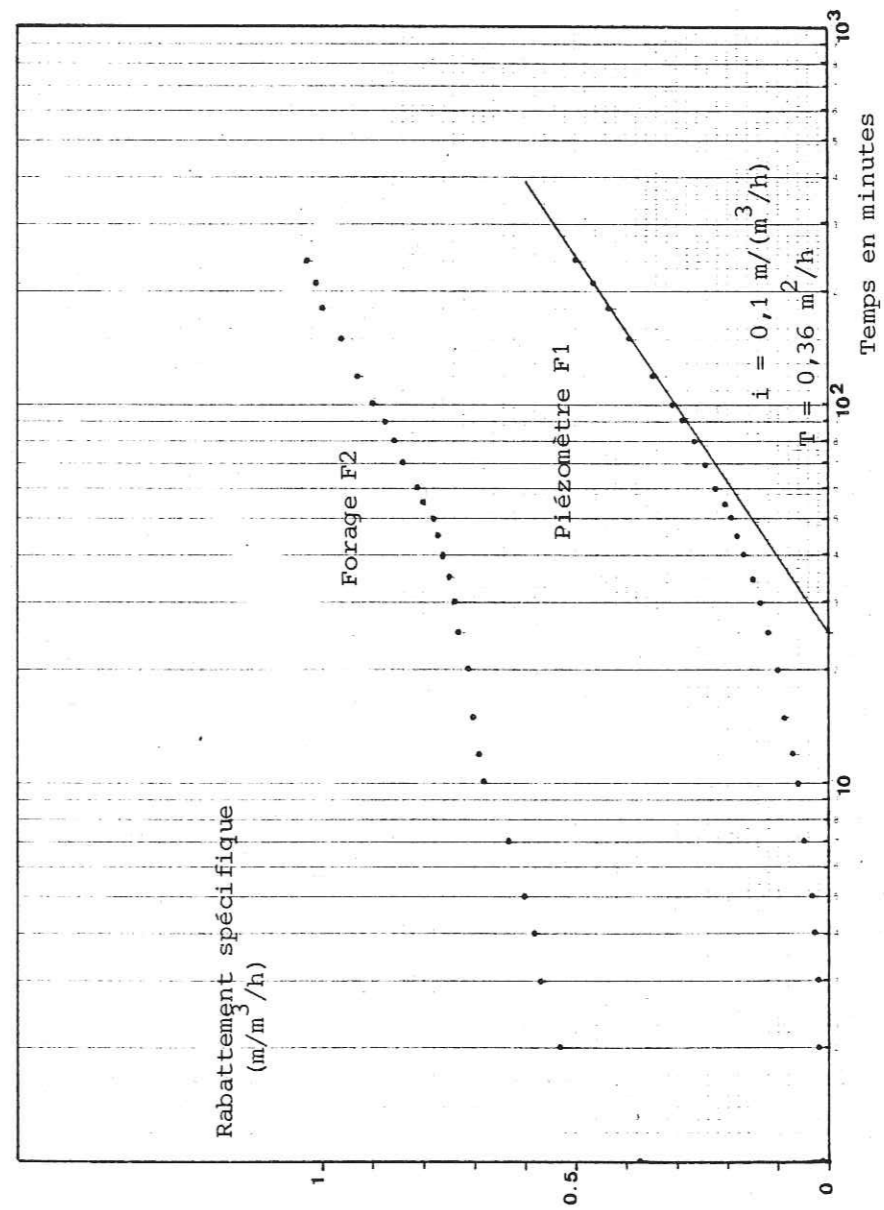


Fig. 32 - POMPAGE d'essai : TOMBOUGOU (Deuxième essai) - Descente

Remarques : Ces deux méthodes donnent des résultats assez proches. Cependant le coefficient d'emménagement semble élevée pour le type de nappe. L'explication doit être recherchée dans l'évolution singulière des rabattements. On note en effet que la courbe en diagramme (semi logarithmique est une droite durant la majeure partie du pompage (2ème essai). Cette évolution s'écarte de la solution de Theis-Jacob, d'où la non validité de ces méthodes.

Nous utiliserons la méthode de Thiery et al. (1984) qui tient compte de cette évolution rectiligne des rabattements.

Méthode de la "fissure horizontale circulaire"

Le principe de la méthode est donné en annexe 1 . Les conditions d'application sont les suivantes :

- Le forage traverse, en son centre, une fissure circulaire de rayon r_f situé à mi-hauteur de la courbe aquifère
- La fissure est de faible épaisseur par rapport à son rayon et à l'épaisseur de l'aquifère
- Le débit est capté par la fissure et non par le puits,
- La perméabilité équivalente de la fissure est infinie et la charge est égale en tout point de la fissure à celle existante dans le puits.

Si l'aquifère capté peut être assimilé à une fracture horizontale au mur du sill de dolérite toutes les autres conditions sont loin d'être remplies. Néanmoins l'allure des courbes dans les piézomètres est proche des courbes types pour le puits de pompage. Ce qui est normal puisque les piézomètres recoupent la fracture. Nous appliquerons donc la méthode d'interprétation au puits.

La superposition des courbes nous donne :

- 1er essai

$$e_d = \frac{e}{r_f} = 0,7$$

$$s_a = 0,3 \quad s = 0,96 \text{ m}$$

$$t_a = 0,2 \quad t = 12 \text{ mn} = 0,2 \text{ h}$$

$$d'où T = 0,08 Q \frac{s_a}{s} = 0,08 \times 11,95 \frac{0,3}{0,96} = 0,3 \text{ m}^2/\text{h} = 8,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$S_r^2 = 4T \frac{t}{t_a} = 4 \times 0,3 \frac{1,2}{0,2} = 1,2 \text{ m}^2$$

-2nd essai

$$e_d = 0,5$$

$$s_a = 0,7 \quad s = 2 \text{ m}$$

$$t_a = 0,2 \quad t = 9 \text{ mn} = 0,15 \text{ h}$$

$$d'où T = 0,08 Q \frac{s_a}{s} = 0,08 \times 14,4 \frac{0,7}{2} = 0,4 \text{ m}^2/\text{h} = 1,1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S_r^2 = 4T \frac{t}{t_a} = 4 \times 0,4 \frac{0,15}{0,2} = 1,2 \text{ m}^2.$$

Remarque. Les valeurs de la transmissivité sont très voisines de celles calculées par la méthode de Jacob.

En faisant l'hypothèse que l'épaisseur de l'aquifère est d'environ 10 m (données de forage) on aura pour le coefficient d'emménagement des valeurs comprises entre 3 et 6×10^{-3} .

4.3.1.4. Conclusion

Nous retiendrons pour l'aquifère une transmissivité moyenne de $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Il est difficile de donner un coefficient d'emménagement malgré la présence de piézomètres. Les conditions d'applications des différentes méthodes ne le permettent pas. A propos de la méthode de Theis-Jacob, Thiery et al remarquent que "l'approximation de Jacob ne peut être appliquée si la fracture a un rayon important ou si elle se situe dans un milieu peu perméable".

5.3.2. Site de Tioribougou

5.3.2.1. Géologie et hydrogéologie

L'aquifère est un système bicouche constitué par une nappe superficielle à surface libre et une nappe semi-captive profonde. La nappe superficielle correspond à la partie inférieure des formations de recouvrement argilo-sableuses et à la frange altérée du substratum gréseux. L'épaisseur est très variable (15 à 30 m).

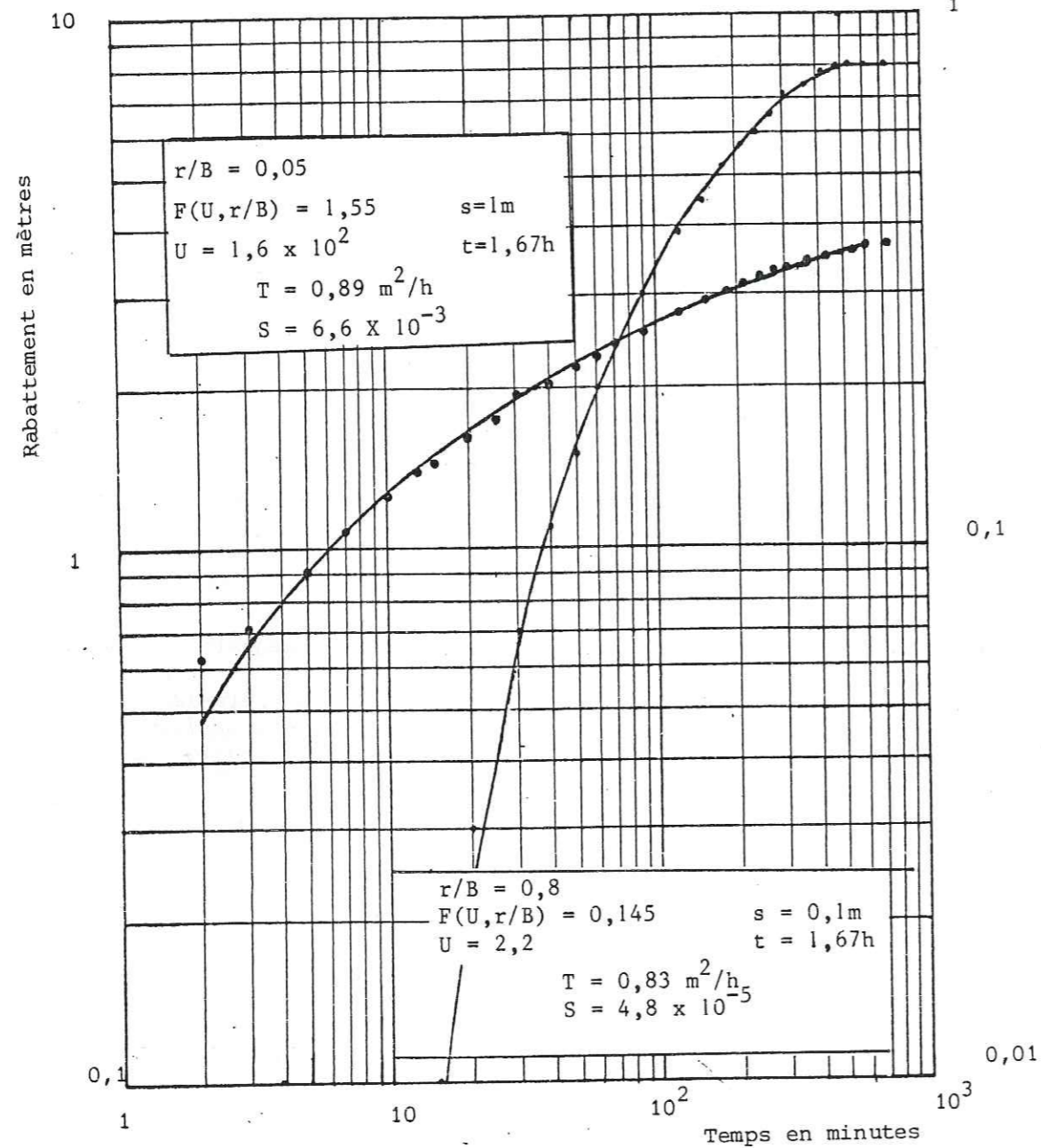
L'aquifère profond se situe dans les zones fissurées du substratum. Il est très hétérogène : les zones fracturées perméables étant séparées par des zones peu perméables. A cette discontinuité spatiale il faut ajouter une discontinuité verticale liée à la compétence à la fracturation des bancs gréseux quartzitiques et des niveaux plus schisteux. Notons enfin la présence de filons de dolérite.

Fig. 33 Pompage d'essai - Diagramme logarithmique

Piézo.F5bis

TIORIBOUGOU

Piézo.F3



5.3.2.2. Pompage d'essai

Il a duré 12 h au débit moyen de $7,15 \text{ m}^3/\text{h}$. Le dispositif d'observation comprend 2 piézomètres F5 bis et F3 situés respectivement à 2,4 et 230 m du forage.

La remontée a été aussi observée pendant 12 h.

Les différents résultats des mesures sont donnés en annexe.

5.3.2.3. Interprétation

.3.2.3.1. Descente

Les mesures des rabattements des piézomètres sont reportées en diagramme semi logarithmique et bilogarithmique (fig.33 et 34)

Les rabattements aux forages ne sont pas reportés, ils sont assez proches de ceux du piézomètre F5bis.

On observe un ralentissement des rabattements au forage et au piézomètre F5bis et une "stabilisation" au piézomètre F3 après environ 300 minutes de pompage.

Nous appliquerons les méthodes relatives aux "nappes captives en communication avec une nappe à niveau d'eau constant".

Méthode bilogarithmique de Walton

- Piézomètre F5bis à 2,40 m

La meilleure superposition est obtenue avec la courbe type de $\frac{r}{B} = 0,05$

$$F(U, r/B) = 1,55$$

$$s = 1 \text{ m}$$

$$U = 1,6 \times 10^2$$

$$t = 100 \text{ mn} = 1,67 \text{ h}$$

d'où

$$T = \frac{0,08 Q}{s} \times F(U, r/B) = \frac{0,08 \times 7,15}{1} \times 1,55 = 0,89 \text{ m}^2/\text{h} = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = \frac{4Tt}{r^2 U} = \frac{4 \times 0,89 \times 1,67}{(2,4)^2 \times 1,6 \times 10^2} = 6,6 \times 10^{-3}$$

$$B = \frac{r}{0,05} = 48$$

$$\frac{K'}{b'} = \frac{T}{B^2} = \frac{0,89}{(48)^2} = 4 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1} = 1 \times 10^{-7} \text{ sec}^{-1}$$

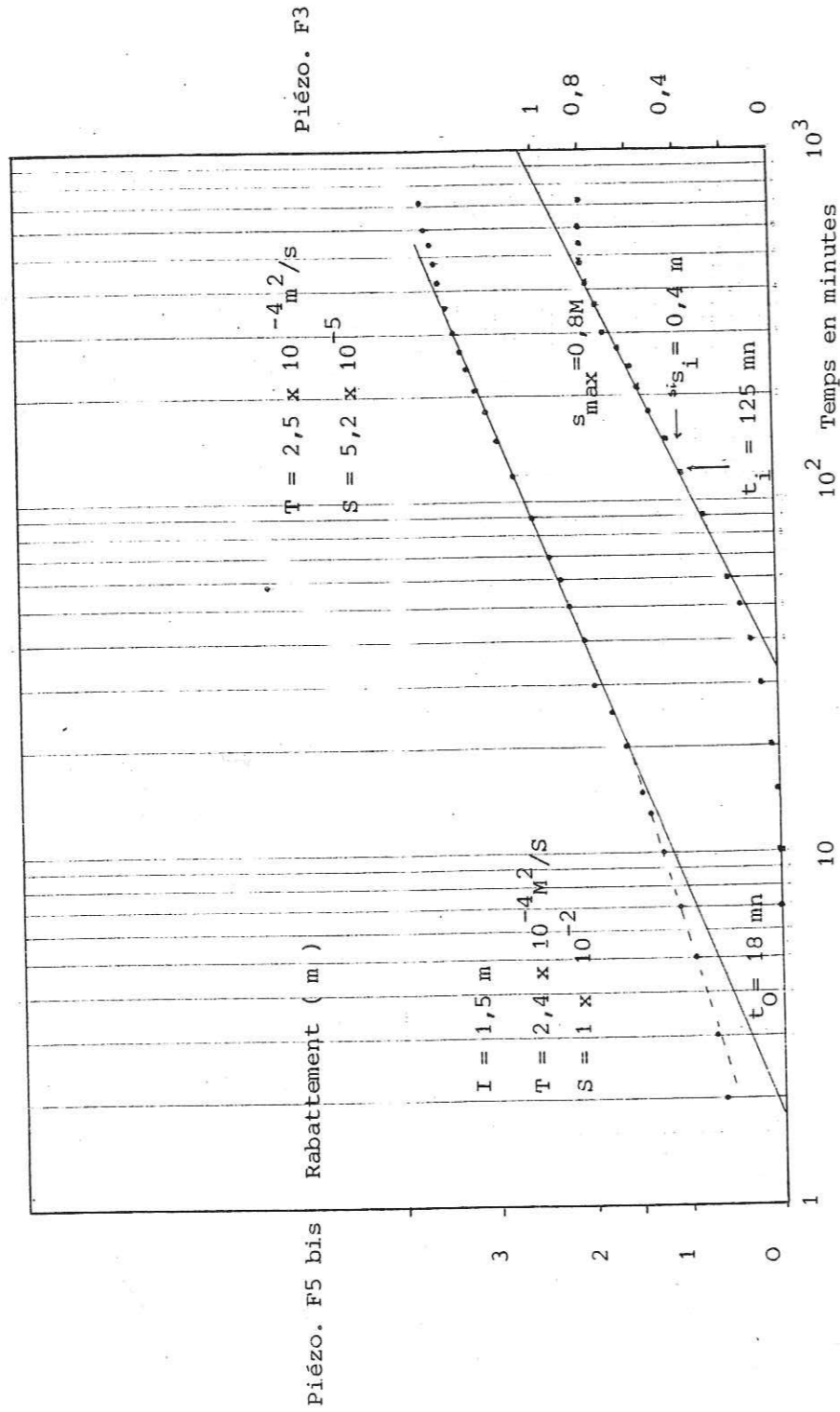


FIG. 34 - Pompage d'essai : TIORIBOUGOU - Descente.

- Piézomètre F₃ à 230 m

La superposition est faite sur la courbe de r/B = 0,8

$$F(U, r/B) = 0,145$$

$$U = 2,2$$

$$s = 0,1 \text{ m}$$

$$t = 100 \text{ mn} = 1,67 \text{ h.}$$

$$T = \frac{0,08 Q}{s} F(U, r/B) = \frac{0,08 \times 7,15}{0,1} \times 0,145 = 0,83 \text{ m}^2/\text{h} = 2,3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = \frac{4Tt}{r^2 U} = \frac{4 \times 0,83 \times 1,67}{2,2 \times (230)^2} = 4,8 \times 10^{-5}$$

$$B = \frac{r}{U} = \frac{230}{0,8} = 287,5$$

$$\frac{K'}{b'} = \frac{T}{(3)^2} = \frac{0,83}{(287,5)^2} = 1.10^{-5} \text{ h}^{-1} = 2,8 \cdot 10^{-9} \text{ sec}^{-1}$$

Méthodes semilogarithmiques

- Méthode de Hantush ou "du point d'inflexion"

Nous appliquons cette méthode au piézomètre F₃ où l'on observe une stabilisation des rabattements.

$$s_{\text{max}} = 0,8 \text{ m} \quad s_i = 1/2 s_{\text{max}} = 0,4 \text{ m}$$

$$m_i \text{ (pente de la courbe au point } s_i) = 0,70 \text{ m}$$

$$t_i \text{ (temps correspondant au point } s_i) = 125$$

$$e^{r/B K_0(r/B)} = \frac{2,3 a}{m_i} = \frac{2,3 \times 0,4}{0,70} = 1,3143$$

On tire de la table (annexe 2) r/B = 0,72

$$B = \frac{230}{0,72} = 319 \quad ; \quad e^{-r/B} = 0,487$$

$$T = \frac{0,183 Q}{m_i} e^{-r/B} = \frac{0,183 \times 7,15}{0,70} \times 0,487 = 0,91 \text{ m}^2/\text{h}$$

$$S = \frac{2 T t_i}{B r} = \frac{2 \times 0,91 \times 2,1}{319 \times 320} = 5,2 \cdot 10^{-5}$$

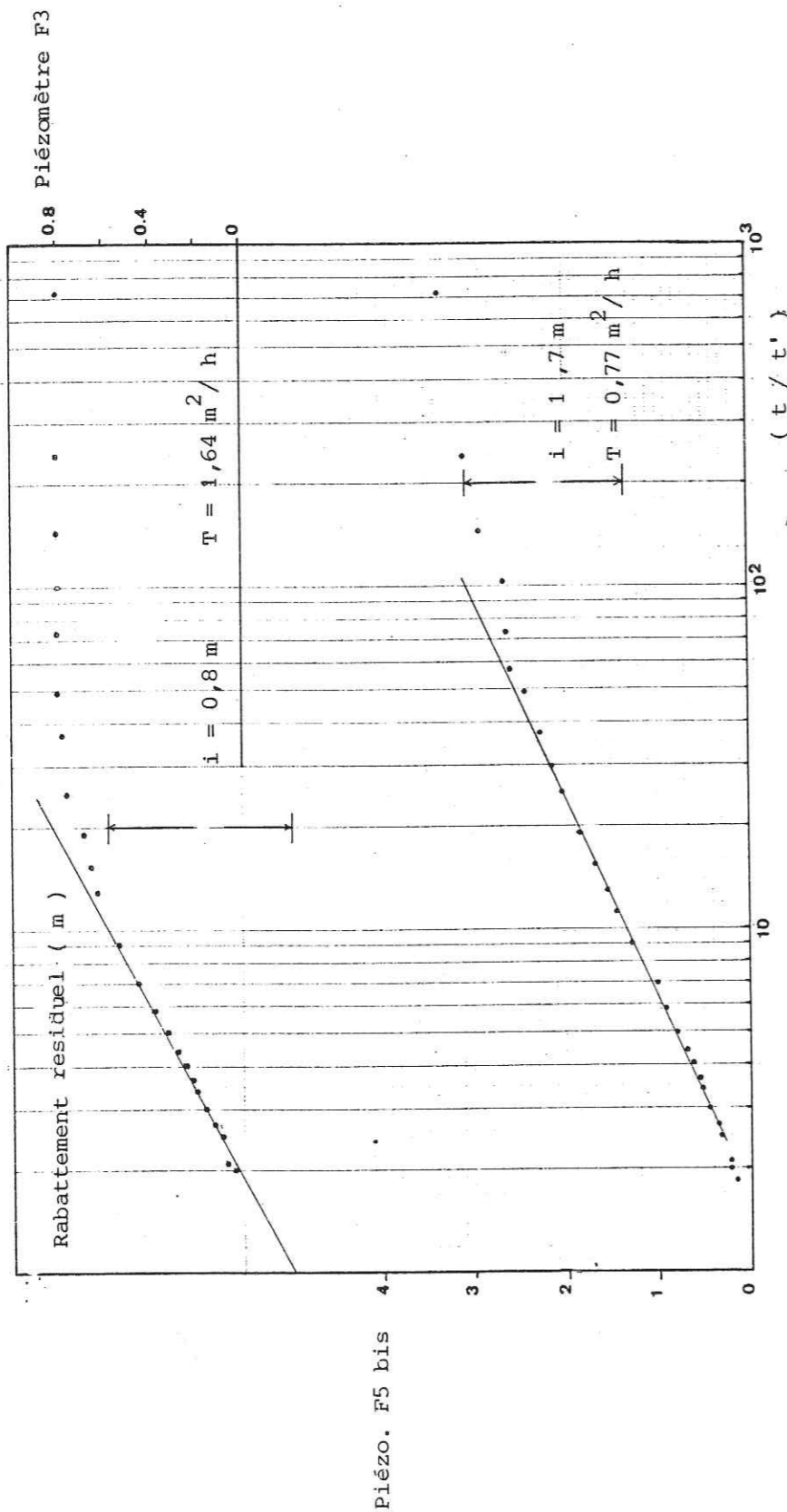


Fig. 35 - Pompage d'essai : TIORIBOUGOU - Remontée

$$\frac{K'}{b'} = \frac{T}{B^2} = \frac{0,91}{(319)^2} = 8,9 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1} \approx 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ sec}^{-1}$$

- Méthode de Jacob

Nous appliquons cette méthode au piézomètre F_{5bis}, les rabattements n'étant pas stabilisés pour permettre la détermination de s_{max}. La pente de la droite est

$$i = 150 \text{ m}$$

$$\text{d'où } T = \frac{0,183}{i} Q = \frac{0,183 \times 7,15}{1,50} = 0,87 \text{ m}^2/\text{h} = 2,410^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$t_0 = 18 \text{ mn} = 0,03 \text{ h}$$

$$S = \frac{2,25 T t_0}{r^2} = \frac{2,25 \times 0,87 \times 0,03}{(2,4)^2} = 1 \cdot 10^{-2}$$

5.3.2.3.2. Remontée

Les rabattements résiduels des piézomètres sont reportés en fonction de (t/t') sur diagramme semi-logarithmique (fig. 35) t étant le temps depuis le début du pompage et t' le temps depuis l'arrêt du pompage.

- Piézo. F_{5bis}

Nous avons i = 1,70 m

$$\text{d'où } T = \frac{0,183 \times Q}{i} = \frac{0,183 \times 7,15}{1,70} = 0,77 \text{ m}^2/\text{h} \approx 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

- Piézo. F₃

i = 0,8 m

$$\text{d'où } T = \frac{0,183 Q}{i} = \frac{0,183 \times 7,15}{0,8} = 1,64 \text{ m}^2/\text{h} \approx 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

Ces résultats amènent deux remarques :

- La première concerne la transmissivité. La valeur obtenue à la remontée au piézomètre F₃ est presque 2 fois supérieure à celle de la descente. L'application de la méthode semi-logarithmique de Jacob au F₃ à la descente donne la même valeur qu'à la remontée. C'est cette interprétation qui avait été retenue et elle impliquait l'existence d'un effet "d'écran étanche" entre + 15 minutes et 300 minutes au forage et au piézomètre F_{5bis}. Bien que probable nous ne retenons pas cette hypothèse. Nous pensons que la méthode de Jacob n'est pas adaptée à ce cas (condition d'étanchéité non remplie).

- La deuxième remarque concerne le coefficient d'emmagasinement. On note des différences notables entre les coefficients d'emmagasinement aux piézomètres F_{5bis} et F₃. La proximité du piézomètre F_{5 bis} pourrait être une explication de cette différence par influence des effets perturbateurs au niveau du forage (pertes de charge). Mais on peut aussi l'expliquer par un changement des conditions de la nappe ; à savoir semi-libre à proximité du forage et semi-captive au niveau du piézomètre F₃. Les observations piézométriques montrent en effet que le forage et F_{5bis} sont plus en amont par rapport au F₃ et plus proches de l'aire d'alimentation de la nappe.

5.3.2.4. Conclusions

Le pompage d'essai confirme les observations hydrogéologiques : nappe de substratum gréseux en communication avec la nappe superficielle.

On peut caractériser l'aquifère par les paramètres suivants :

$$T = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S \text{ varie de } 7 \times 10^{-3} \text{ à } 5 \times 10^{-5}$$

$$\frac{K'}{b'} \text{ (facteur de drainance) varie aussi de } 1 \times 10^{-7} \text{ à } 3 \times 10^{-9} \text{ sec}^{-1}.$$

Ces 2 derniers paramètres : coefficient d'emmagasinement et paramètre de drainance, rendent compte des variations des conditions de la nappe de semi-libre à semi-captive.

Signalons enfin que la "stabilisation" des rabattements n'est que temporaire puisqu'on observe une baisse de niveau dans la nappe superficielle au cours du pompage. Un pompage plus long aurait probablement donné une évolution du type Boulton.

5.3.3. Site de Nonkon

5.3.3.1. Conditions géologiques et hydrogéologiques

L'aquifère est formé par une zone fissurée au sein d'un massif de dolérite. Il est reconnu par un forage de 70 m de profondeur. La coupe lithologique est la suivante :

0 - 12 m : recouvrement argileux

12 - 21 m : dolérite plus ou moins altérée

21 - 70 m : dolérite saine \pm fissurée.

Deux venues d'eau ont été rencontrées à 44 et 60 m de profondeur. La nappe est captive (niveau statique à 23,60 m de profondeur). Le forage est muni d'un tubage plein de 5" de diamètre jusqu'à 40 m de profondeur, le reste du trou étant nu avec un diamètre de 4 1/2".

5.3.3.2. Pompage d'essai

Le pompage a duré 12 h au débit moyen de 7,5 m³/h (Le débit initial qui était de 10,3 m³/h s'est stabilisé à 7,5 m³/h au bout de 10 minutes de pompage).

La remontée de la nappe a été suivie pendant 12 h après l'arrêt du pompage.

Les résultats des mesures de rabattement sont donnés en annexe. Nous ne disposons pas de piézomètre.

5.3.3.3. Interprétation

5.3.3.3.1. Descente

On observe sur les courbes de descente en diagrammes semi-logarithmique et bilogarithmique (fig. 36) un ralentissement des rabattements entre + 15 minutes et + 300 minutes.

Ce phénomène est probablement dû à un transfert d'eau entre les différentes venues. Ce transfert ne se fait pas à débit constant, ce qui nous amène à un schéma de BOULTON.

Méthode de bilogarithmique de Boulton

Nous n'avons que la première partie de la courbe ; le temps de pompage étant manifestement insuffisant pour l'obtention d'une courbe complète.

La superposition est faite sur la courbe-type $r/B = 0,1$

$$F(U, r/B) = 4,45 \quad U = 7,5 \cdot 10^{-2}$$

$$s = 10 \text{ m} \quad t = 10 \text{ minutes}$$

$$\text{d'où } T = \frac{0,08 Q}{0} F(U, r/B)$$

$$T = \frac{0,08 \times 7,5 \times 4,45}{10} = 0,267 \text{ m}^2/\text{h} = 7,4 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}.$$

Fig. 36 Pompage d'essai (Descente)
NONKON

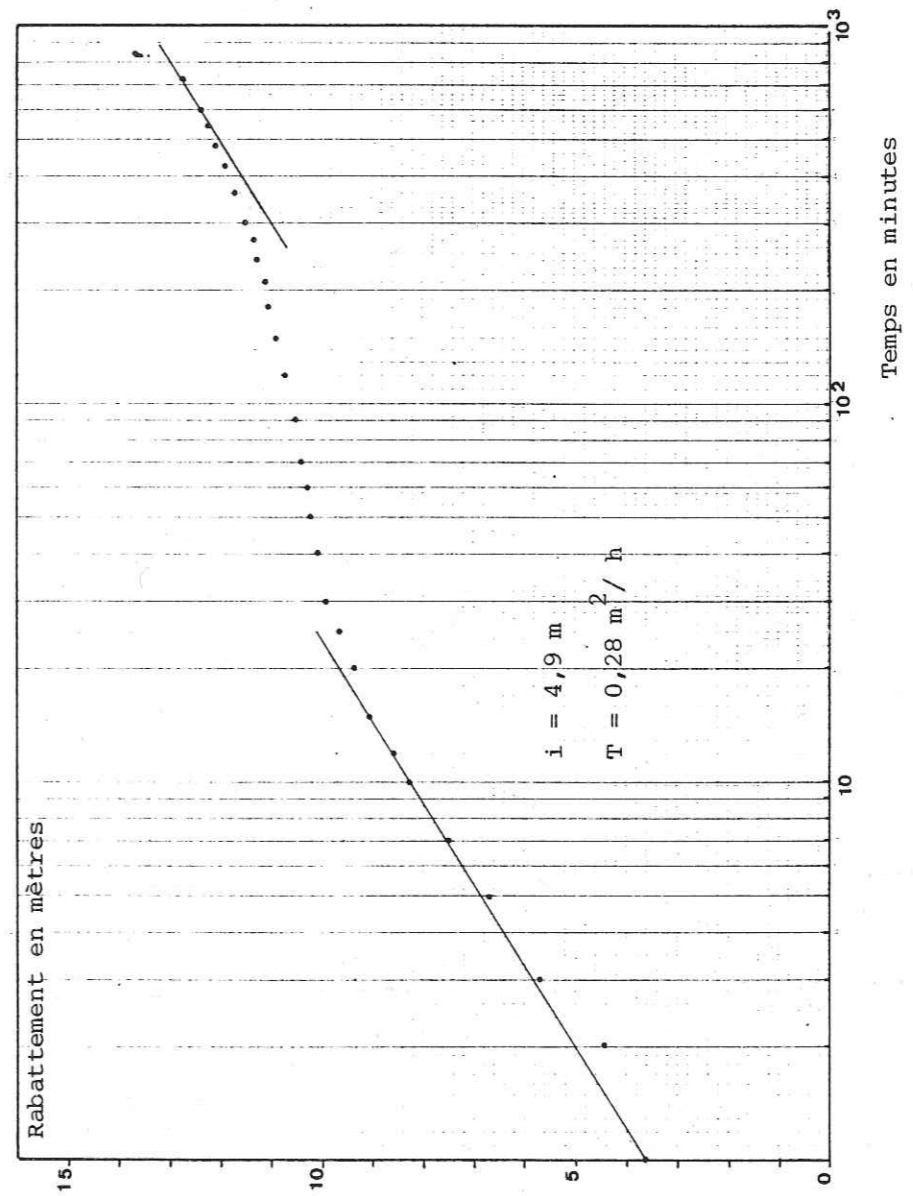
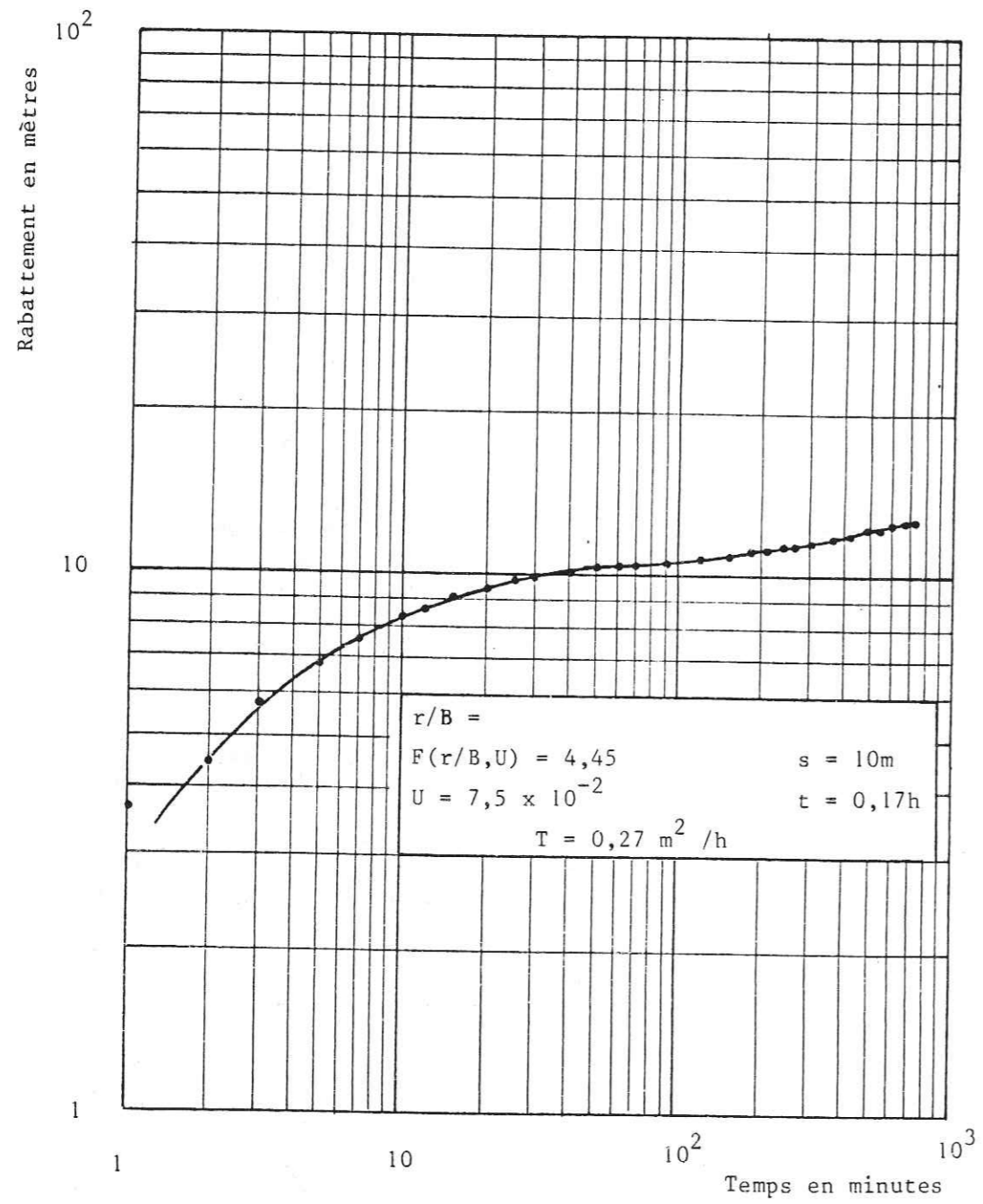


Fig. 37 - Pompage d'essai : NONKON - Descente

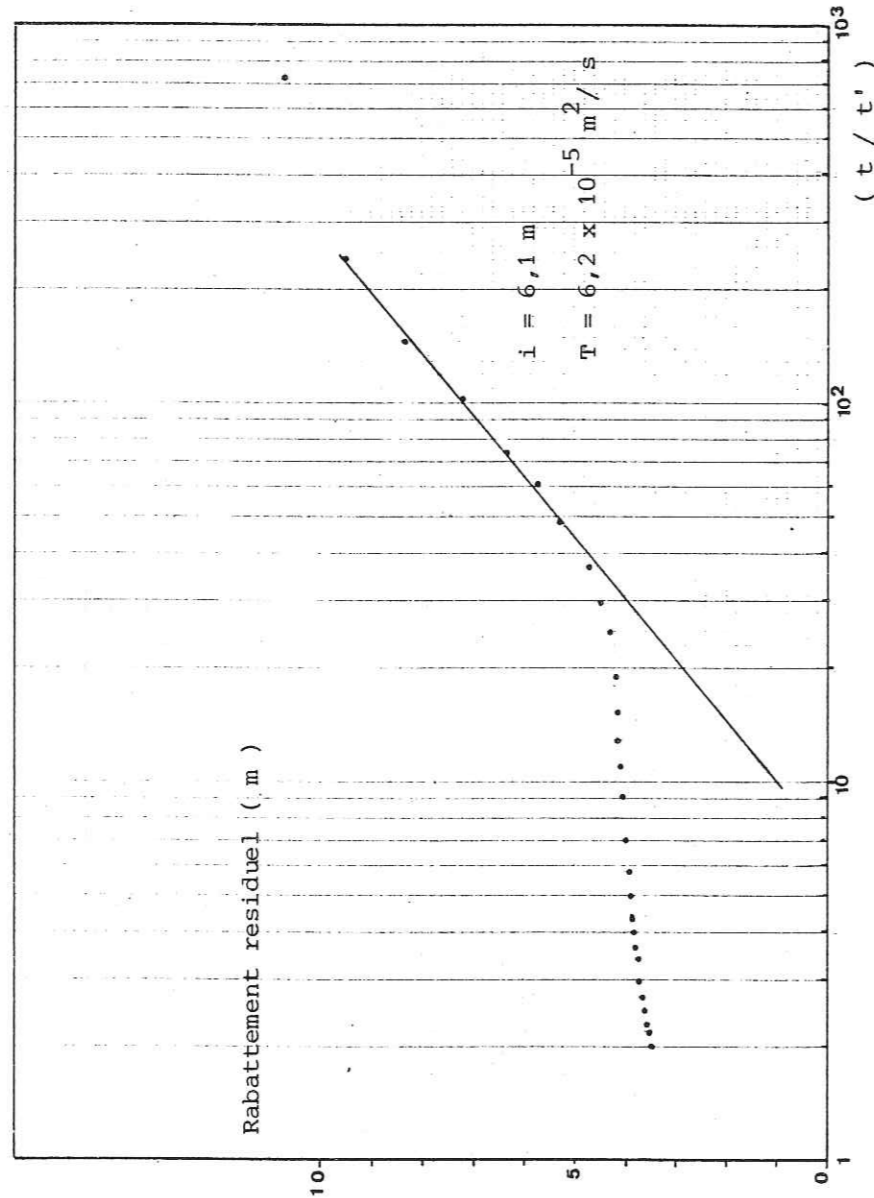


Fig. 38 - Pompage d'essai - NONKON - Remontée

Méthode semilogarithmique de Jacob

L'asymptote à la première partie de la courbe donne une perte

$$i = 4,90 \text{ m}$$

$$\text{d'où } T = \frac{0,183 Q}{i} = \frac{0,183 \times 7,15}{419} = 0,28 \text{ m}^2/\text{h} = 7,8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}.$$

5.3.3.3.2. Remontée (fig. 38)

Le palier est plus sensible sur la courbe de remontée. L'asymptote au début de la courbe a une pente légèrement plus élevée qu'à la descente.

$$i = 6,1 \text{ m}$$

$$\text{d'où } T = \frac{0,183 Q}{i} = \frac{0,183 \times 7,15}{6,1} = 0,22 \text{ m}^2/\text{h} = 6,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}.$$

5.3.3.3. Conclusions

Nous pouvons considérer la nappe comme captive dans un aquifère bi-couche constitué de 2 zones très fracturées ; séparées par une zone micro fissurée. De la première venue d'eau provient un débit "retardé" non constant.

La transmissivité moyenne du système est de $7 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Le manque de piézomètre et l'insuffisance du temps de pompage ne permettent pas le calcul des autres paramètres.

5.3.4. Site de Karadie5.3.4.1. Conditions géologiques et hydrogéologiques

Une couche de Jaspes très fissurée constitue l'aquifère. Elle repose sur des calcaires et est surmontée par des schistes argileux.

La coupe lithologique du forage est la suivante :

0 - 17 m - Recouvrement argilo-sableux

17 - 36 m - Argiles

36 - 41 m - Grès fins à moyens

41 - 54 m - Schistes argileux

54 - 59 m - Jaspes fracturés

59 - 61 m - Calcaires.

Les venues d'eau sont situées à 35 m entre 54 et 59 m de profondeur. La nappe est captive (niveau statique à 18,20 m de profondeur).

Le forage a été exécuté en diamètre 8 1/2". Il est muni d'un tubage plein de 6" jusqu'à 40 m de profondeur et de tubes crépinés ensuite. Signalons un éboulement à la base du forage au cours du tubage. La profondeur finale n'est plus de 56 m. L'espace annulaire compris entre le tubage et le trou est pourvu d'un massif de graviers filtrants.

Le piézomètre situé à 20,60 m a été arrêté à 55 m de profondeur dans les jaspes.

5.3.4.2. Pompage d'essai

Le pompage a duré 24 heures à débit moyen de 18,30 m³/h. La remontée a été suivie pendant 24 heures.

Les mesures de rabattements au piézomètre sont incomplètes du fait d'un mauvais fonctionnement du limnigraphe surtout au début du pompage.

Les résultats des mesures au forage et au piézomètre sont donnés en annexe.

Un essai par paliers de débits a également été exécuté sur le forage d'essai.

5.3.4.3. Interpretation

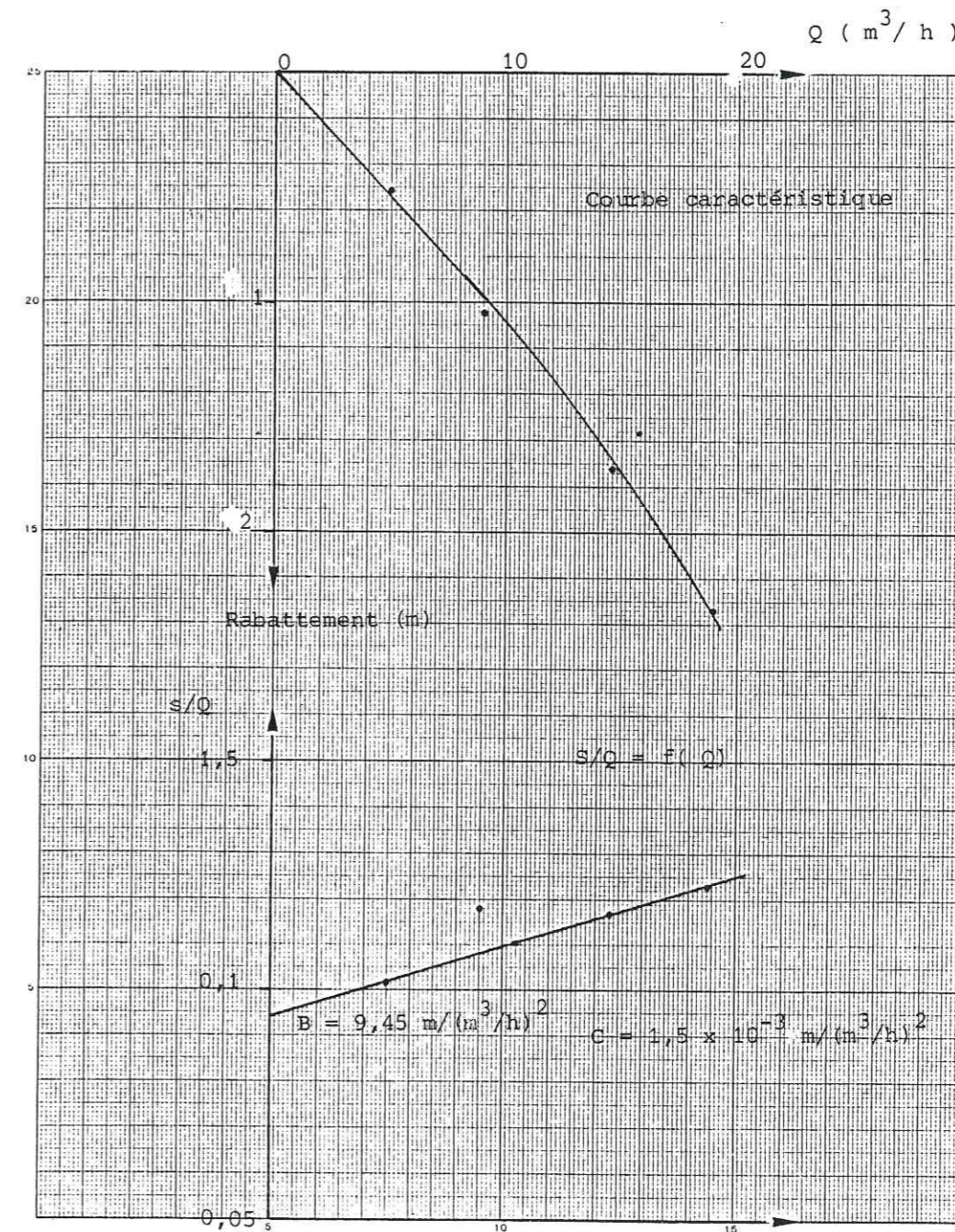
5.3.4.3.1. Essai par paliers de débit

Cet essai a consisté en un pompage à débits décroissants d'une durée d'1 h chacun après des arrêts intermédiaires de durée égale. Quatre paliers ont été exécutés. Les résultats figurent dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4 - Karadié : essai par paliers de débit.

N° Palier	Q (m ³ /h)	s (m)	
		Rabattement non stabilisé	s/Q (m/m ³ /h)
1	19	2,34	0,123
2	14,7	1,72	0,117
3	9	1,06	0,118
4	5	0,51	0,102

Fig. 39 - Karadié - Essai par paliers de débit



La courbe caractéristique $s = f(Q)$ (fig. 39) montre que les mesures d'un des paliers sont erronées. Il s'agit du palier n° 2 qui s'écarte de la droite $s/Q = f(Q)$. Les rabattements observés au forage peuvent donc être approchés par une équation du type $s = BQ + CQ^2$.

Le graphique donne pour les différents paramètres

$$B = 9,45 \times 10^{-2} \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h}) \text{ d'où } T = \frac{1,22}{B} = 12,9 \text{ m}^2/\text{h} = 3,610^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$C = 1,50 \times 10^{-3} \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h})^2.$$

$$\text{Nous aurons donc } s = 9,45 \times 10^{-2} Q - 1,5 \times 10^{-3} Q^2$$

Les pertes de charge non linéaires pour le débit de pompage de $18,30 \text{ m}^3/\text{h}$ seraient d'environ $0,50 \text{ m}$.

5.3.4.3.2. Descente

Les rabattements au piézomètre et au forage sont reportés sur diagramme semi-logarithmique et logarithmique (fig. 40 et 41).

Ces courbes sont assez influencées par les pertes de charge anormales. On note cependant un effet de drainance sensible surtout au forage où les mesures sont plus complètes. Les rabattements semblent se stabiliser au piézomètre après 18 heures de pompage.

Pour l'interprétation nous considérons l'aquifère des jaspes en communication à travers les épontes avec la nappe des grès sus-jacents.

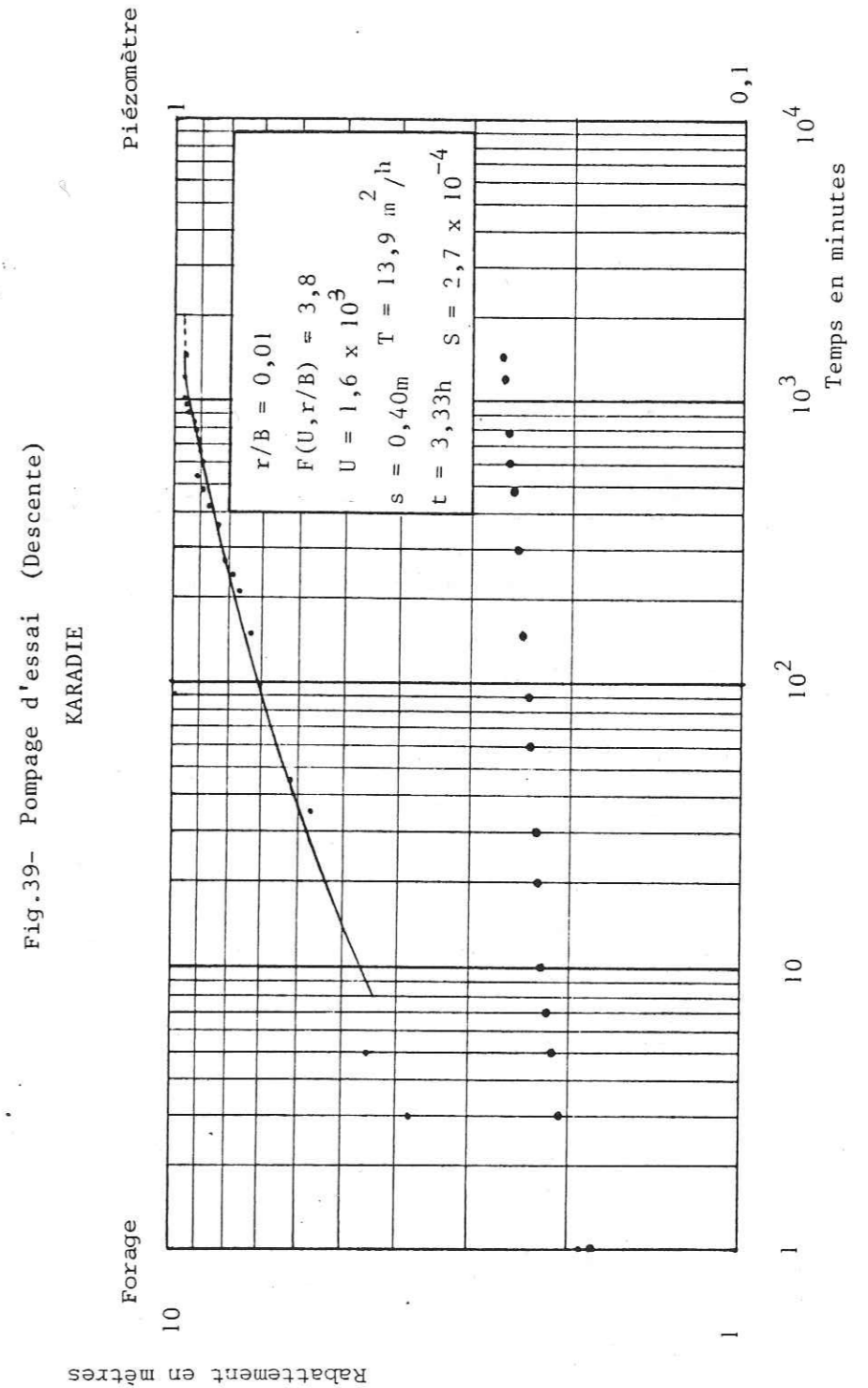
Méthode bilogarithmique de Walton

La courbe du forage n'est pas interprétable.

Au forage la superposition se fait sur la courbe type $r/B = 0,01$.

$$\begin{aligned} F(U, r/B) &= 3,8 & U &= 1,6 \times 10^3 \\ s &= 0,4 \text{ m} & t &= 200 \text{ mn} = 3,33 \text{ h} \\ \text{d'où } T &= \frac{0,08 Q}{s} F(U, r/B) = \frac{0,08 \times 18,3}{0,4} \times 3,8 = 13,9 \text{ m}^2/\text{h} \\ & & &= 3,8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

$$S = \frac{4Tt}{r^2 U} = \frac{4 \times 13,9 \times 3,33}{(20,6)^2 \times 1,6 \times 10^3} = 2,7 \times 10^{-4}$$



Méthodes semilogarithmiques

Il est difficile de tracer une droite unique au piézomètre. Nous appliquerons la méthode du point d'inflexion de Hantush.

$$\text{Nous avons } s_{\max} = 0,96 \text{ m} \quad s_i = \frac{1}{2} s_{\max} = 0,48 \text{ m}$$

$$m_i = 0,26 \text{ m} \quad t_i = 14,5 \text{ mn} = 0,24 \text{ h}$$

$$e^{r/B} K_0(r/B) = \frac{2,3 s_i}{m_i} = \frac{2,3 \times 0,48}{0,26} = 4,246$$

$$\text{D'où } r/B = 0,017 ; e^{-r/B} = 0,983$$

$$T = \frac{0,183 Q}{m_i} e^{-r/B} = \frac{0,183 \times 18,3}{0,26} \times 0,983 = 12,66 \text{ m}^2/\text{h} = 3,510^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = \frac{2Tt_i}{Br} = \frac{2 \times 12,66 \times 0,24}{1211 \times 20,6} = 2,4 \times 10^{-4}$$

Avec la méthode de Jacob et pour la même pente "i" nous avons

$$T = \frac{0,183 Q}{i} = 12,55 \text{ m}^2/\text{h} = 3,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{avec } t_0 = 0,24 \text{ mn} = 4 \times 10^{-3} \text{ h}$$

$$S = \frac{2,25 T t_0}{r^2} = \frac{2,25 \times 12,88 \times 4 \times 10^{-3}}{(20,6)^2} = 2,7 \times 10^{-4}$$

Au forage la pente de la droite est

$$i = 0,24 \text{ m}$$

$$\text{d'où } T = \frac{0,183 Q}{i} = \frac{0,183 \times 16,3}{0,24} = 13,95 \text{ m}^2/\text{h} = 3,910^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

5.3.4.3.3. Remontée

Après 24 heures de remontée les rabattements résiduels étaient de 0,07 et 0,06 m au forage et au piézomètre.

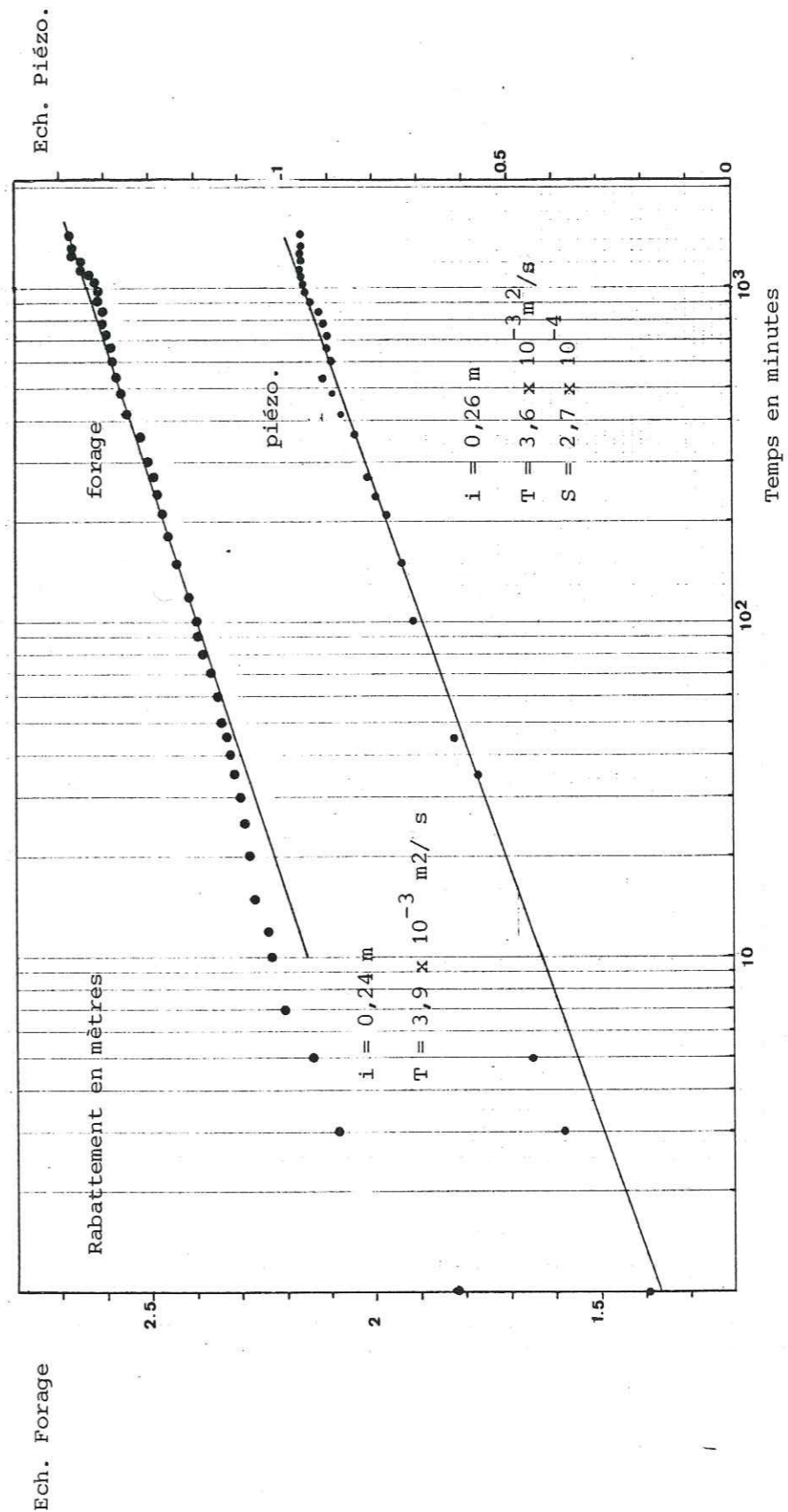


Fig. 40 - Pmpage d'essai : KARADIE - Descente

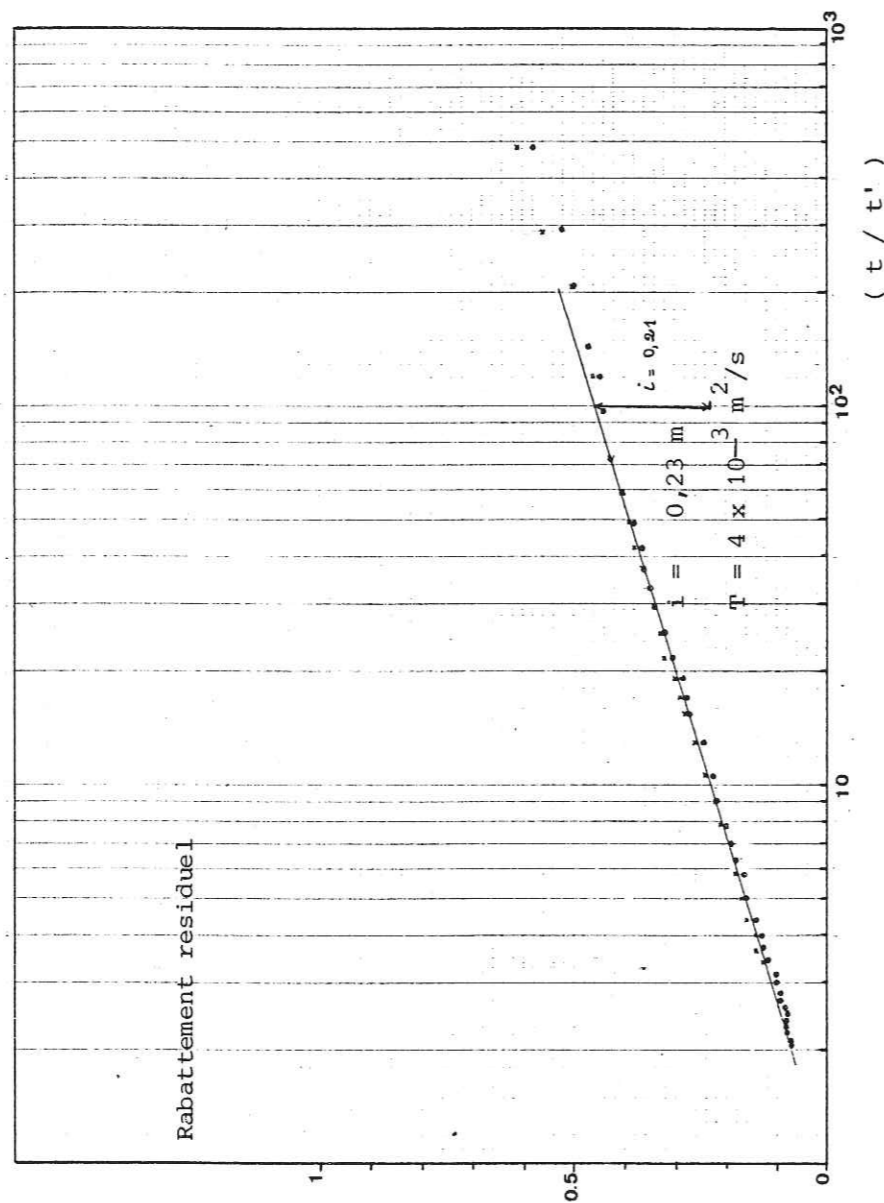


Fig. 41 - Pompage d'essai ; KARADIE - Remontée .

Le report des rabattements résiduels en fonction de t/t' sur diagramme semi-logarithmique (fig. 42) donne une droite commune pour les 2 ouvrages de pente

$$i = 0,23 \text{ m}$$

$$\text{d'où } T = \frac{0,183 Q}{i} = \frac{0,183 \times 18,3}{0,23} = 14,56 \text{ m}^2/\text{h} = 410^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

5.3.4.4. Conclusions

Les valeurs calculées par les différentes méthodes sont assez proches. On peut caractériser l'aquifère par les différents paramètres suivants :

$$T = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = 3 \times 10^{-4}$$

5.3.5. Site de Nossombou

5.3.5.1. Géologie et hydrogéologie

L'aquifère principal est constitué par des calcaires fissurés reposant sur des grès schisteux. Ils sont surmontés par des alluvions argilo-sableuses siège d'une nappe à surface libre.

La coupe lithologique du forage est la suivante

0 - 22 m : alluvions argilo-sableuses

22 - 48 m : calcaires † fissurés

48 - 48,5 m : grès schisteux.

Les venues d'eau principales sont à 22, 34 et 45 m de profondeur. La nappe est captive (niveau statique à 8 m de profondeur).

Le forage est muni d'un tubage de 6" dont les 18 m de crépines.

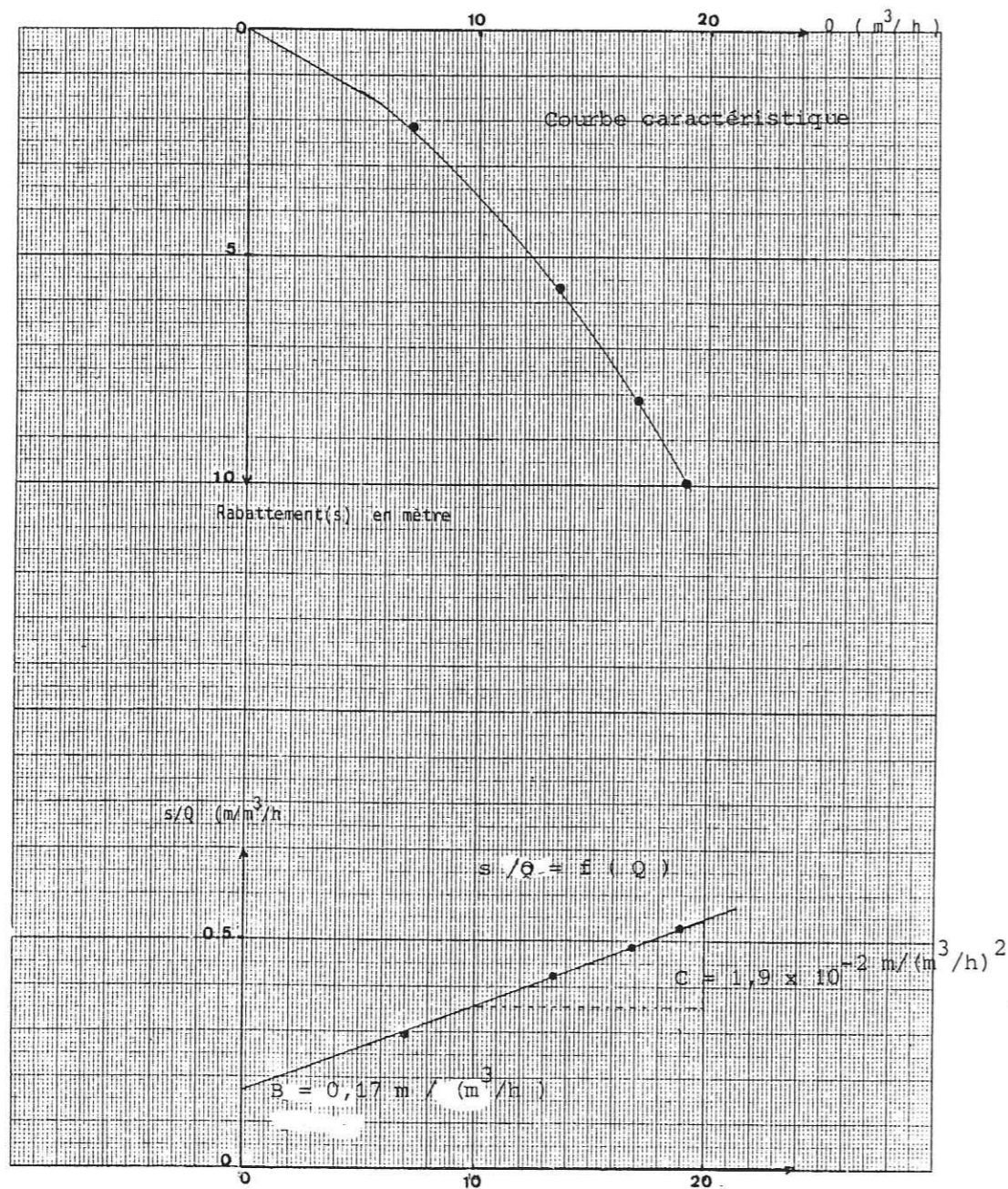
Un forage d'observation à 150 m est arrêté à 29 m de profondeur dans les calcaires.

5.3.5.2. Pompage d'essai

Le pompage a duré 20 h à un débit moyen de $18,5 \text{ m}^3/\text{h}$. La remontée n'a été suivie que pendant 4 heures au forage.

Un essai par paliers de débit a été exécuté sur le forage.

Fig. 43 - Nossombougou : Essai par paliers de débit

5.3.5.3. Interprétation5.3.5.3.1. Essai par paliers

Il a consisté en 4 paliers de débit d'une heure chacun, après des arrêts intermédiaires.

Les résultats des mesures figurent dans le tableau ci-dessous.

N° Palier	Q(m ³ /h)	S(m) rabattement non stabilisé	S/Q(m/m ³ /h)
1	7,0	2,09	0,298
2	3,3	5,66	0,425
3	16,7	8,11	0,485
4	18,9	9,92	0,525

Tableau 5 - Nossombougou : Essai par paliers de débit

Les différentes courbes caractéristiques sont sur la figure (43). Les différents paramètres sont

$$B = 0,17 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h}) \text{ d'où } T = \frac{1,22}{B} = \frac{1,22}{0,17} = 7,2 \text{ m}^2/\text{h} = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$C = 1,9 \times 10^{-2} \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h})^2$$

On note que les pertes de charge quadratique CQ^2 sont assez importantes pour notre débit de pompage soit environ 6,4 m. Elles constituent plus de 60 % du rabattement final observé.

5.3.5.3.2. Descente

Les rabattements sont reportés en fonction du temps sur diagrammes semi-logarithmiques et bilogarithmiques (fig.44 et 45)

L'influence des pertes de charge anormales est très sensible sur les courbes du forage.

L'évolution des rabattements est plus régulière dans le piézomètre aucun phénomène anormal n'étant observé tout le long du pompage nous interprétons cet essai par la méthode de Theis-Jacob.

Fig. 43- Pompage d'essai - Diagramme logarithmique
NOSSOMBOUGOU

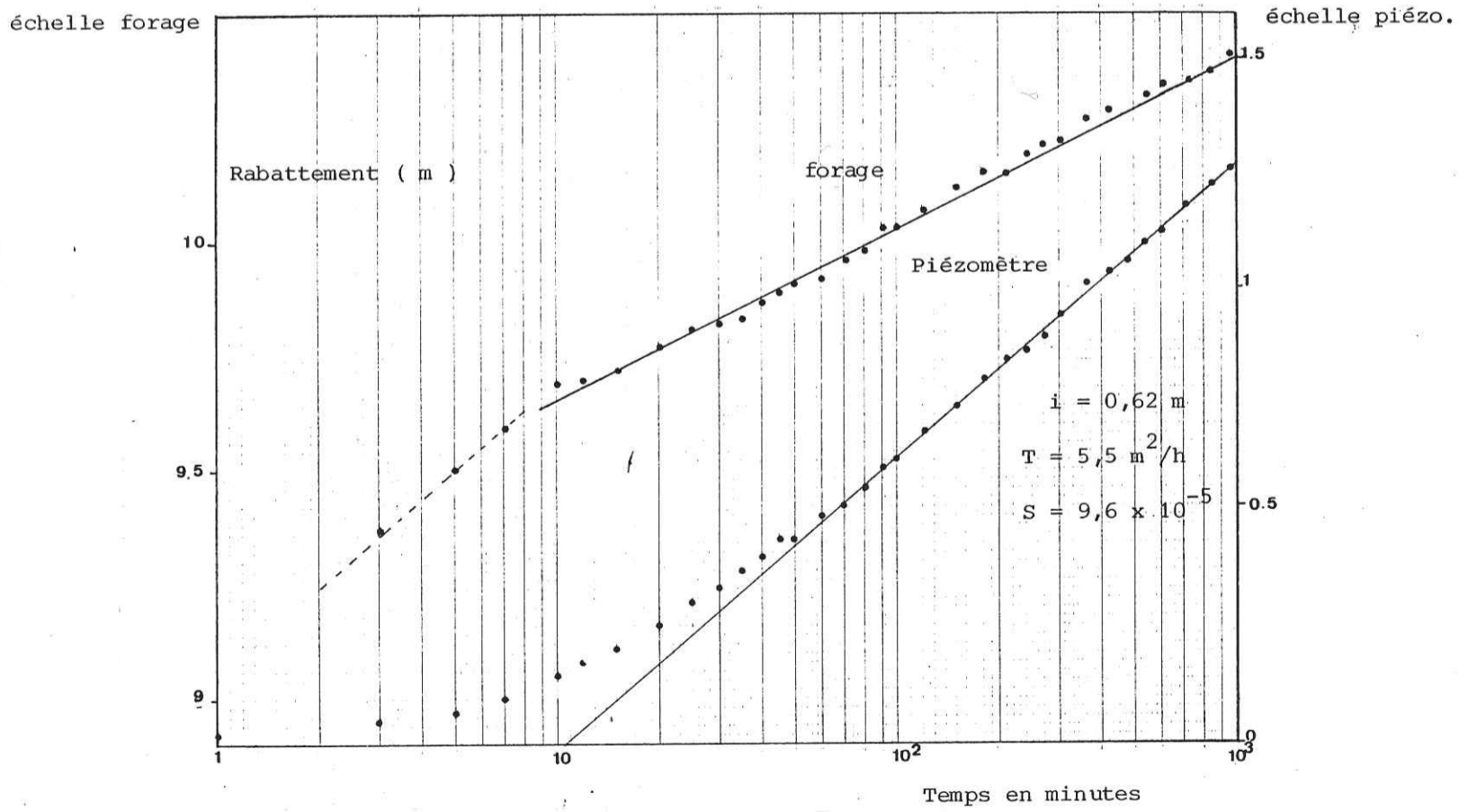
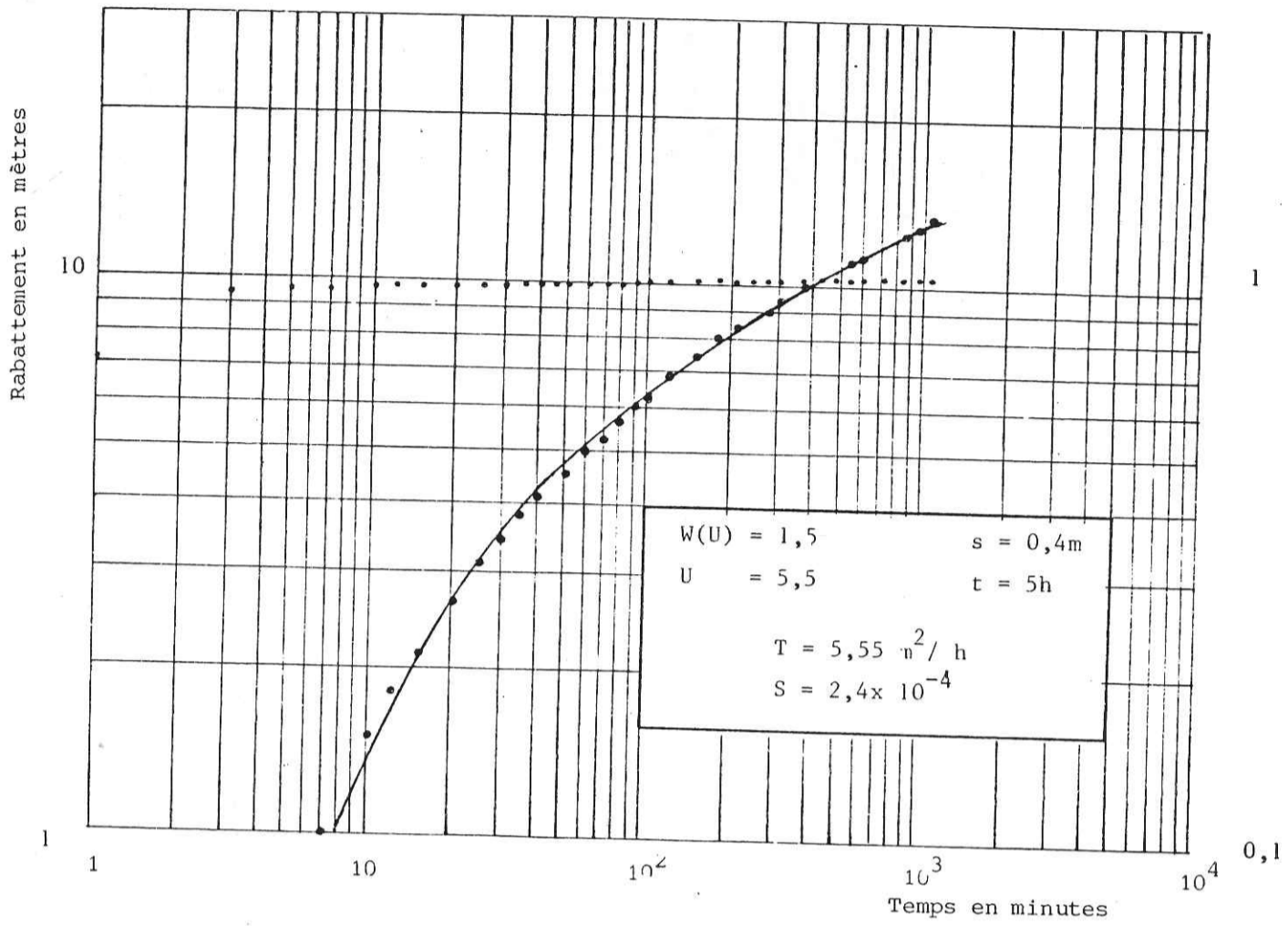


Fig. 44 - Pompage d'essai : NOSSOMBOUGOU - Descente

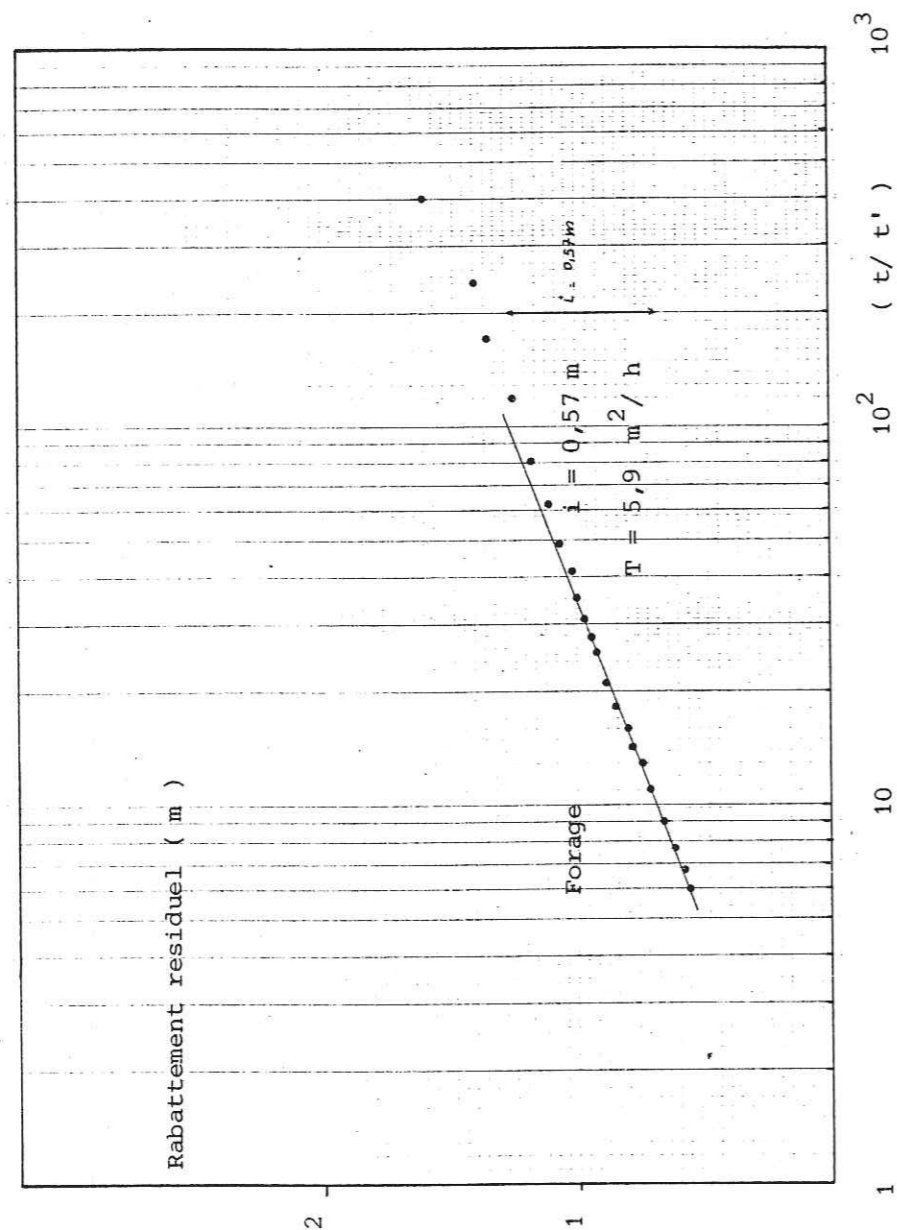


Fig. 45 - Pompage d'essai : NOSSOMBOUGOU - Remontée

Méthode bilogarithmique de Theis

La superposition de la courbe du piézomètre sur la courbe type de Theis nous donne

$$W(U) = 1,5 \quad s = 0,4 \text{ m}$$

$$U = 5,5 \quad t = 300 \text{ mn} = 5 \text{ h}$$

$$\text{d'où } T = \frac{0,08 Q}{s} \quad W(U) = \frac{0,08 \times 18,5}{0,4} 1,5 = 5,55 \text{ m}^2/\text{h} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$s = \frac{4 T t}{r^2 U} = \frac{4 \times 5,55 \times 5}{(150)^2 \times 55} = 9 \times 10^{-5}$$

Méthode semi-logarithmique de Jacob

La pente de la droite est :

$$i = 0,62 \text{ m}$$

$$\text{d'où } T = \frac{0,183 Q}{i} = 5,5 \text{ m}^2/\text{h} = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$s = \frac{2,25 T t_0}{r^2} \quad \text{avec } t_0 = 105 \text{ mn} = 0,175 \text{ h.}$$

$$s = \frac{2,25 \times 5,5 \times 1,75}{(150)^2} = 9,6 \times 10^{-5}$$

5.3.5.3.3. Remontée

Les rabattements résiduels du forage reportés en fonction de (t/t') en diagramme semi logarithmique (fig.46) s'alignent selon une droite de pente

$$i = 0,57 \text{ m}$$

$$\text{d'où } T = \frac{0,183 Q}{i} = \frac{0,183 \times 18,5}{0,57} = 5,9 \text{ m}^2/\text{h} = 1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s.}$$

5.3.5.4. Conclusions

L'aquifère s'est comporté au cours du pompage, comme un modèle de Theis (nappe captage homogène, d'extension latérale infinie, épontes imperméables).

Cependant des observations postérieures à l'essai de pompage ont montré que les pompages au forage influençaient la nappe superficielle. Il est donc probable que si le pompage avait été plus long on aurait observé des phénomènes de drainance.

L'aquifère des calcaires peut être caractérisé par les paramètres suivants :

$$T = 1,55 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = 1.10^{-4}$$

5.4. CONCLUSIONS

Les sites que nous venons d'étudier constituent les principaux types d'aquifères dans notre région d'étude.

Au cours des pompages d'essai l'évolution des rabattements, dans les forages pompés et les piézomètres, est généralement conforme à celle prévue en régime transitoire. Ce qui permet, pour l'interprétation l'utilisation de la solution de Theis et ses dérivés (Jacob, Hantush, Boulton, Walton, etc.).

Cependant le caractère fissural et discontinu des aquifères, la stratification des zones perméables provoquent généralement des évolutions de rabattements qui s'écartent des solutions proposées.

Parmi ces phénomènes anormaux, recensés en 1982 par le PNUD dans toute la zone de l'Infracambrien, citons (fig. 47) :

- des rabattements initiaux élevés durant les premières minutes du pompage. Ils sont dus aux pertes de charge singulières qui sont souvent importantes dans certains forages (Nossombougou) et aussi aux différences de charge hydraulique entre les différents horizons perméables,

- des phénomènes d'écran imperméable simple ou multiple se manifestant par des accroissements rapides et successifs des rabattements. Ces phénomènes peuvent être temporaires et correspondent alors à une rupture de perméabilité entre une zone macrofissurée et une zone microfissurée,

- des phénomènes de drainance par ralentissement des rabattements et dans certains cas une "pseudo stabilisation". Ils correspondent à des transferts d'eau entre la nappe superficielle et la nappe du substratum ou entre différents horizons aquifères du substratum.

Signalons enfin que l'on rencontre parfois un type mixte avec limite étanche et drainance.

Tout ceci montre l'hétérogénéité des aquifères et la complexité des échanges hydrauliques.

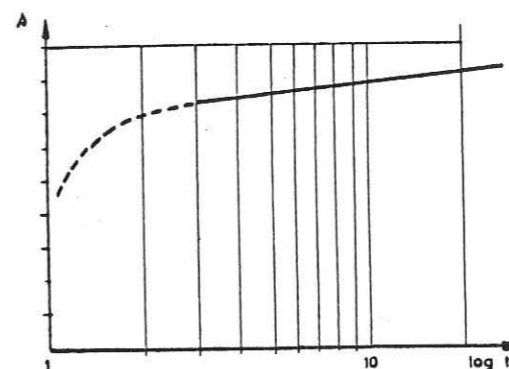
Pour l'interprétation des pompages d'essai, l'on se trouve très souvent devant plusieurs schémas hydrauliques possibles. Tenter de trouver une solution unique est généralement vain. Il est d'ailleurs prudent de déterminer les paramètres hydrauliques de l'aquifère testé par un certain nombre de méthodes et de confronter les résultats entre eux et avec les conditions hydrogéologiques locales.

Dans tous les cas les paramètres, calculés par l'une ou l'autre des méthodes sont à prendre avec prudence. Ce sont des indications très locales sur le comportement de l'aquifère sur quelques centaines de mètres au plus autour du forage pompé.

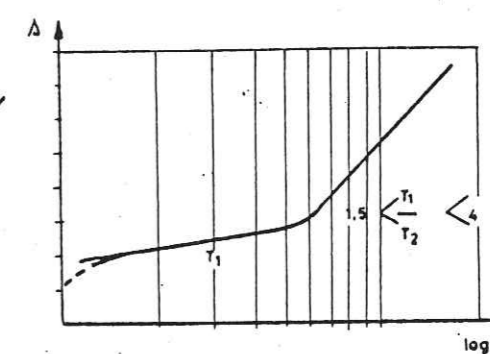
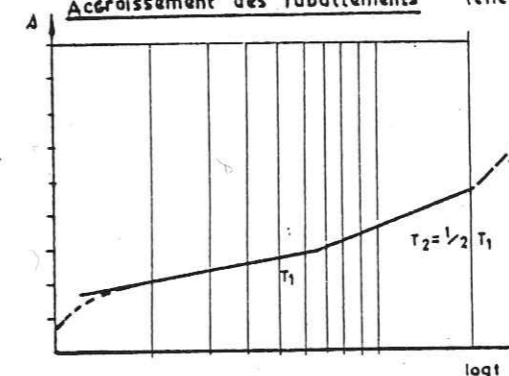
Fig. 47

AQUIFÈRE INFRACAMBIEN PRINCIPAUX TYPES d'ANOMALIES RENCONTREES dans les ESSAIS de POMPAGE (PNUD , 1982)

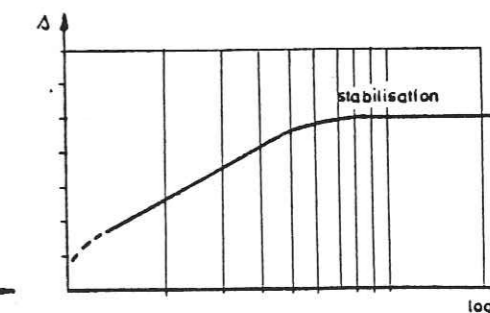
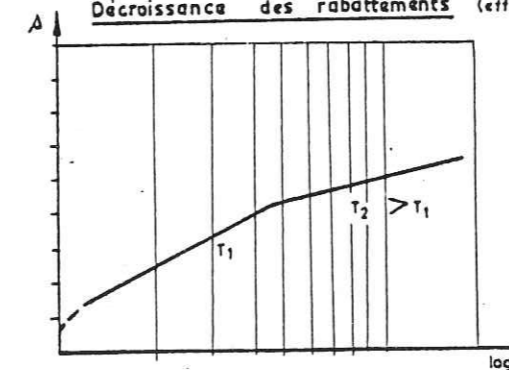
Rabattements anormaux en début de pompage



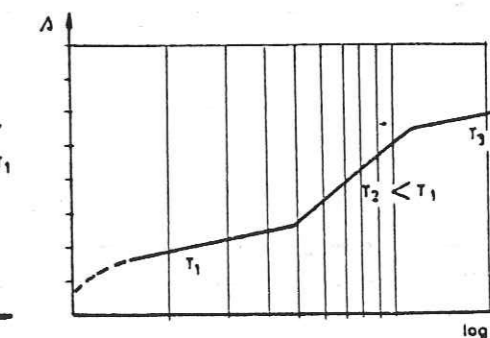
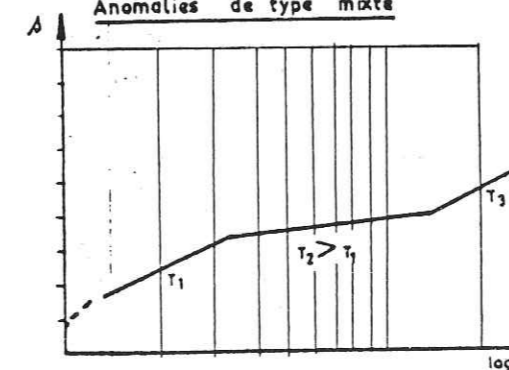
Accroissement des rabattements (effet d'écran (A) étanche (A)')



Décroissance des rabattements (effet de drainance)



Anomalies de type mixte



Diagrammes représentatifs des phases de descente. Méthode de Jacob

En résumé les paramètres hydrodynamiques obtenus lors des pompages d'essai confirment les observations hydrogéologiques:

- Le niveau de calcaires et de jaspes constitue le principal aquifère de la zone d'étude avec des transmissivités élevées 1×10^{-3} à $5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, et des coefficients d'emménagement de l'ordre de 1×10^{-4} .

Compte tenu des épaisseurs captées la perméabilité est d'environ $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

L'aquifère peut être localement étendu et assez homogène. Avec un bon ouvrage de captage on peut avoir un débit d'exploitation de l'ordre de $50 \text{ m}^3/\text{h}$, le rabattement induit restant faible.

- Les niveaux gréseux peuvent avoir localement des transmissivités élevées $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Mais les aquifères sont très hétérogènes.

Leur liaison fréquente avec la nappe superficielle assure des débits exploitables importants (10 à $20 \text{ m}^3/\text{h}$) au détriment, il est vrai, de cette dernière.

- L'aquifère des dolérites est localisé avec des transmissivités de l'ordre de $5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ avec des débits exploitables ne dépassant pas $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

CHAPITRE VI

ETUDE GEOCHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES

6.1. INTRODUCTION

6.2. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES EAUX

6.3. FAMILLES CHIMIQUES

6.4. GENESE DE LA MINERALISATION

6.5. CONCLUSION

C h a p i t r e VI

ETUDE GEOCHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES

6.1. INTRODUCTION

L'étude porte sur 132 analyses chimiques d'eau de la région de Koula-Nossombougou. Les dosages ont été effectués au Laboratoire de la D.N.H.E. à Bamako.

A part une quinzaine d'analyses, le Sodium n'a pas été dosé directement dans les autres eaux. Le Potassium lui a été dosé systématiquement. Le sodium de 8 échantillons a été dosé au Laboratoire de l'Institut Dolomieu et ses teneurs équilibrent la balance ionique. Le déséquilibre des analyses incomplètes correspond essentiellement à la teneur en sodium qui a été déterminée également par différence entre le TAC et le TH. Les teneurs en sodium ainsi obtenues ne sont donc pas très précises, mais cependant significatives.

Nous présenterons dans ce chapitre les caractéristiques physiques des eaux souterraines de la région ainsi que les différents faciès chimiques.

A partir des éléments majeurs, nous aborderons le problème des conditions de minéralisation des eaux et des origines.

6.2. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES EAUX6.2.1. Température

La température des eaux souterraines varie entre 25° C et 33° C avec une moyenne de 28° C. Les variations saisonnières sont surtout sensibles dans les eaux des nappes superficielles ; elles sont plus faibles dans les nappes profondes. Il n'y a pas d'écart sensible entre la température moyenne des eaux souterraines et la température moyenne annuelle de l'air.

6.2.2. pH

Le pH moyen mesuré en laboratoire (25° C) est légèrement basique 7,2 avec un écart type de 0,9. Les valeurs extrêmes sont 5.5 à Tioribougou et 12.3 à N'Golobougou. Les eaux à pH acide sont généralement issues des grès siliceux quartzites ; tandis que les eaux à pH basique proviennent des grès schisteux, des dolérites ou des calcaires.

6.2.3. Conductivité

La conductivité moyenne des eaux analysées est de 300 micromhos/cm soit un résidu sec équivalent d'environ 0,2 g/l. C'est à Tioribougou qu'on note la plus faible conductivité 41 micromhos/cm dans un puits traditionnel dans les grès altérés. La plus forte conductivité a été rencontrée à Warala dans la dolérite (1575 micromhos/cm).

Dans une étude de 1980 sur l'ensemble des eaux souterraines de l'Infracambrien des Plateaux mandingues il ressort que la lithologie joue un rôle essentiel dans les variations de la conductivité. C'est ainsi qu'on a observé les plages de variation suivantes de la conductivité des eaux sou-

terraines :

- de 30 à 300 micromhos/cm dans les grès et quartzites
- de 100 à 800 micromhos/cm dans les grès schisteux et les schistes
- de 300 à 700 micromhos/cm dans les dolérites.

Dans le cadre de notre région on rencontre à peu près les mêmes variations. Cependant on note des conductivités très élevées dans des eaux issues de dolérites ou du contact dolérites/Calcaires.

On a aussi rencontré dans les jaspes à Koroka une conductivité de 1400 micromhos/cm.

L'étendue des plages de variation de la conductivité des eaux montre que d'autres facteurs interviennent dans la minéralisation : densité de fracturation, profondeur de l'eau, contexte géologique, etc.

La conductivité des eaux confirme certains caractères généraux des aquifères mis en évidence par l'étude hydrogéologique et géologique : discontinuité, stratification des zones aquifères.

Les variations saisonnières restent généralement faibles : de quelques micromhos/cm à quelques dizaines de micromhos/cm.

6.3. FAMILLES CHIMIQUES

La représentation des analyses chimiques en diagramme logarithmique de Schoeller-Berkaloff permet de distinguer 2 grandes familles chimiques dans les eaux souterraines :

- des eaux bicarbonatées
- des eaux chlorurées.

6.3.1. Eaux bicarbonatées

Elles regroupent plus de 90% des eaux analysées, et se caractérisent par une prédominance de l'ion HCO_3^- sur les autres ions. Les bicarbonates pouvant constituer l'essentiel des anions et la moitié de la concentration totale des eaux. Malgré ce caractère commun, les eaux de cette famille ont une composition chimique très hétérogène. Cette hétérogénéité se manifeste surtout au niveau des cations. C'est ainsi qu'on y observe les faciès chimiques suivants :

6.3.1.1. Eaux bicarbonatées calciques (fig.48)

avec $r \text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^-$ ou $r \text{SO}_4^{2-}$

$r \text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$ ou $r (\text{Na} + \text{K})$.

Ce sont des eaux relativement chargées en sels minéraux. La concentration totale de ces eaux varie entre 6 et 10 még./l. et ne semble pas liée à un faciès pétrographique précis. La figure montre 4 types d'eaux bicarbonatées calciques. Elles sont issues de grès schisteux (Choala), de dolérites (Nonkon), de contacts dolérites/calcaires (Kodiala) ou dolérites/schistes (Fonflebourgou).

Fig. 48 -Diagramme logarithmique : Eaux bicarbonatées calciques

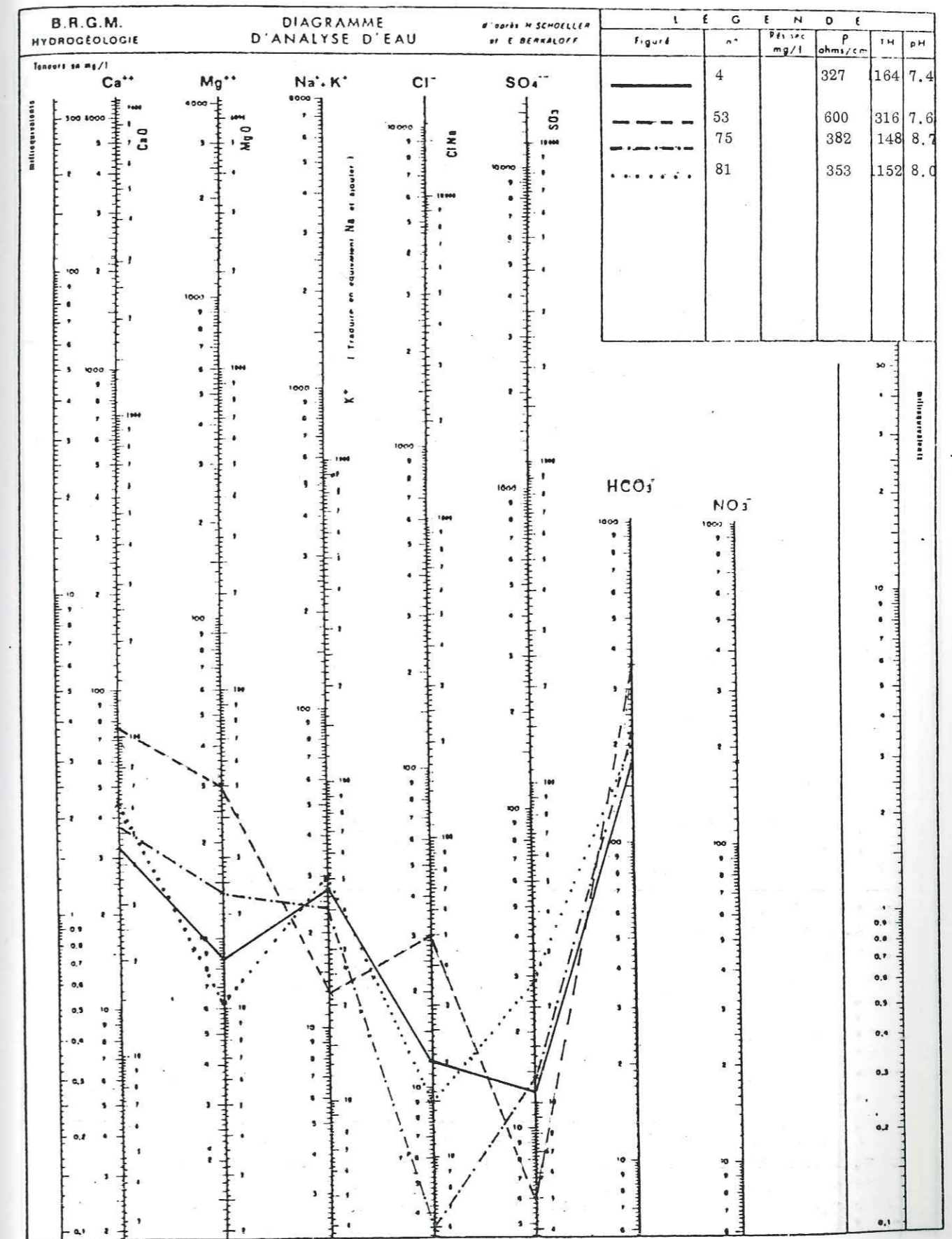


Fig. 49 - Diagramme logarithmique : EAUX BICARBONATEES MAGNESIENNES

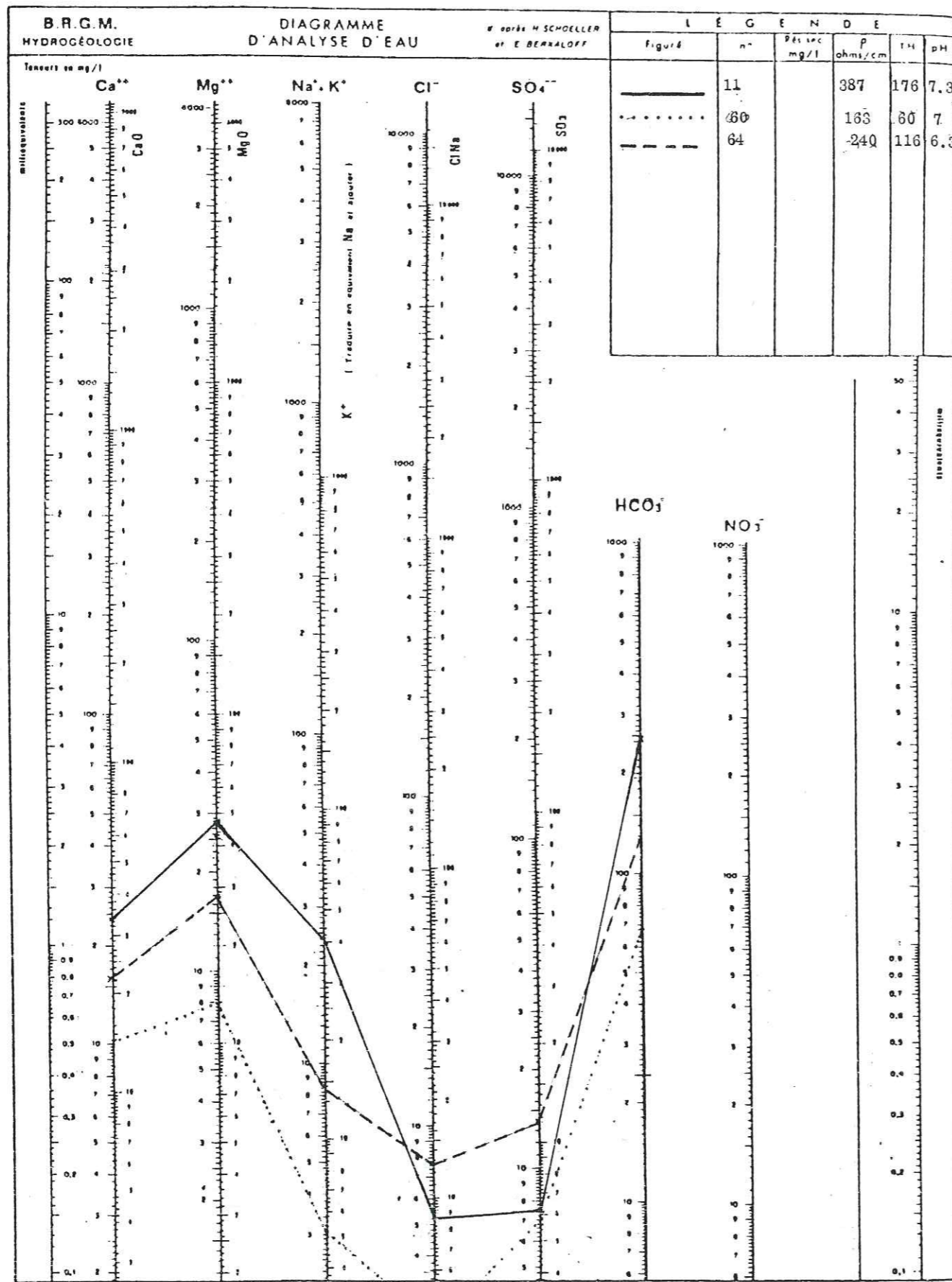


Fig. 50 - Diagramme logarithmique : Eaux bicarbonatées sodiques

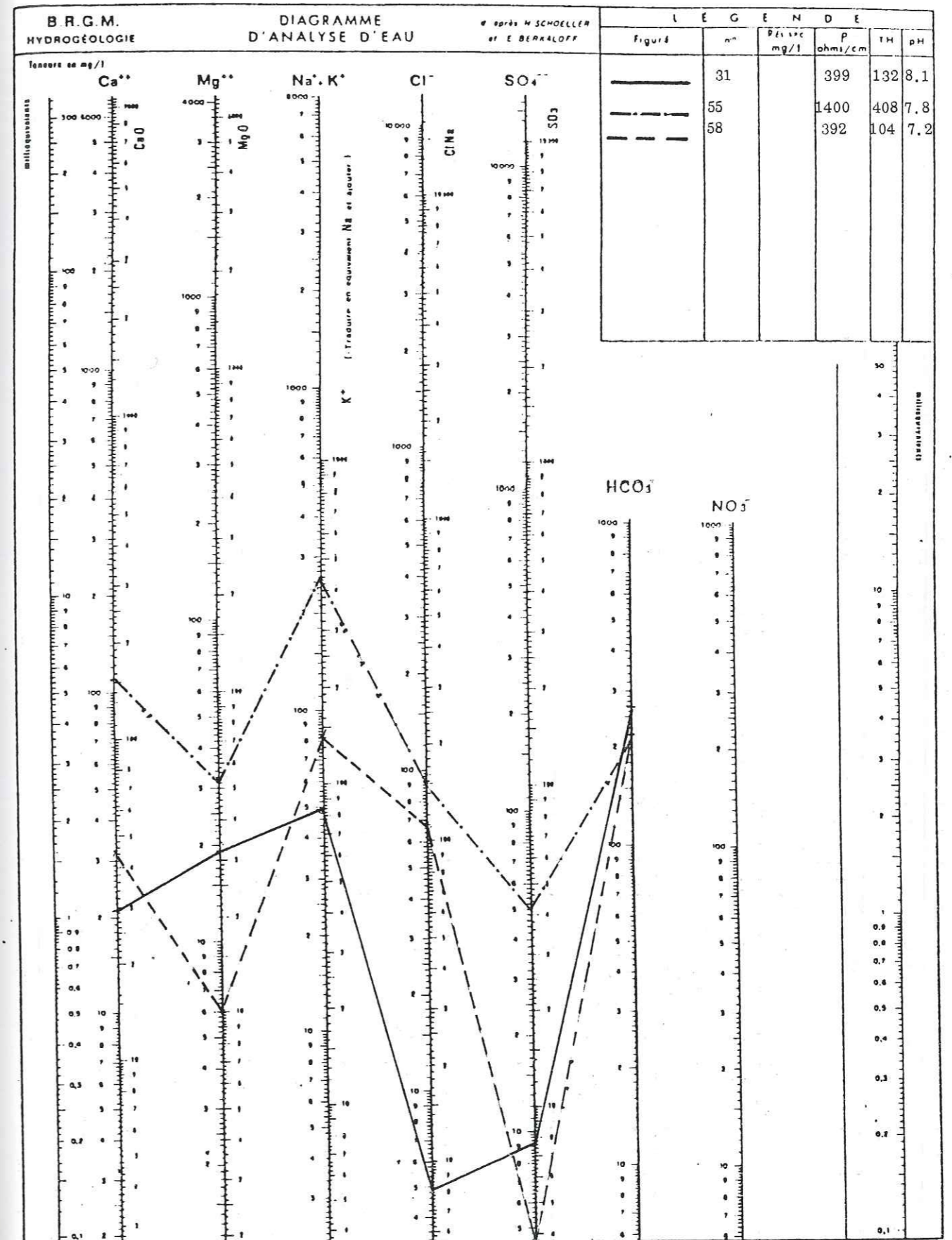
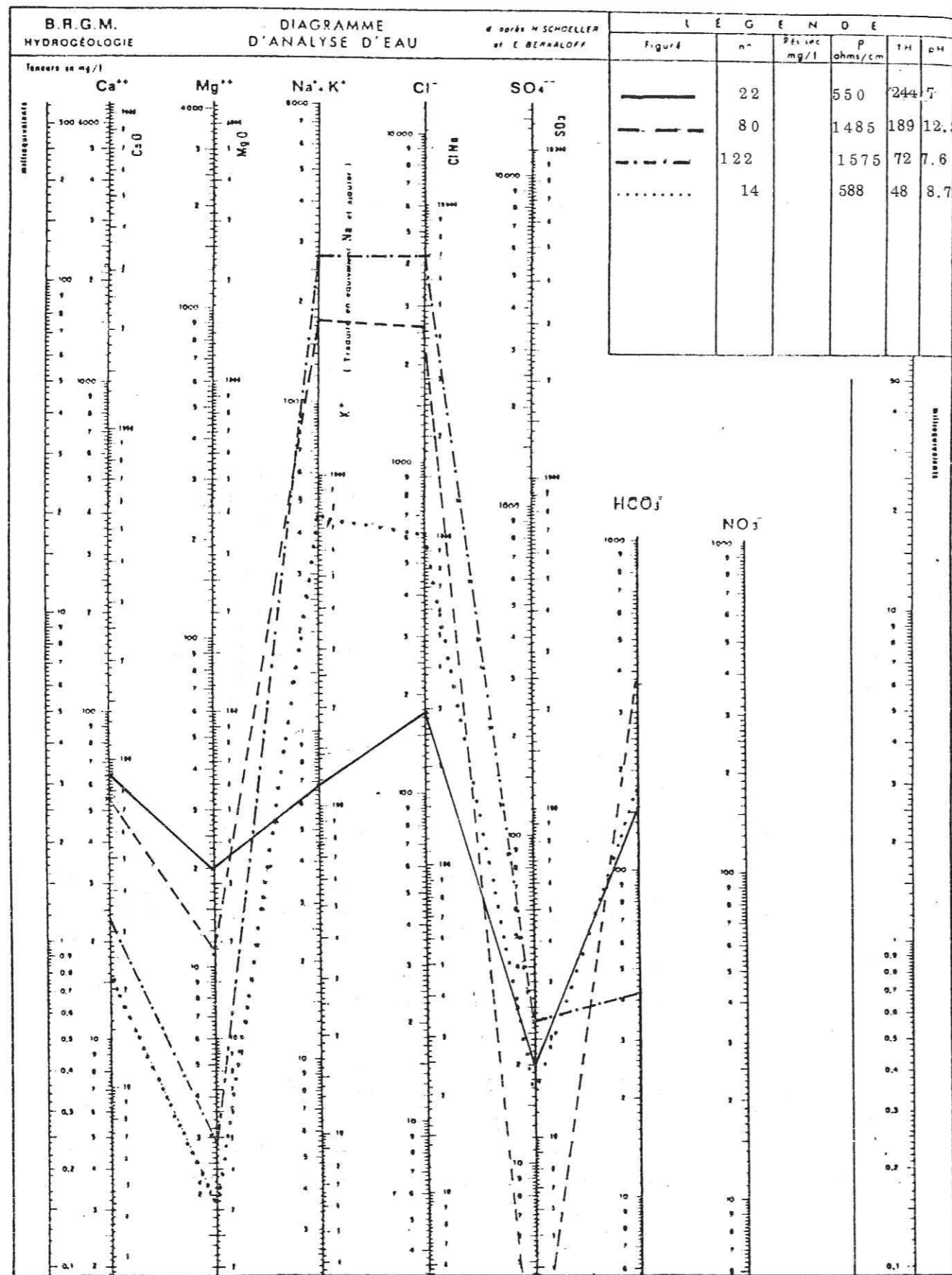


Fig. 51 - Diagramme logarithmique : Eaux chlorurées sodiques



6.3.1.2. Eaux bicarbonatées magnésiennes (fig. 49)

avec $r \text{HCO}_3 > r \text{Cl}$ ou $r \text{SO}_4$ $r \text{Mg} > r \text{Ca}$ ou $r (\text{Na} + \text{K})$.

Comme précédemment ces eaux sont issues de roches diverses. On les rencontre aussi dans les nappes superficielles (Kossaba).

6.3.1.3. Eaux bicarbonatées sodiques (fig. 50)

avec $r \text{HCO}_3 > r \text{Cl}$ ou $r \text{SO}_4$ $r (\text{Na} + \text{K}) > r \text{Ca}$ ou $r \text{Mg}$

Dans ces eaux, la prédominance des alcalins s'accompagne généralement de teneurs relativement importantes en chlorures ou en nitrates. On les rencontre dans les eaux peu chargées des nappes superficielles et dans les eaux de quelques nappes profondes riches en ions chlorures.

6.3.1.4. Eaux bicarbonatées mixtes

A côté de ces 3 principaux types d'eaux bicarbonatées, on rencontre des types mixtes. Elles constituent des évolutions entre les différents pôles cités.

6.3.2. Eaux chlorurées (fig. 51)

Les eaux chlorurées ont généralement une concentration totale en sels dissous très élevée par rapport aux eaux bicarbonatées (de 30 à 240 méq./l.). Dans la région ces eaux sont essentiellement liées aux dolérites et à ses zones de contact avec les calcaires ou les schistes.

6.4. GENESE DE LA MINERALISATION

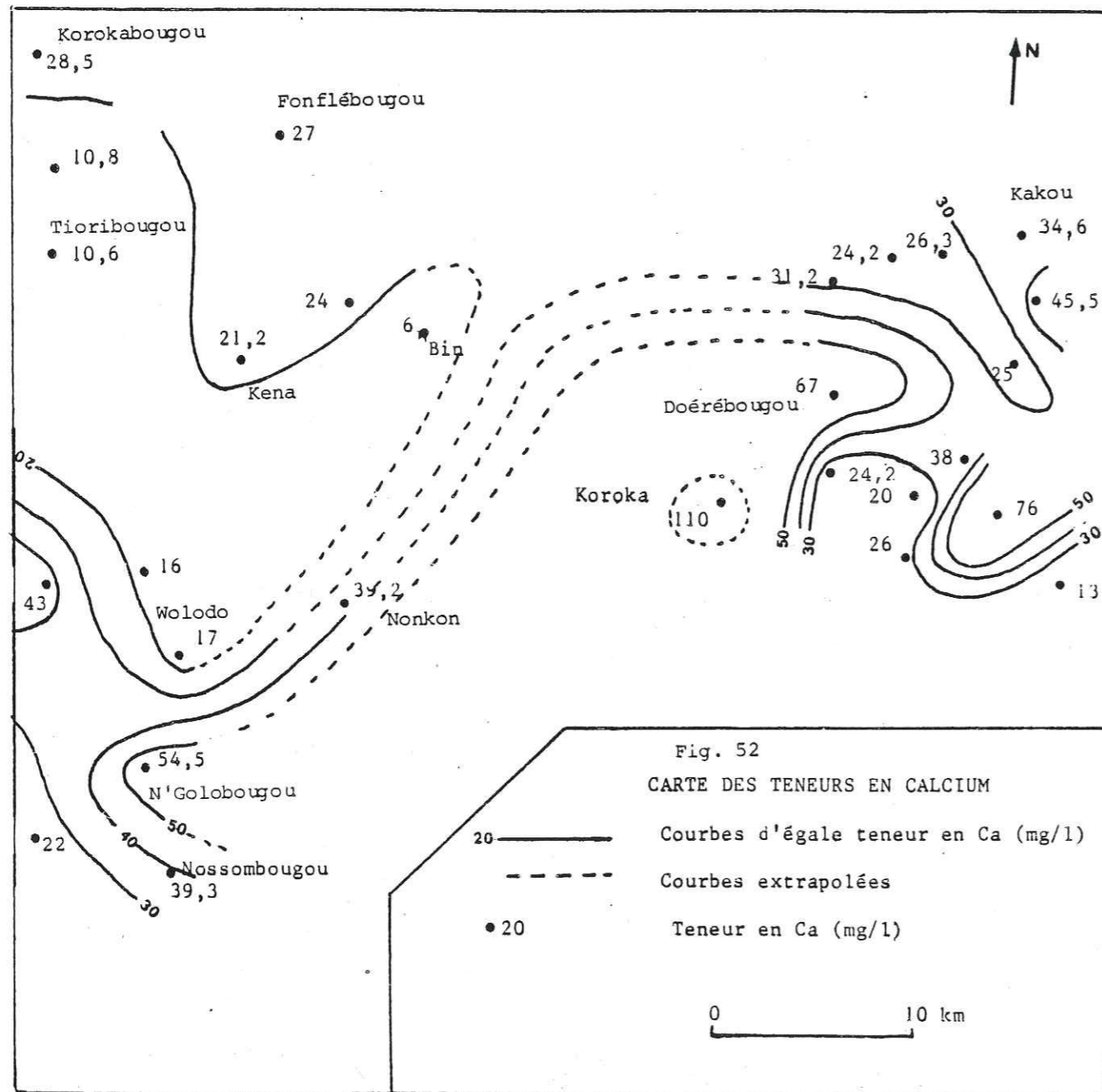
D'après SCHOLLER (1951) l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines se fait lors de l'infiltration par dissolution et attaque chimique des substances minérales contenues dans le sol et la zone d'altération. Cette première minéralisation dépend d'un certain nombre de facteurs (climat, nature 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.

L'existence de 2 grandes familles chimiques dans les eaux souterraines de la région met en évidence des conditions distinctes dans l'acquisition de la minéralisation et peut-être même de l'origine de certains éléments.

Il ne nous sera pas possible, dans le cadre de ce travail d'étudier ces conditions en détail, les éléments d'appréciation faisant défaut.



6.4.1. Calcium-Magnésium

Les teneurs en calcium des eaux sont généralement faibles 27 mg/l en moyenne, avec un maximum de 110 mg/l à Koroka dans les jaspes.

Dans la région le calcium peut provenir des calcaires, présents dans certaines zones, mais également des dolérites. On n'observe pas d'écart important des teneurs en calcium des eaux issues des calcaires et des autres roches.

Les teneurs maximales en calcium semblent former une auréole allongée selon un axe NE-SW (fig. 52) correspondant à une zone où on observe d'importantes venues doléritiques. DARS (1961) note que la mise en place des dolérites au Mali "a provoqué un métamorphisme de contact de faible intensité mais d'extension importante" et plus loin "dans les grès comme dans les pélites, l'élimination du Calcium est frappante. Cet élément se retrouve dans les sédiments encaissants sous forme de filons de calcite".

L'auréole correspondrait donc à la zone d'extension du métamorphisme. Cet apport de calcium des dolérites vers les roches encaissantes expliquerait aussi le fait qu'on observe des teneurs voisines en calcium dans les eaux issues des calcaires et des autres roches de la région.

Les concentrations en magnésium restent généralement faibles : 13 mg/l en moyenne. Certaines eaux en contiennent moins d'un milligramme par litre.

Ce magnésium provient essentiellement de la biotite et des pyroxènes des dolérites.

Le rapport $r \text{ Mg} / r \text{ Ca}$ est toujours inférieur à 1 dans les eaux chlorurées. Dans les eaux bicarbonatées, il peut varier dans de larges proportions. On note d'ailleurs que les variations dans le temps de la composition chimique des eaux portent essentiellement sur le rapport $r \text{ Mg} / r \text{ Ca}$. C'est ainsi qu'au cours de l'année 1983 ce rapport a oscillé entre 0.82 et 10.60 dans le forage de l'école à Massantola, la dureté totale étant restée pratiquement constante (fig. 53). Cependant, la qualité de l'analyse (70) est douteuse quant aux teneurs en calcium et en magnésium.

6.4.2. Sodium - Potassium

Les teneurs en sodium sont très variables : 20 mg/l en moyenne dans les eaux bicarbonatées et 1300 mg/l dans les eaux chlorurées.

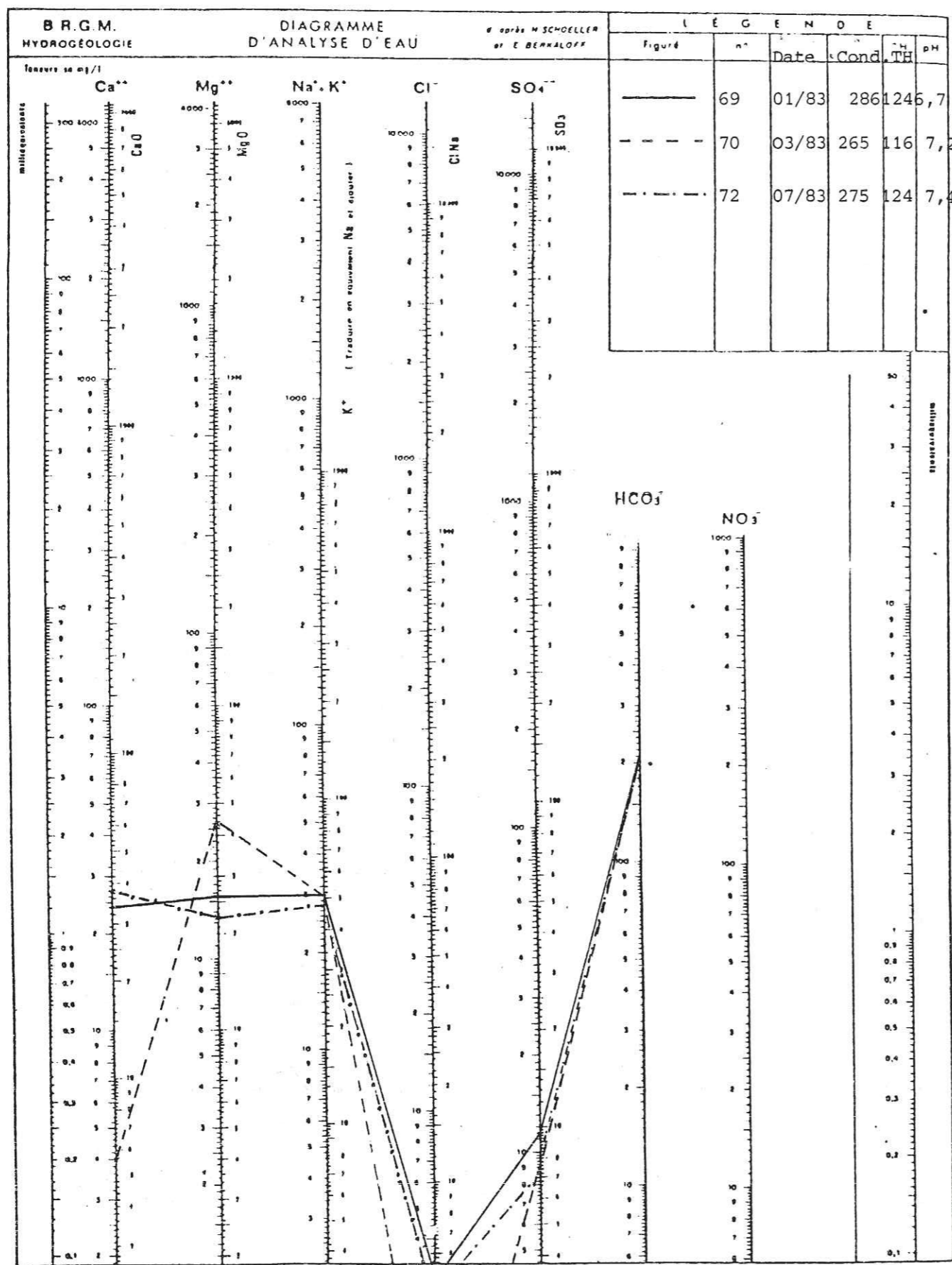
Dans les eaux bicarbonatées il provient essentiellement de l'altération de feldspaths (albite). Mais une autre origine doit être recherchée pour le sodium des eaux chlorurées.

Les teneurs en potassium sont très faibles 3,5 mg/l en moyenne. Ces faibles teneurs s'expliquent probablement par l'absorption de cet élément par les plantes (SAVADOGO, 1984).

Il n'existe pas de différence entre les teneurs en potassium des eaux bicarbonatées et les eaux chlorurées.

Le potassium provient essentiellement de la biotite des dolérites et de certains niveaux gréso-schisteux.

Fig. 53 - Evolution du chimisme des eaux à Massantola Ecole



Le rapport $r_{Na/rK}$ est généralement supérieur à 1.

6.4.3. Bicarbonates

Par leur pH presque toujours inférieur à 8,3, les eaux souterraines de la région ne contiennent que des ions HCO_3 . La teneur moyenne en acide carbonique est de 150 mg/l. Ces eaux ont donc une origine essentiellement atmosphérique (SCHOLLER, 1963). La remontée générale des niveaux piézométriques pendant l'hivernage confirme cette hypothèse.

Les bicarbonates peuvent provenir de la dissolution du CO_2 des sols, mais également de l'attaque des calcaires et de certains feldspaths. Il semble que la part des dissolutions du gaz carbonique au niveau du sol soit faible. Malgré l'alimentation des nappes on n'observe pas de variation sensible des concentrations en ion HCO_3 . Les teneurs entre saison sèche et saison humide restent constantes (Ecole Massantola).

Dans les calcaires les teneurs sont légèrement supérieures à la moyenne 200 mg/l, tandis que les eaux des grès siliceux n'en contiennent que 50 à 90 mg/l (Tioribougou).

6.4.4. Chlore

Cet élément se retrouve avec des teneurs très variables dans les eaux souterraines de la région. Absent de certaines eaux il atteint des concentrations anormales dans les eaux chlorurées (4223 mg/l à Warala).

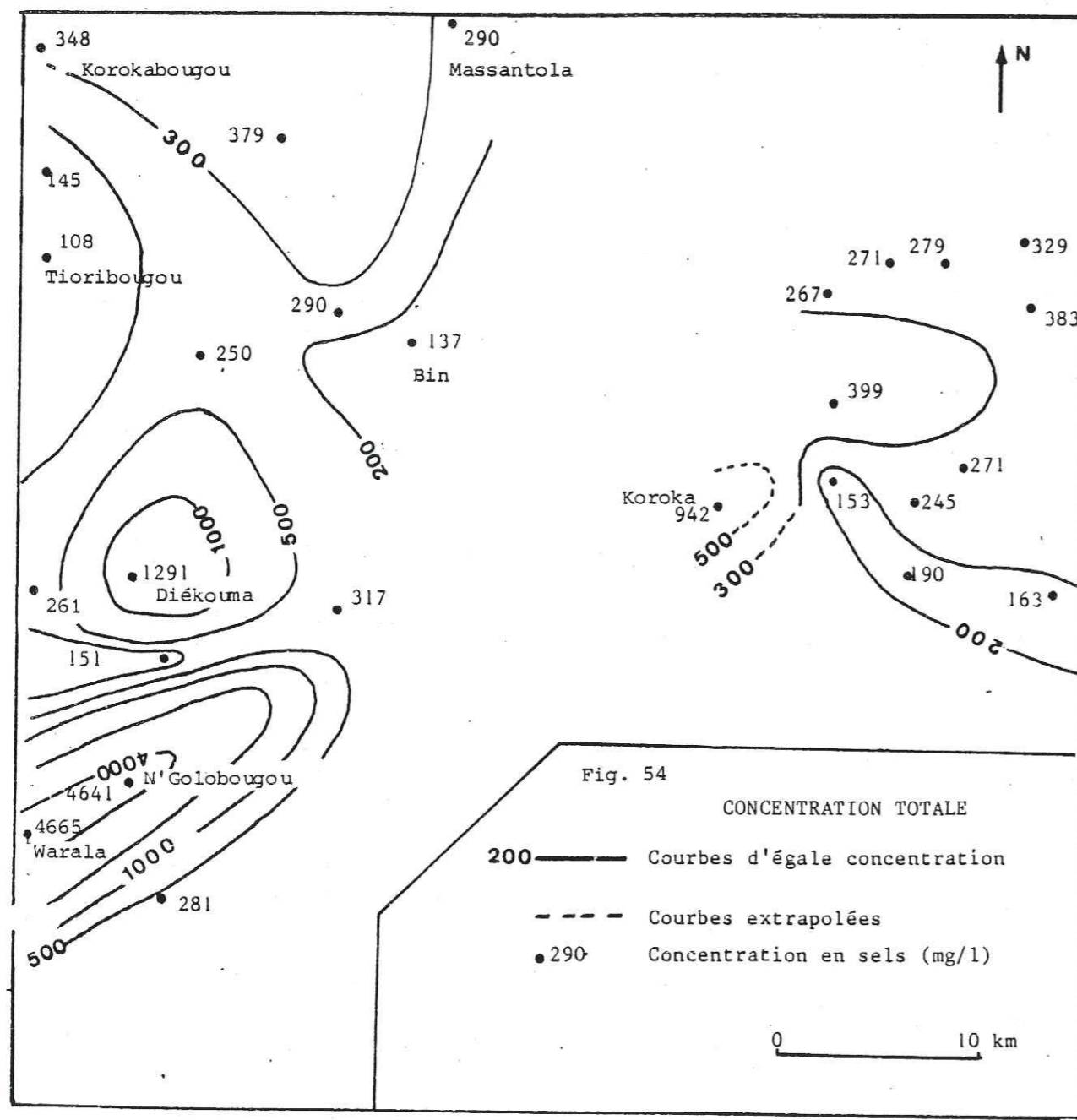
L'origine de ces fortes teneurs en ion chlore pose un problème. Nous avons dit plus haut que ces eaux chlorurées sont issues de dolérites ou de zones de contact avec les calcaires. Malgré la présence d'apatite dans ces zones, sa dissolution ne peut à elle seule expliquer ces concentrations en chlore. En outre nous avons rencontré de l'apatite dans certains forages, sans que leurs eaux ne contiennent autant de chlore.

L'hypothèse d'une surconcentration par évaporation des chlorures du fait de difficultés de circulation des eaux liées à l'altération argileuse (SAVADOGO, 1984), ne peut pas être retenue. Les venues d'eau sont relativement profondes (100 m) et se situent dans des roches apparemment saines.

Nous avancerons donc l'hypothèse d'une "origine profonde" liée à la mise en place des dolérites. Mais l'ancienneté de cette mise en place nous amène à être prudent. En outre les températures des eaux chlorurées ne sont pas différentes de celles des autres eaux. A moins d'admettre avec L. ARNAUD (1934) à propos des eaux thermominérales du Massif central français "qu'au lieu de supposer que le chlore des eaux provient de fumerolles profondes actuellement en activité, on peut penser qu'il provient de l'attaque de produits chlorurés formés anciennement par des exhalaisons contemporaines des éruptions".

Il est à noter que ces eaux chlorurées se situent dans la zone où on observe les plus importantes venues doléritiques. (fig. 54).

L'hypothèse d'une zone de foyers intrusifs axée sur Warala-N'Golobougou a été émise à la suite des études géomorphologique et géologique, au cours de la campagne 1983-1984. Des études géophysiques sont prévues pour la confirmer. Dans ce cas les eaux chlorurées seraient liées à la proximité des foyers d'intrusions doléritiques.



Le problème reste donc toujours posé. Une étude isotopique pourrait déjà résoudre celui de l'âge.

6.4.5. Sulfates

Les teneurs en sulfates des eaux sont faibles 5,8 mg/l en moyenne. Ils sont absents de certaines eaux. La concentration maximale 50 mg/l a été rencontrée à Koroka.

Les sulfates proviennent de la décomposition de la pyrite présente surtout dans les formations schisteuses inférieures.

Les eaux de la partie Nord-Est présentent des teneurs supérieures à la moyenne (70 mg/l).

6.4.6. Nitrates

Les eaux souterraines de la région contiennent parfois des nitrates mais les teneurs sont généralement faibles moins d'1 mg/l. On peut cependant rencontrer des teneurs assez élevées (170 mg/l à Koroka).

Ces nitrates ont plusieurs origines possibles : humaines, industrielles (engrais) ou activité microbienne. Les nappes étant relativement profondes la source principale des nitrates est probablement liée aux engrais azotés que l'on commence à utiliser de plus en plus dans la région.

On signale aussi des nitrates provenant de matières organiques contenue dans les schistes d'Amérique du Nord (Colloque A.I.E.A. Vienne, 1983). Une telle origine peut être envisagée pour les nitrates de Koroka où on observe un accroissement des teneurs des autres éléments (calcium, magnésium, potassium, sulfates). Le ^{15}N permettrait de trancher entre les différentes hypothèses.

6.5. CONCLUSION

De cette étude sommaire il ressort que le chimisme des eaux souterraines reflète la complexité géologique et hydrogéologique de la zone de Koula-Nossombougou.

Une fois de plus les intrusions basiques semblent jouer un rôle important avec des minéralisations très élevées aux abords des massifs doléritiques. Ces eaux très chlorurées (1000 à 4000 mg/l) présentent parfois des pH de plus de 12 (N'Golobougou).

L'augmentation des concentrations en sels dissous ne concerne que le chlore et le sodium, les teneurs des autres éléments variant très peu.

Les eaux sont dans leur majorité peu chargées en sels dissous avec une conductivité moyenne d'environ 300 micromhos/cm et un pH légèrement basique : 7.2.

Le faciès chimique est bicarbonaté calcique et magnésien ou sodique.

Quand la nappe de fissure et la nappe superficielle communiquent il n'y a pas de différence notable entre leur composition chimique (Tioribougou).

La prédominance des ions bicarbonatés indique que les eaux souterraines de la zone étudiée sont d'origine atmosphérique. Ce qui est en accord avec les fluctuations des niveaux piézométriques et la composition isotopique des eaux, qui montrent l'existence d'une recharge actuelle.

La présence d'eaux relativement anciennes comme nous le verrons avec les études isotopiques pourrait expliquer les concentrations élevées de certaines eaux ayant longtemps séjourné au contact avec les dolérites.

Un échantillonnage plus précis, suivi d'analyses complètes contribuerait à une meilleure connaissance des conditions hydrochimiques de la zone.

CHAPITRE VII

ETUDE ISOTOPIQUE DES EAUX

7.1. GENERALITES

7.2. ANALYSE DES RESULTATS

7.3. CONCLUSION

Chapitre VII

ETUDE ISOTOPIQUE DES EAUX SOUTERRAINES

7.1. GENERALITES

Différents isotopes du milieu sont utilisés en hydrogéologie. Ils sont stables ou radioactifs, naturels et/ou artificiels. Parmi les plus utilisés nous avons : le Deutérium (D, ^2H), le Tritium (^3H , T), l'Oxygène 18 (^{18}O), le Carbone 14 (^{14}C), le Carbone 13 (^{13}C).

Les teneurs en isotopes stables (^2H , ^{17}O) principalement liées aux précipitations fournissent des informations sur les mécanismes de recharge et les zones d'alimentation.

Les teneurs en isotopes radioactifs (^3H , ^{14}C) sont régies par la loi générale de la décroissance radioactive :

$$t = \frac{T \ 1/2}{\text{Ln}2} \text{Ln} \frac{A_0}{A_t}$$

T 1/2 = demi-vie ou période

A₀ = Activité initiale

A_t = Activité au temps t.

Leur étude permet donc la connaissance du temps de transit des eaux, l'âge et l'identification de mélange entre les eaux.

7.1.1. Deutérium - Oxygène 18

Ce sont des constituants de la molécule d'eau et constituent de ce fait des traceurs parfaits.

Leurs teneurs sont mesurées par spectrométrie de masse et s'expriment en delta (δ)

$$\delta = \frac{R \text{ échantillon}}{R \text{ étalon}} - 1$$

avec R : rapport isotopique = $\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}$ ou $\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}}$

L'étalon utilisé est la composition isotopique moyenne des eaux océaniques : "Standard Mean Ocean Water" : S.M.O.W.

Dans la pratique on exprime δ en parts pour mille (δ ‰)

$$\delta \text{ ‰} = \left(\frac{\text{Rech.}}{\text{Rét.}} - 1 \right) \times 1000$$

Les variations de teneurs en isotopes lourds dépendent du fractionnement isotopique, lors des changements de place de l'eau, et des principaux facteurs régissant les précipitations (latitude, altitude, saison).

Dans les précipitations les teneurs en ^{18}O et ^2H sont linéairement corrélées avec la température de condensation. Ainsi dans les eaux de précipitation n'ayant pas subi d'évaporation on a la révélation :

$$\delta ^2\text{H} = 8 \delta ^{18}\text{O} + d \text{ (CRAIG, 1961)}$$

d est appelé excès en deutérium et dépend du régime de précipitation (+ 10 en régime océanique non perturbé ; + 22 en régime méditerranéen). Lorsqu'une partie des précipitations est reprise par l'évaporation, on a toujours une relation linéaire entre les teneurs en isotopes lourds des précipitations avec des pentes plus faibles comprises entre 3 et 5 (FONTES, 1974).

7.1.2. Tritium

Le tritium a 2 origines : naturelle et artificielle.

Le tritium provient de l'interaction, dans la haute atmosphère, entre les neutrons produits par le rayonnement cosmique et l'azote atmosphériques. Cette production est faible ; 0.25 atome par cm^2 et par seconde, soit environ 3.5 kg/an (LAT et SUESS, 1969).

Le tritium artificiel est produit par les essais thermonucléaires aériens ; 200 kg supplémentaires ont ainsi été injectés dans l'atmosphère. Depuis 1964 on assiste à une décroissance des teneurs dues à l'arrêt des essais aériens. La période du tritium est de 12,43 ans.

La teneur en ^3H se mesure par comptage radioactif en scintillation liquide. Les résultats sont exprimés un Unité de Tritium (UT). 1 UT correspond à 1 atome de ^3H pour 10^{18} atomes de ^1H , soit 3.28 picocuries par cm^3 (1 curie = $3,710^{10}$ désintégration par seconde).

7.1.3. Carbone 13 - Carbone 14

Le Carbone 13 est un isotope stable. Les mesures sont effectuées au spectromètre de masse et s'expriment en ‰, l'étalon étant la composition isotopique de la calcite d'un rostre de Belemnite de la Pee Dee formation de la Caroline du Sud (P.D.B.).

Les variations de teneur permettent la connaissance de l'origine du Carbone dissout (atmosphérique, minéral ou organique).

Le Carbone 14 a les mêmes origines que le tritium : naturelles par rayonnement cosmique et artificielle par les essais nucléaires. Il est ensuite oxydé ($^{14}\text{CO}_2$) et se mélange au gaz carbonique atmosphérique et suit le chemin habituel jusqu'aux eaux souterraines.

Les mesures se font par comptage en scintillation liquide.

Les résultats sont exprimés :

-en % de carbone moderne. L'activité de l'année de référence (1950) est fixée à 100 % ($A_0^{14}\text{C} = 100 \%$)

-en parts pour mille de différence entre l'activité mesurée de l'échantillon ($A_{\text{mes}}^{14}\text{C}$) et celle de l'étalon de référence ($A_0^{14}\text{C}$) :

$$^{14}\text{C} = \left(\frac{A_{\text{mes}}^{14}\text{C} - A_0^{14}\text{C}}{A_0^{14}\text{C}} \right) \times 1000 \text{ en ‰}$$

l'étalon étant l'acide oxalique de 1958 du "National Bureau of Standard des Etats-Unis" (N.B.S.) calibré à partir d'un bois d'un chêne de 1890.

Les teneurs en ^{14}C permettent la datation des eaux. Mais les variations de teneur en "C" ne sont pas uniquement liées à la décroissance radioactive ; plusieurs autres facteurs peuvent intervenir :

- Fixation dans le sol par absorption ;
- Echanges avec les roches carbonatées, le gaz carbonique atmosphérique ou magmatique ;
- Mélange entre eaux d'âges différents.

A tous ces facteurs il faut ajouter l'apport du ^{14}C par les essais thermonucléaires depuis 1954, ainsi que la dilution du ^{14}C par la combustion industrielle (carbon, pétrole : effet de Suess).

Tout ceci fait que la détermination de l'âge des eaux par le ^{14}C est délicat et nécessite plusieurs corrections.

7.2. ANALYSE DES RESULTATS

Des études isotopiques ont été menées par l'A.I.E.A. en 1980 et 1982 dans la région du projet PNUD, nous disposons ainsi d'une quinzaine d'analyses sur notre zone d'étude que nous avons complétées avec 8 échantillons dont les dosages portant sur l'oxygène 18 et le tritium ont été effectués au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon.

7.2.1. Deutérium - Oxygène 18

Les valeurs isotopiques des précipitations à la station météorologique de Bamako s'inscrivent dans le diagramme $\delta \text{D} - \delta ^{18}\text{O}$ sur la droite $\delta \text{D} = 5,8 \delta ^{18}\text{O} - 0,9$ (A.I.E.A., 1983).

Ceci démontre tout d'abord l'influence de l'évaporation sur les pluies à Bamako due à la continentalité de cette station. En outre le fait que bon nombre de points représentatifs se situent au dessus de la droite des précipitations mondiales montre que les pluies océaniques en provenance du Golfe de Guinée ont un excès en deutérium supérieur à + 10, et qui est vraisemblablement de + 18. (Communication orale de J. SARROT REYNAULD).

Tableau 6 . Analyses isotopiques des eaux de la zone de Koula-Nossombougou

Localité	Date	δD ‰	$\delta^{18}O$ ‰	Tritium UT	$\delta^{13}C$ ‰	^{14}C ‰ moderne
* Massantola F ₁	21/05/80	-49,9	-6,56	1,1 ± 1,0		
* Massantola F ₂	21/05/80	-46,3	-6,45	1,0 ± 1,0		
* Massantola F ₃	21/05/80	-43,2	-6,34	0,0 ± 1,0		
* Massantola	23/03/82	-40,7	-6,36	1,4 ± 0,2	-16,4	39,3 ± 0,9
Massantola	02/08/84		-6,03	7,0 ± 1,0		
* Nossombougou	23/03/82	-34,6	-6,01	20,2 ± 1,0		
Nossombougou	07/08/84		-5,53	4,4		
* Tioribougou	23/03/82	-37,1	-6,36	33,1 ± 1,0		
* Karadié	24/03/82	-37,1	-6,18	0,4 ± 0,3		
Karadié	02/08/84		-5,29	6 ± 1		
Koula	31/07/84		-5,75	4,3		
Kossoba	02/08/84		-5,32	4,3		
Sirakorola	02/08/84		-5,10	4,5		
Tamani	31/07/84		-4,26	4,0		
Tombougou	06/08/84		-5,35	4,3		
Bamako (pluie)	06/09/84		-4,45	10 ± 1		
* Kakou	24/03/82		-6,26	4,9 ± 0,2		
* Banamba F ₁	24/03/82	-21,4	-3,41	37,2		
* Banamba F ₉	24/03/82		-5,9	2,6 ± 0,1	-18,7	84,4 ± 2,4
* Kolokani	23/03/82	-35,1	-6,06	41,3 ± 1,2		

* Source A.I.E.A. (1983)

Les teneurs en isotopes lourds des eaux météoriques originelles seraient sur la droite $\delta\% D = 8\delta\%^{18}O + 18$.

Dans les eaux souterraines les teneurs en isotopes lourds sont assez homogènes : de - 36,6 à 46,9 ‰ pour le deutérium et de 4,26 à 6,56 ‰ pour l'oxygène 18.

Sur le diagramme (fig. 55) deux groupes d'eau apparaissent :

- des eaux liées aux précipitations actuelles et dont les teneurs en oxygène 18 et deutérium s'alignent approximativement sur la droite des eaux météoriques de Bamako (Nossombougou, Tioribougou, Karadié)

- des eaux rechargées sous des conditions climatiques différentes des conditions actuelles à partir d'eau de pluie ayant sensiblement les caractéristiques des pluies océaniques classiques ($\delta\% D = 8\delta\%^{18}O + 10$), soit de précipitations ayant subi avant l'infiltration une évaporation encore plus intense (Massantola).

Il semble certain que ces eaux sont très anciennes compte tenu de leurs teneurs en tritium et carbone 14 très basses.

7.2.2. Isotopes radioactifs

De l'étude de l'A.I.E.A. on peut retenir les critères suivants : pour l'identification des mélanges dans la zone :

* Tritium

- 20 à 46 UT : eaux rechargées après 1968
- 0 à 20 UT : mélange entre eaux actuelles et eaux plus anciennes.

* Carbone 14

L'activité en carbone 14 laisse apparaître deux pôles : "des eaux anciennes d'âge supérieur à 10 000 ans caractérisées par une composition en oxygène 18 de - 7 ‰, et les eaux actuelles avec une activité en carbone 14 de 120 % pour une valeur en oxygène 18 de -5 ‰". fig. 56

Les eaux avec une activité en carbone 14 supérieure à 85 % ont des teneurs en tritium d'environ 5 U.T. et indiqueraient un mélange entre des eaux anciennes et des eaux rechargées après 1952 dont il est difficile de déterminer des proportions.

Les eaux avec une activité en carbone 14 inférieure à 50 % ne présentent pas de tritium.

Dans la zone de Koula-Nossombougou les teneurs en tritium varient entre 0 UT (Massantola) et 33 UT (Tioribougou). Il n'existe qu'une seule mesure de l'activité en carbone 14 à Massantola 39 %.

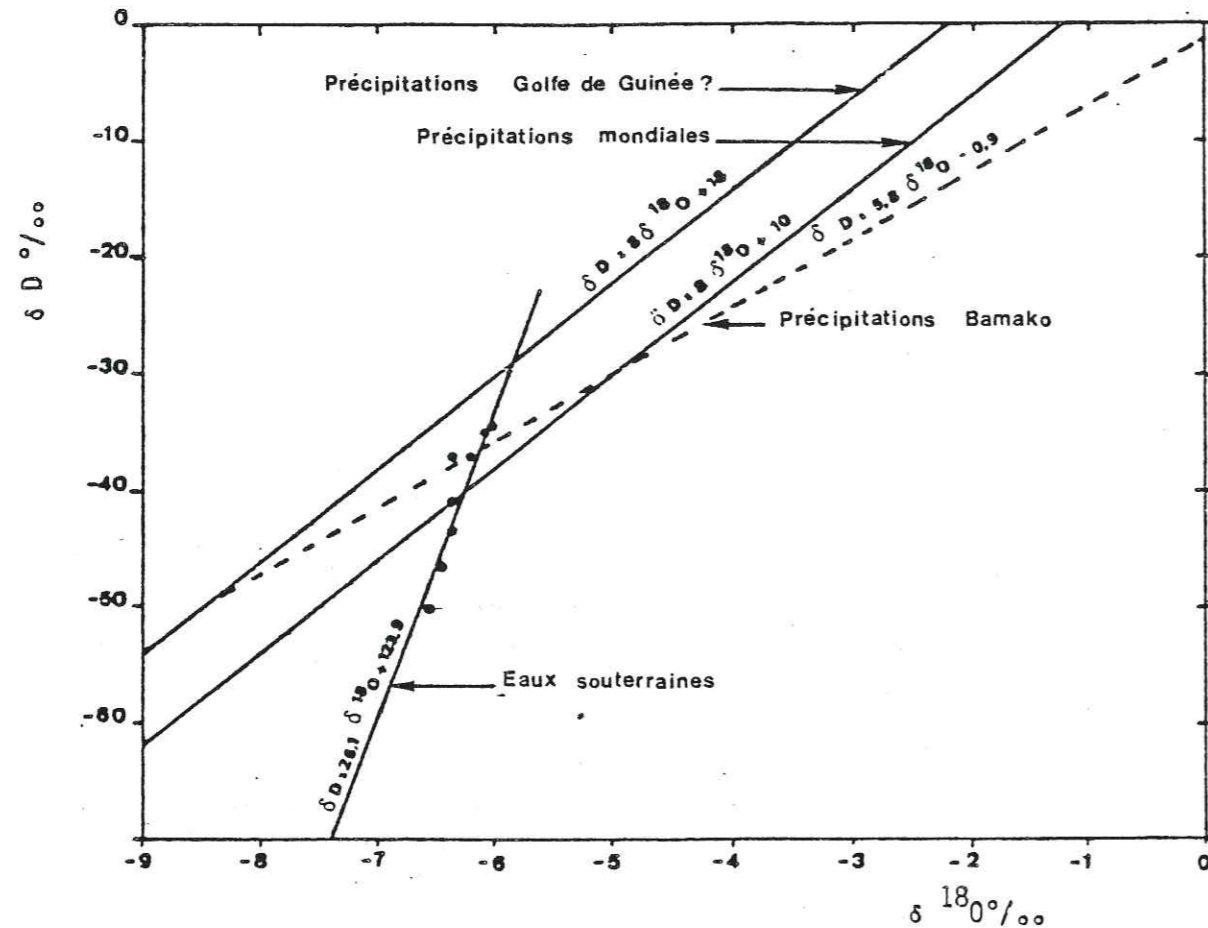


Fig. 55. - Diagramme Deutérium - Oxygène-18

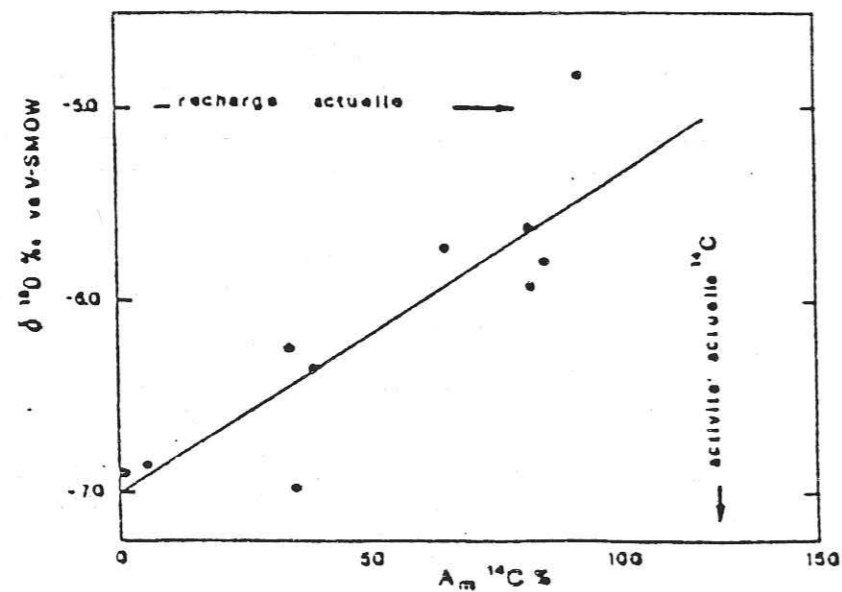


Fig. 56 - Relation entre teneur en Oxygène-18 et activité mesurée du Carbone - 14 (A.I.E.A. ,1983)

7.2.3. Interprétation

Les données isotopiques font ressortir certains points sur l'alimentation et le mode de gisement des eaux souterraines.

- Les teneurs en oxygène 18 des eaux souterraines de la région comprises entre - 4,26 et 6,56 ‰ sont voisines de celles des eaux de précipitations des mois de juillet et août. Ce qui indiquerait un apport important de ces pluies à la recharge des nappes. Ceci concorde avec les observations piézométriques.

- Les teneurs en tritium sont généralement faibles inférieures à 5 UT donc avec une faible composante actuelle. Ce qui est apparemment en contradiction avec les observations des niveaux piézométriques dont les fluctuations attestent l'existence d'une recharge saisonnière des nappes.

L'explication doit être recherchée dans les mécanismes d'alimentation et vraisemblablement du mode de gisement des nappes d'eaux souterraines.

On remarque que les fortes teneurs en tritium sont rencontrées dans les forages intensément exploités par pompage (Tioribougou 33 UT, Nossombougou 20 UT). Ce phénomène est constaté dans les autres régions des Plateaux mandingues : Kolokani - Marché 41 UT, Banamba 37 UT. On peut donc en déduire que l'exploitation favorise l'infiltration des eaux récentes, avec une augmentation du taux de renouvellement. Ce qui est l'indice de réserves relativement faibles, confirmant les études hydrogéologiques (aquifères discontinus).

On peut donc envisager que l'alimentation des nappes provient essentiellement de l'infiltration des eaux de précipitation à la faveur des fissures du substratum rocheux affleurant. Ces eaux après un parcours plus ou moins long dans les zones privilégiées de circulation (grandes fractures zone de contact avec les intrusions doléritiques) s'accumulent dans des réservoirs plus ou moins isolés.

La recharge se ferait suivant un déplacement par piston (piston flow), c'est-à-dire l'eau serait chaque année poussée vers le bas. Ce qui expliquerait les faibles variations saisonnières de la composition chimique des eaux et les réactions souvent rapides des niveaux piézométriques aux épisodes pluvieux malgré des profondeurs du niveau statique relativement profond (Tioribougou).

L'exploitation par pompage provoque des circulations dans la nappe qui sont faibles en régime naturel et favorise ainsi les mélanges. Ainsi à Massantola les teneurs en tritium sont passées de 1 UT en 1980 à 7 UT en 1984. Les apports d'eaux récentes sont dans ces conditions d'autant plus importants que l'aquifère exploité est en relation hydraulique avec la nappe superficielle sus-jacente (Tioribougou).

Mais comme le signale l'étude de l'A.I.E.A., la stratification des venues d'eau fait appel au fait qu'il faut s'assurer que les mélanges s'effectuent dans la nappe et non au niveau du captage.

7.3. CONCLUSION

Les données isotopiques mettent en évidence l'existence d'une recharge actuelle des aquifères fissurés et confirment leur caractère discontinu.

Les eaux de précipitation s'infiltrent à travers les fissures du substratum rocheux affleurant et cheminent plus ou moins profondément par des zones de circulation préférentielle (fracture, contact des dolérites). La recharge se ferait vraisemblablement par déplacement successif des eaux anciennes vers le bas. Ce mode d'alimentation pourrait expliquer la réponse rapide de certaines nappes aux épisodes pluvieux, la remontée des niveaux piézométriques n'étant pas dans ce cas due uniquement à un apport d'eau mais également à un transfert de charge au niveau des fractures.

CHAPITRE VIII

PIEZOMETRIE - RECHARGE - RESSOURCE EXPLOITABLE

8.1. PIEZOMETRIE GENERALE DE LA NAPPE

8.2. FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES

8.3. EVALUATION LOCALE DE LA RECHARGE : SITE DE TIORIBOUGOU

8.4. CONCLUSION

Chapitre VIII

PIEZOMETRIE - RECHARGE - RESSOURCE EXPLOITABLE

8.1. PIEZOMETRIE GENERALE DE LA NAPPE8.1.1. Surface piézométrique

Il est difficile de parler de "surface piézométrique" dans la nappe des formations infracambriennes des plateaux mandingues, pour différentes raisons :

- la nature discontinue ou au mieux semi-continue de l'aquifère rend hasardeuse l'extrapolation des niveaux piézométriques à l'échelle régionale et parfois même locale ;
- l'absence, de nivellement des points d'eau et de fond topographique à grande échelle (la seule coupure existant étant au 1/200 000ème), fait que le tracé des courbes hydroisohypses n'est pas précis.

Cependant la carte de la surface piézométrique, établie à partir des mesures des niveaux statiques après le forage, malgré son caractère schématique, permet de faire quelques constatations d'ordre général (fig. 57) :

- la nappe semble continue à l'échelle de la zone d'étude, puisqu'il est possible de tracer des courbes hydroisohypses entre les différents points de mesure ;
- l'écoulement général se fait vers le SW avec une baisse presque régulière des niveaux statiques. Le gradient hydraulique moyen dans cette direction, entre Tioribougou (423 m) et Siramanbougou (303 m) est de 2,5 % ;
- la morphologie de la nappe est dépendante de la topographie avec les zones hautes situées sous les collines et les plateaux, et les zones basses localisées dans les fonds de vallée. Ceci est en concordance avec les observations faites sur l'ensemble de l'aquifère infracambrien des plateaux mandingues (PNUD, 1982) ;
- les surfaces des plateaux gréseux au niveau de Tioribougou, et probablement celles des pointements doléritiques au sein de la série grésoschisteuse dans l'axe SW central, constituent des aires d'infiltration drainées par les vallées. Il est à noter le parallélisme entre les contours géologiques et les courbes hydroisohypses, ainsi que la superposition de l'anomalie, à l'Est de la zone, sur le tracé d'un grand linéament.

Signalons que la zone basse de la nappe correspond à une zone où on note en permanence la présence d'eau dans le cours du Dlaninn et de son principal affluent le Koblé, avec sur certains tronçons un faible écoulement en saison sèche, qui semble être lié à l'écoulement vers la surface des eaux souterraines.

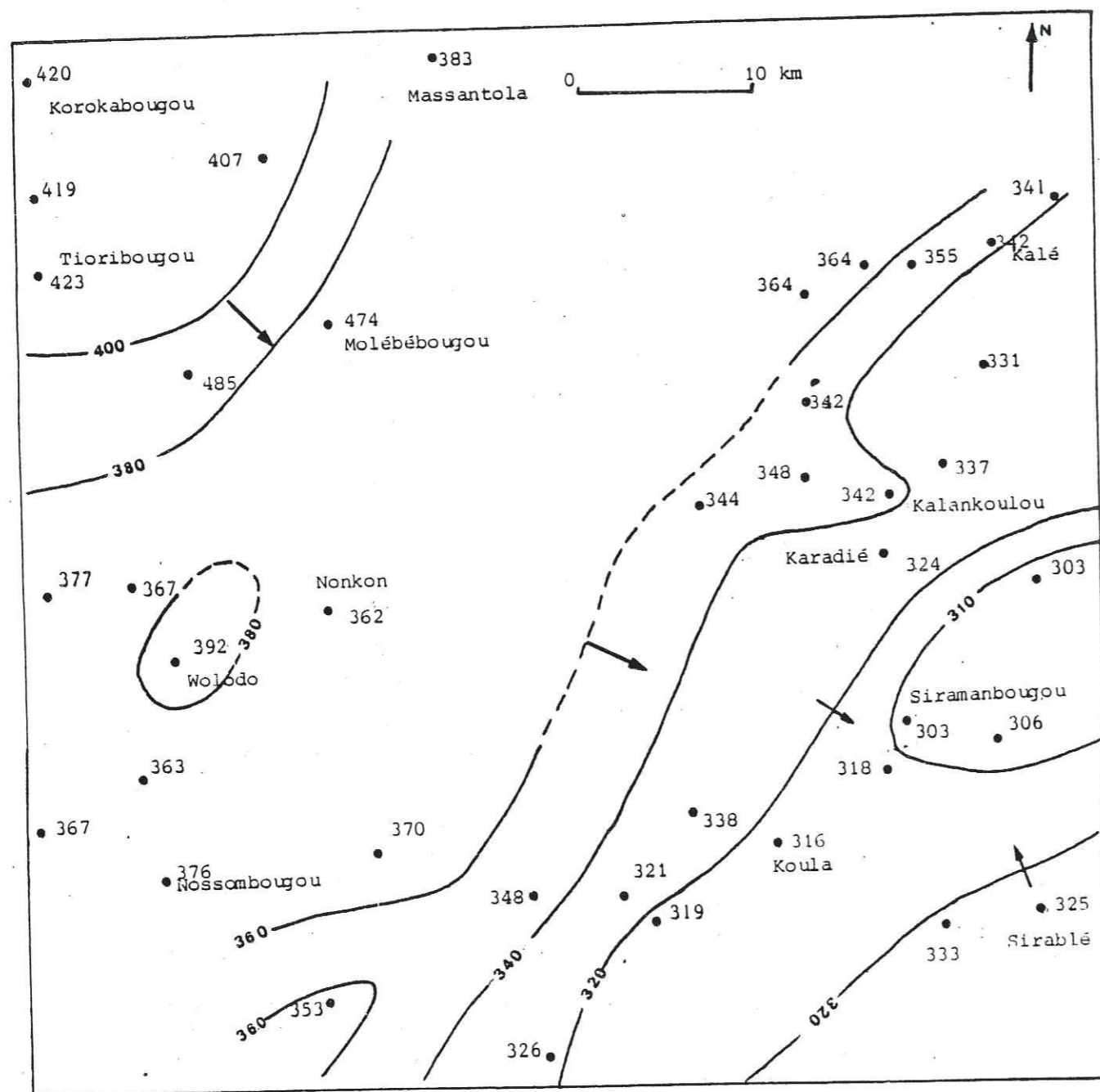


Fig. 57. CARTE PIEZOMETRIQUE

- 400 ——— Courbe hydroisohypse
 • Côte du niveau statique après forage
 → Sens d'écoulement général

8.1.2. Profondeur des niveaux statiques

Les niveaux statiques dans les forages de la zone étudiée sont compris entre 4 et 38 m de profondeur avec plus de 80 % des niveaux situés entre 10 et 25 m. Cette "homogénéité" des profondeurs des niveaux d'eau, malgré les grandes variations des positions topographiques des forages (320 à 440 m d'altitude), pourrait signifier l'absence de transferts latéraux à grande échelle mettant ainsi en évidence le caractère discontinu des aquifères. Cependant des transferts latéraux existent probablement comme nous l'avons noté avec l'allure de la surface piézométrique. En outre le caractère semi-captif à captif de la nappe avec parfois des phénomènes artésiens (N'Djila sur la bordure NW du secteur) confirme l'existence de ces transferts. Les circulations semblent se faire à plus ou moins grande profondeur, les eaux d'infiltration se mettent en charge sous les grands massifs doléritiques, avec une minéralisation importante (N'Golobougou, Warala).

8.2. FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES

La mise en place d'un réseau d'observation piézométrique à partir du mois d'octobre 1982 permet de suivre les fluctuations saisonnières des niveaux de la nappe.

Ce réseau comporte les forages non équipés de pompes ainsi que quelques puits villageois. Les mesures sont périodiques, en général mensuelles, ou continues avec des limnigraphes installés sur certains forages pour des études plus détaillées.

Les données pluviométriques sont fournies par quelques stations météorologiques situées à l'intérieur de la région ou sur la bordure.

Ces stations sont gérées soit par le Service de la Météorologie Nationale avec des séries d'observations longues (supérieures à 30 ans) et presque complètes, soit par des opérations de développement agricole (OACV, ODIPAS). En outre le projet PNUD a équipé certains sites hydrogéologiques de pluviographes à partir de 1983.

Les résultats des observations faites durant l'année hydrologique 1982-1983 sur l'ensemble de la région du projet PNUD ont fait l'objet de rapport interne (PNUD, 1983). Nous présentons ici les points essentiels concernant particulièrement notre zone d'étude que nous complétons.

8.2.1. Pluviométrie

Avant d'aborder le comportement piézométrique des nappes au cours de la période considérée, il nous paraît intéressant d'étudier la pluviométrie de 1983 dans la zone.

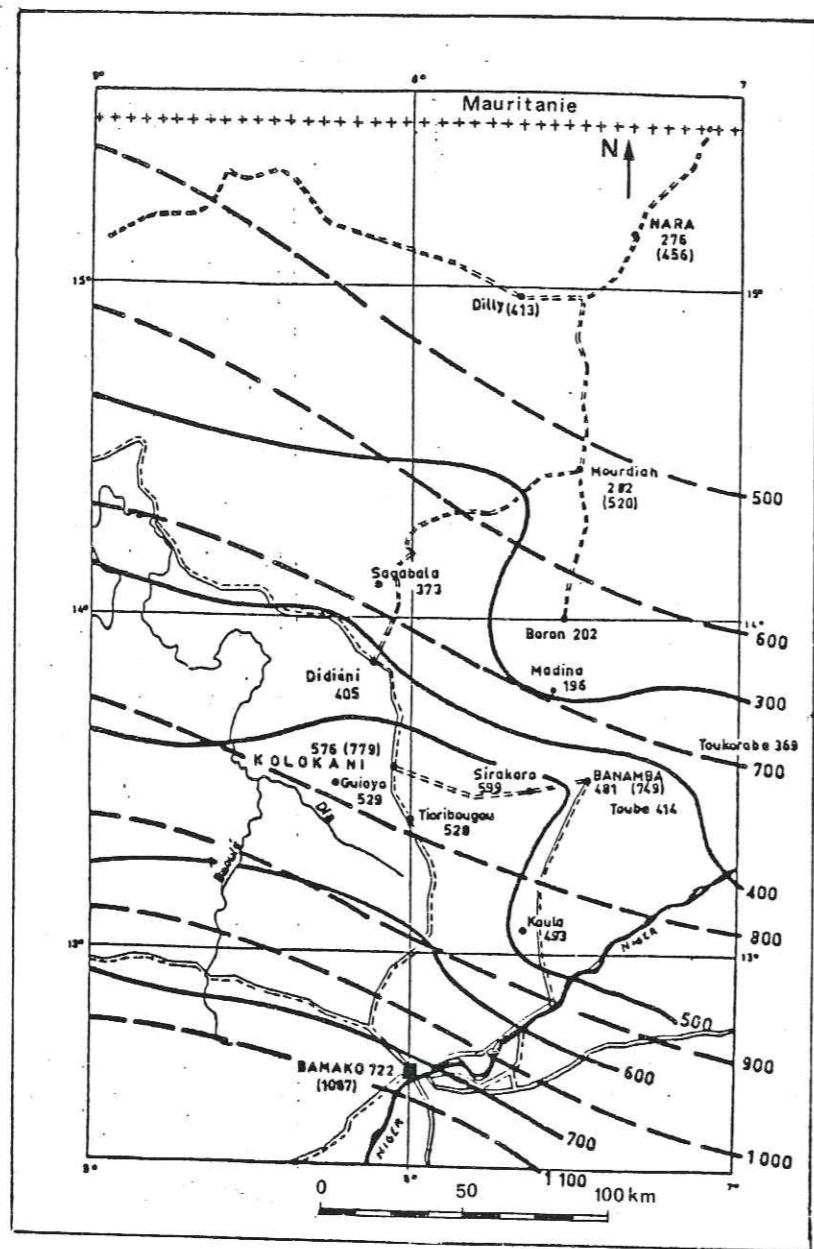


Fig. 58 - CARTE PLUVIOMETRIQUE

- Station pluviométrique
- 282 Pluviométrie en 1983 (mm)
- (520) Pluviométrie année moyenne (mm)
- Isohyète 1983
- - - Isohyète année moyenne

L'hivernage 1983 a commencé à la mi-mai et s'est achevé en fin septembre, début octobre suivant les secteurs. Tableau

Stations	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep-tembre	Octobre	Total	Pluio-métrie année moyenne
Bamako (1)	11,7	46,5	114,3	107,9	265,1	175,7	1,1	722,3	1049*
Banamba (2)	-	19,1	78,5	125,1	147,3	106,8	4,6	481,2	743*
Kolokani (1)	13,3	11,5	81,5	119,4	170,2	150,6	2,5	549	794*
Koula (2)	-	12	132,7	96,5	140,8	110,9	0	492,8	-
Tioribougou (3)	-	(27)	91	88,1	205,3	105	11,9	528,3	-

Tableau 7 - Pluviométrie au cours de l'année 1983 dans quelques stations météorologiques des Plateaux mandingues. Sources des données : (1) - Direction Nationale de la Météorologie (2) OACD (3) PNUD

* Série 1940-1983
** Série 1960-1980

On note que l'année 1983 a été très déficitaire par rapport à la pluviométrie moyenne sur de longues périodes.

La carte pluviométrique (fig. 58) met en évidence ce déficit.

L'ajustement à la loi de Gauss de la pluviométrie annuelle, aux stations de Kolokani et de Bamako (fig. 59) montre que la pluie de 1983 a une période de retour théorique de 13 et 25 ans respectivement. La pluie en année décennale sèche déterminée avec un intervalle de confiance de 95 % est de :

$$505 < \text{Po. } 9 = 574 < 642 \text{ à Kolokani}$$

$$736 < \text{Po. } 9 = 810 < 875 \text{ à Bamako.}$$

Ces valeurs ont été atteintes 10 fois à Kolokani et 9 fois à Bamako durant la période d'observation 1940-1983. On note que ces années sèches se sont succédées à partir de 1970 et correspondent à la période de la sécheresse qui sévit actuellement sur l'ensemble de la région sahélienne. Cette rupture de 1970 apparaît nettement sur les moyennes mobiles sur 5 ans aux différentes stations (fig. 61).

L'année 1983 se caractérise aussi par une distribution anormale des pluies mensuelles durant l'hivernage, avec des pluies plus importantes en début d'hivernage et plus faibles au milieu par rapport à l'année moyenne (fig. 62).

Toutes ces observations nous montrent que les conditions, pour une recharge des nappes, sont particulièrement défavorables : faible pluviométrie se situant dans une période d'années déficitaires et surtout faibles précipitations en milieu de saison pluvieuse qui constituent les apports essentiels comme nous l'avons vu avec les études isotopiques.

Fig. 59 - Ajustement à la loi de Gauss des pluies annuelles à Bamako (1940-1983)

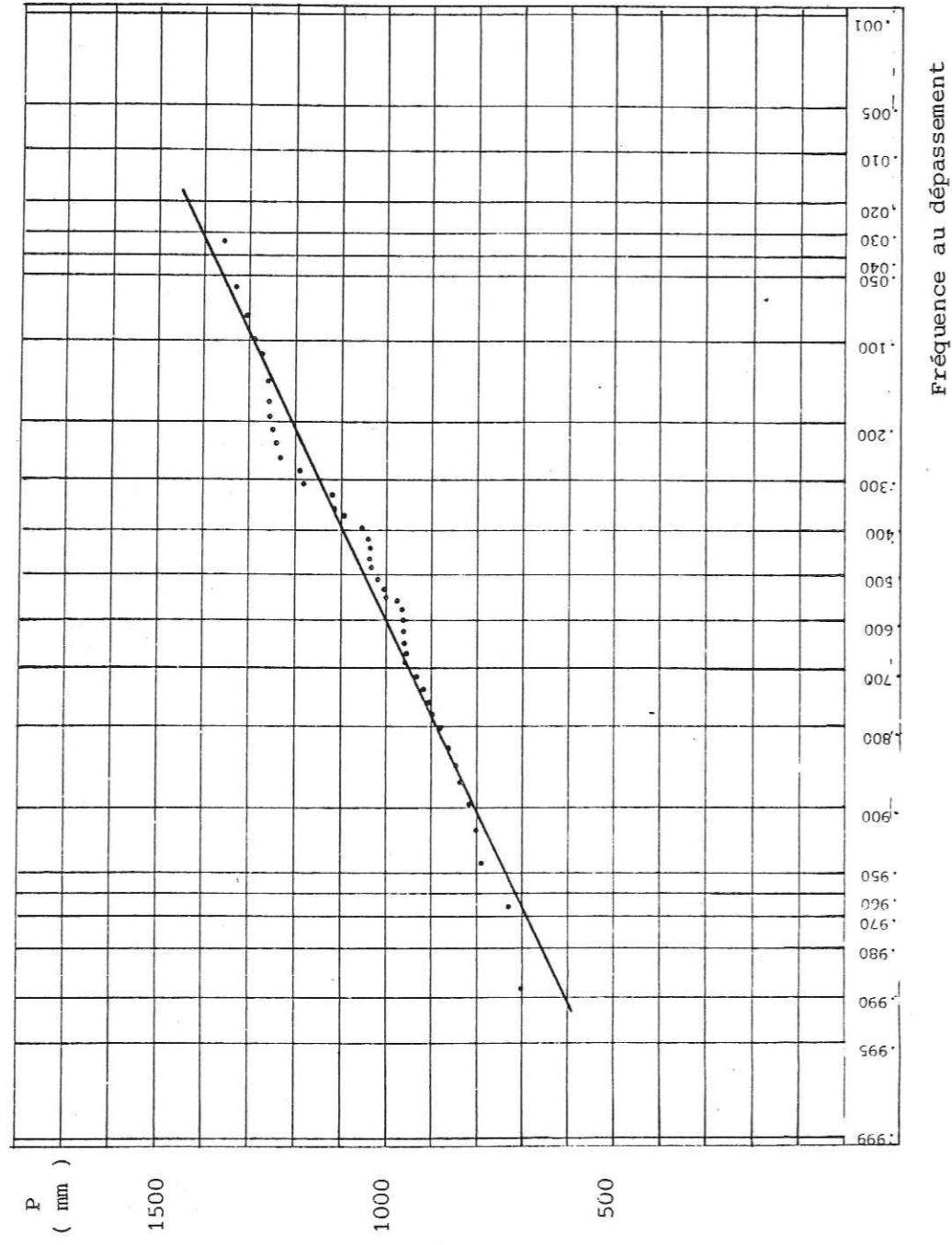


Fig. 60 - Ajustement à la loi de Gauss des pluies annuelles à Kolokani (1940-1983)

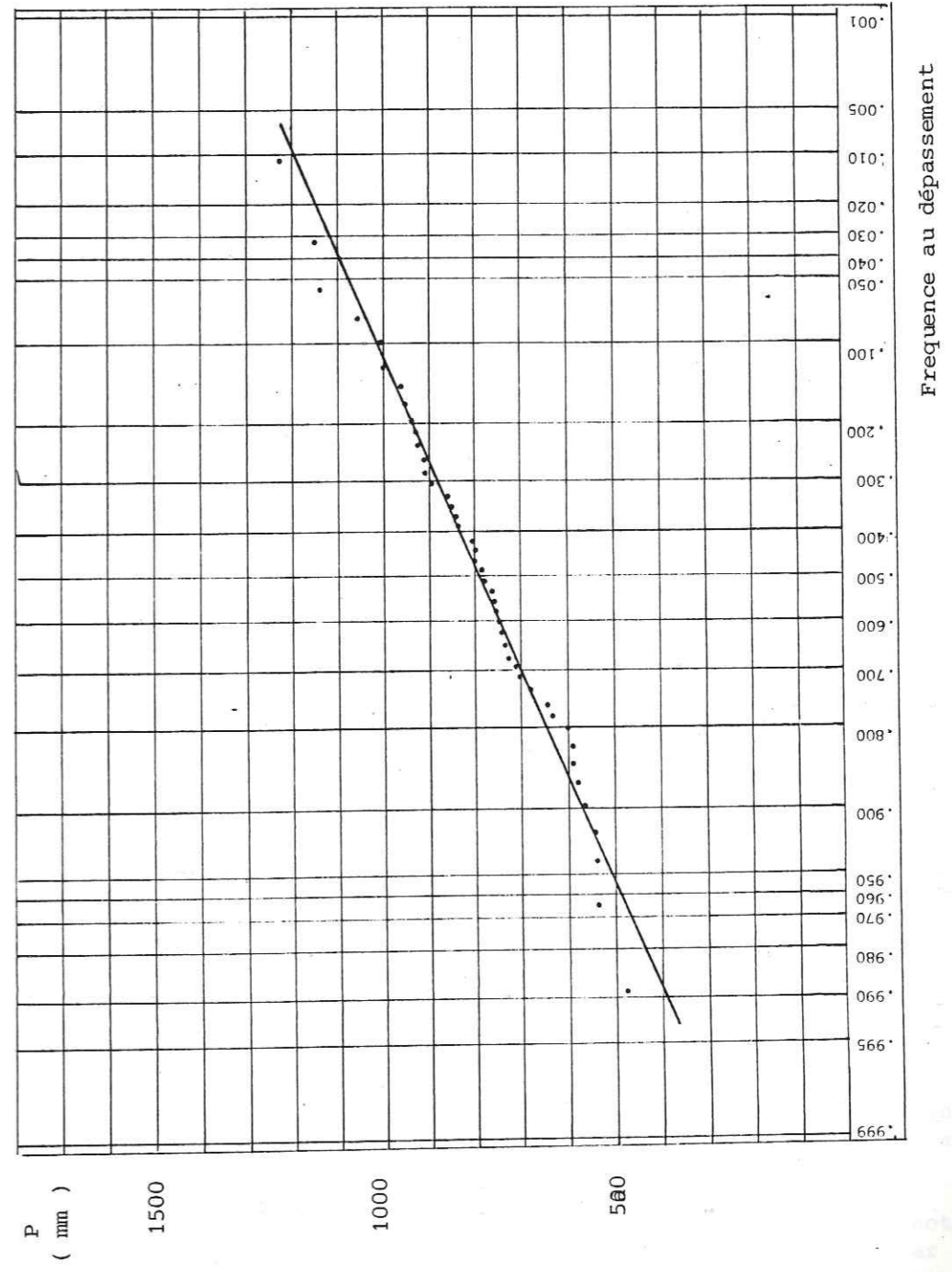


Fig. 61 - Moyenne mobile sur 5 ans (Stations de Bamako, Banamba, Kolokani)

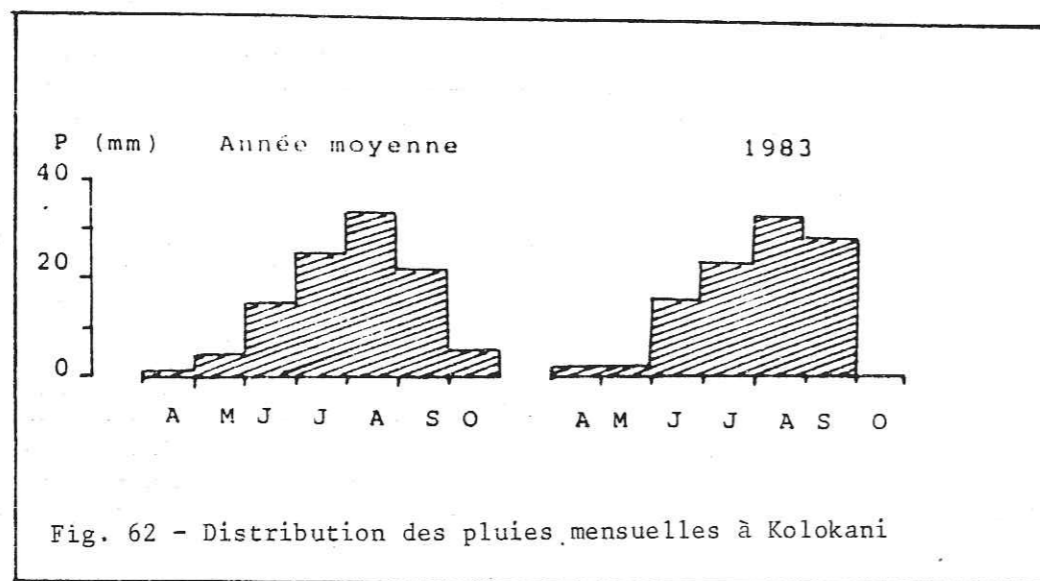
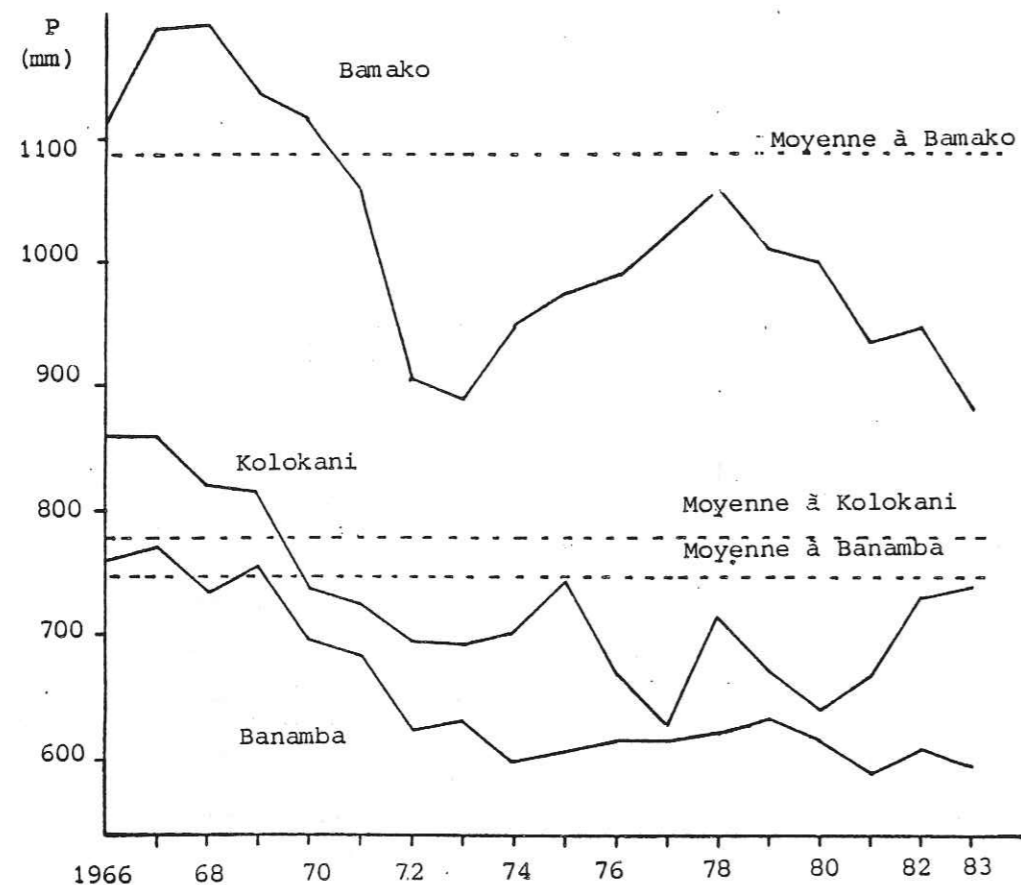


Fig. 62 - Distribution des pluies mensuelles à Kolokani

8.2.2. Fluctuations piézométriques

Tout comme le régime climatique, le régime des nappes de la région est contrasté avec des périodes de tarissement et de recharge bien marquées. Ces périodes coïncident avec celles des différentes saisons sèches et humides, avec un léger décalage en début d'hivernage dû à la compensation du déficit d'humidité du sol en fin de saison sèche.

Cependant les pluies du début de l'hivernage peuvent localement provoquer une remontée du niveau aussi bien dans la nappe superficielle que profonde.

Ainsi à Tioribougou 25 à 30 mm de pluie entre le 3 et le 5 mai 1983 ont provoqué une remontée de 10 à 20 cm de la nappe superficielle et de 6 cm dans la nappe du substratum fissuré. En raison de la profondeur de la surface piézométrique (20 m en moyenne) il est peu vraisemblable que les infiltrations par la surface du recouvrement argilo-sableux aient suffi à combler le déficit d'humidité du sol. Par contre il est probable que les eaux infiltrées par les fissures de la cuirasse latéritique soient parvenues à la nappe par la base du profil latéritique et la frange altérée du substratum beaucoup plus perméable.

Au cours de l'année 1983 la remontée générale du niveau des nappes a commencé entre la mi-juin et début juillet c'est-à-dire avec les premières pluies importantes de l'hivernage (figures 63 à 65).

Le niveau maximum a été atteint en fin août et la décharge a débuté en fin octobre début novembre.

La comparaison des enregistrements du limnigraphe et du pluviographe à Tioribougou montre que les fluctuations de niveau de la nappe sont directement liées aux épisodes pluvieux.

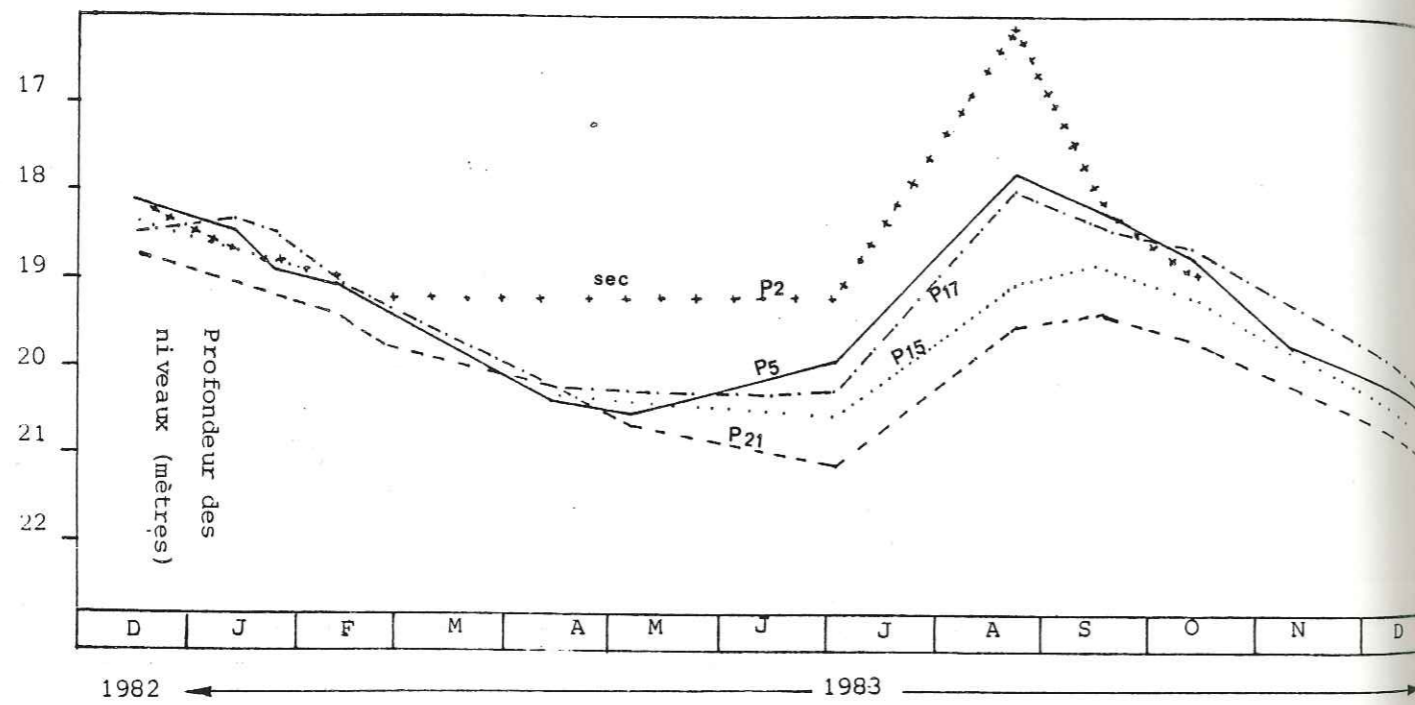
Dans la zone tous les piézomètres ont enregistré une remontée de niveau au cours de l'hivernage 1983 comprise entre 1 mètre à Massantola et 2 mètres à Tioribougou. Cependant cette remontée a été inférieure à la baisse de niveau au cours de la saison sèche 1982-1983.

La remontée de la nappe superficielle a été plus importante, mais très variable suivant les conditions hydrogéologiques et surtout géomorphologiques. A Tioribougou où elle est en communication avec la nappe de fissure sous-jacente la remontée est de 3 m environ, amortie par les transferts verticaux, à Nossombougou par contre la remontée atteint 4 à 7 mètres.

8.2.3. Conclusions

Les fluctuations des niveaux piézométriques montrent l'existence d'une recharge saisonnière, par ailleurs confirmée par les études isotopiques. Cette recharge se produit même dans des conditions pluviométriques défavorables (Année pluviométrique 1983).

L'observation de certains piézomètres situés plus au Nord que notre zone d'étude (Nara) permet de situer le seuil minimum pour la recharge par infiltration directe dans la tranche pluviométrique 200 - 300 mm. Cette limite est différente de celle proposée pour nos régions par ARCHAMBAULT et LEMOINE (1966) qui est de 400 mm. SAVADOGO (1984) mettait déjà en doute la validité de cette limite pour le Nord de la Haute Volta (Burkina - Faso).



Fig; 63 - Fluctuation piézométrique (puits) -TIORIBOUGOU

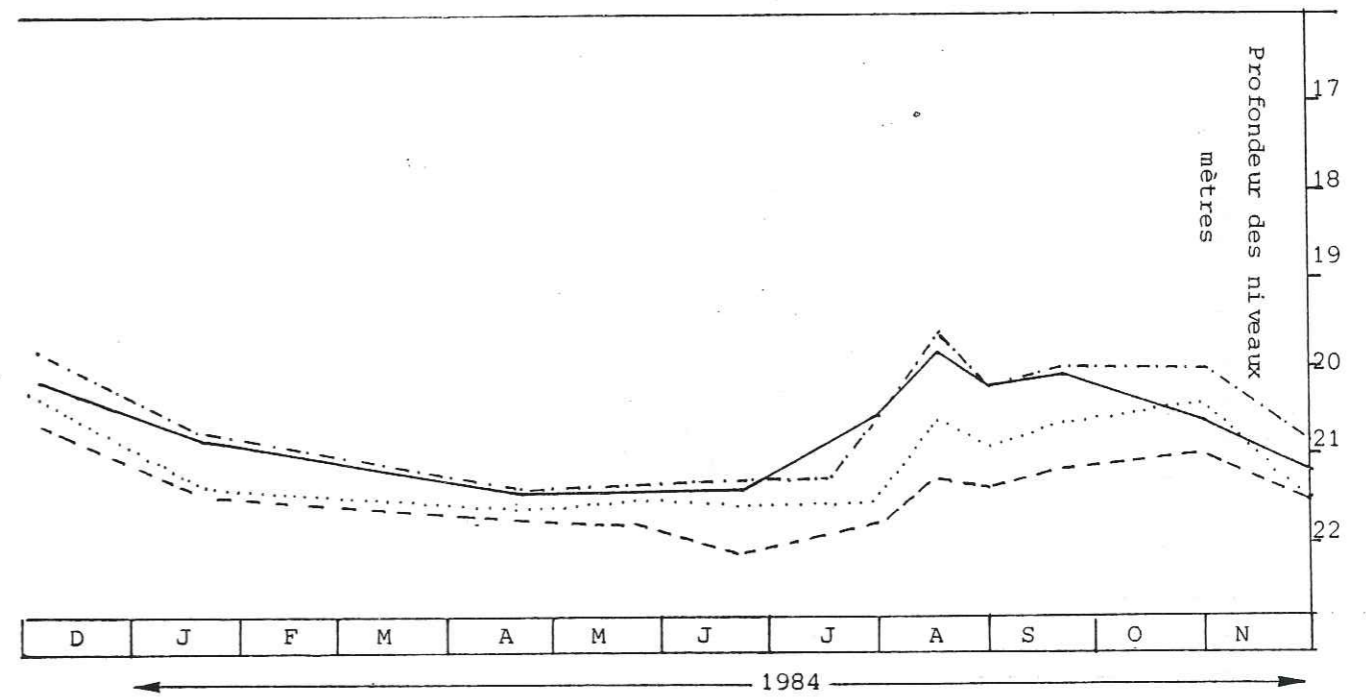
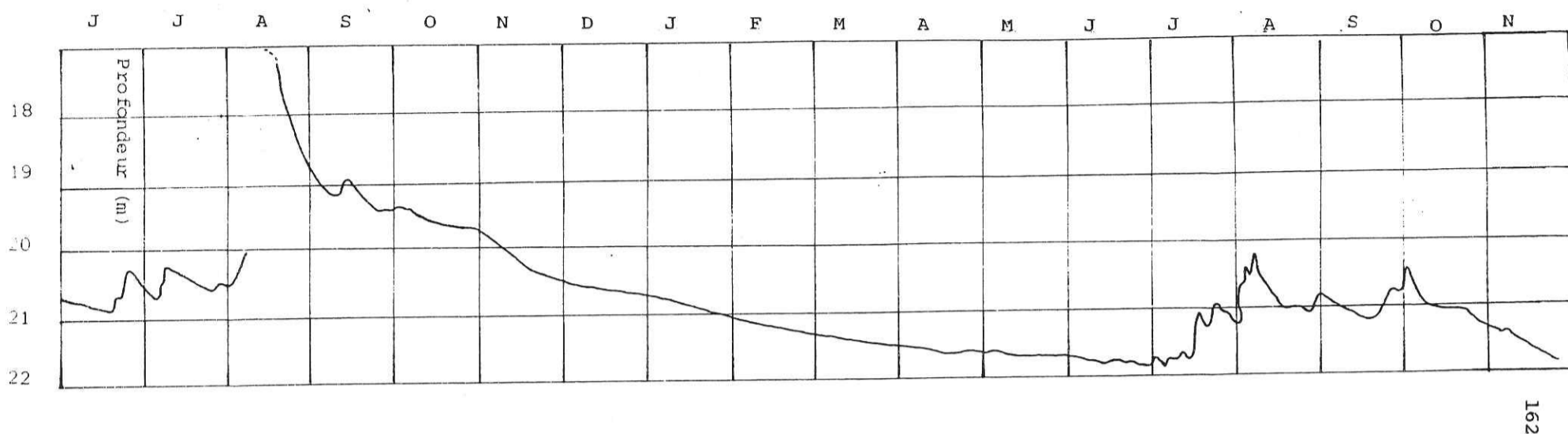
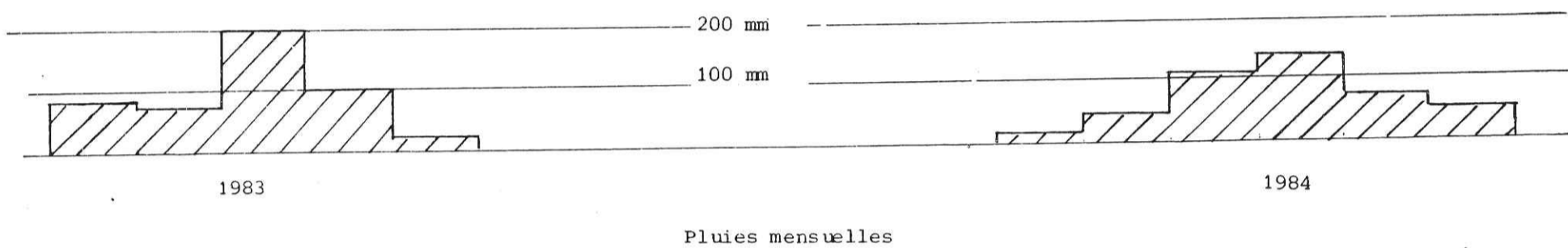


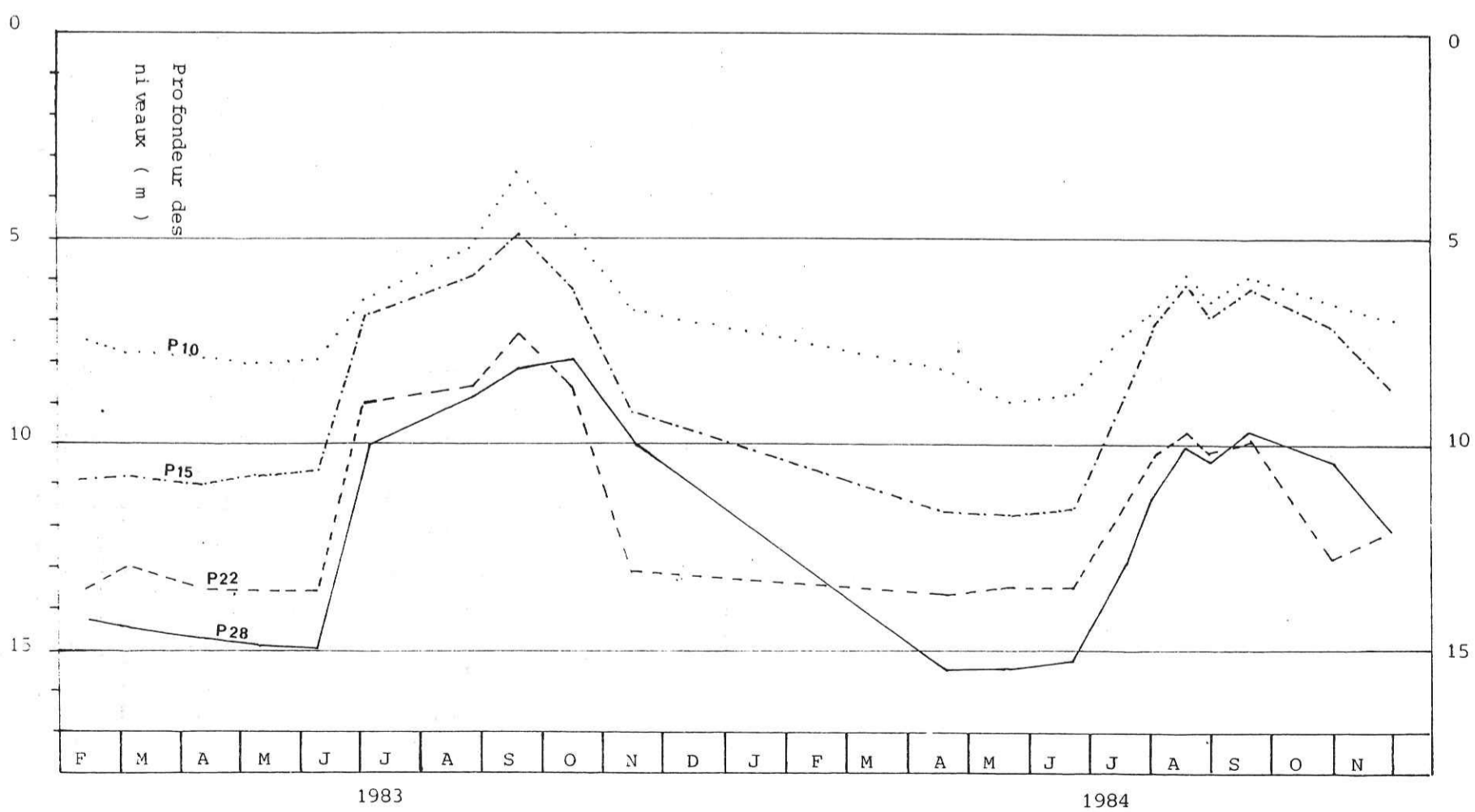
Fig. 64 - Fluctuation piézométrique (limnigramme F5bis) - TIORIBOUGOU



162



Pluies mensuelles



163

Fig. 65 - Fuctuation piézométrique (puits) - NOSSOMBOUGOU

8.3. EVALUATION LOCALE DE LA RECHARGE : SITE DE TIORIBOUGOU

8.3.1. Introduction

L'existence d'une recharge saisonnière nous amène à poser la question de l'évaluation du volume des apports pour une bonne gestion des ressources en eaux souterraines. Et cela d'autant plus que nous nous trouvons dans une période défavorable en ce qui concerne les précipitations qui constituent le facteur prépondérant de la recharge des nappes.

La diversité des conditions hydrogéologiques fait que l'établissement d'un bilan régional par l'évaluation des principaux termes : précipitation, évapotranspiration, infiltration et ruissellement, serait sans grand intérêt. C'est ce qui explique le choix d'études ponctuelles sur quelques sites représentatifs des différentes conditions géomorphologiques et hydrogéologiques.

Trois sites sont choisis dans notre zone d'étude : Tioribougou, Nossombougou et Karadié.

Les études sur les 2 derniers sites sont à leur début ; celles du site de Tioribougou ont commencé en décembre 1982.

La faible minéralisation des eaux souterraines à Tioribougou ainsi que les études hydrogéologiques laissent supposer que l'alimentation se fait par la surface par infiltration directe. Ainsi la première partie de l'étude a-t-elle porté sur la détermination d'un coefficient d'emménagement moyen de la partie supérieure de la nappe et cela au cours de la phase de tarissement.

L'observation des niveaux piézométriques et du régime des précipitations au cours de l'hivernage a permis par la suite d'étudier les relations pluies-niveau de la nappe et d'évaluer certains paramètres : coefficient d'infiltration lié à des épisodes pluvieux, coefficient d'infiltration moyen de la saison pluvieuse, lame d'eau infiltrée. Les valeurs ainsi obtenues sont confrontées aux résultats du bilan de l'eau.

Cette étude a déjà fait l'objet de rapports internes du projet PNUD (1983, 1984) ; nous présentons ici les points essentiels.

8.3.2. Présentation du site de Tioribougou

Le village se trouve à l'extrémité NW de notre zone d'étude, installé dans une petite dépression peu marquée à la surface des plateaux latéritisés.

Il repose sur des formations limono-sableuses. Le substratum rocheux qui n'affleure pas à proximité immédiate du village est connu grâce à 7 forages ainsi qu'à la prospection géophysique. Il est constitué d'un trentaine de mètres de grès fins à moyens lités, avec des passages de grès grossiers et de grès quartziques. Ces formations reposent sur une série plus fine où prédominent des grès fins micacés avec des intercalations de schistes gréseux. Au contact du recouvrement, les grès sont altérés et fissurés sur plusieurs mètres devenant friables et poreux.

Deux réseaux de fractures sont visibles sur les photographies aériennes, l'un de direction SW-NE est injecté d'un dyke subvertical de dolérite avec des extensions latérales sous forme de sills, l'autre est orienté E.W. (fig. 66).

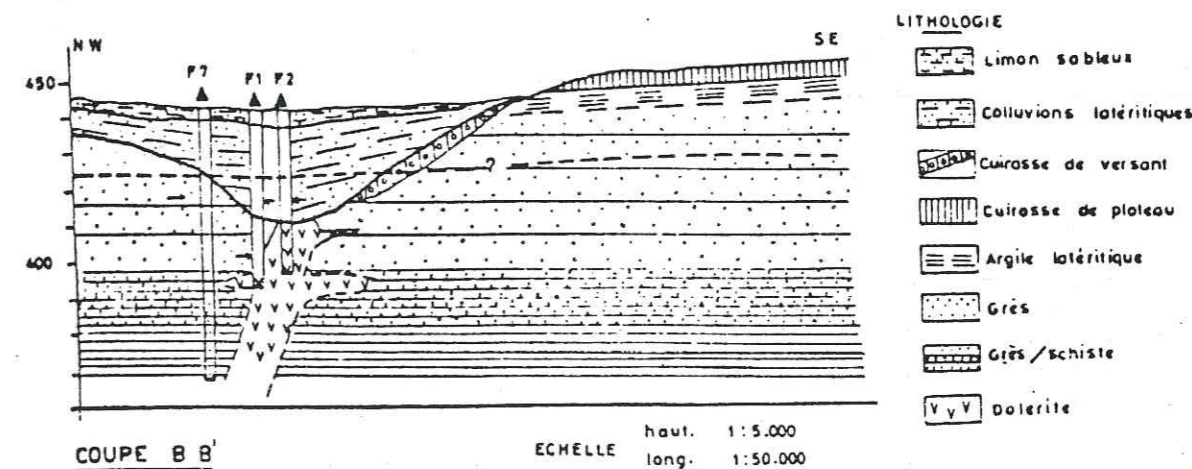
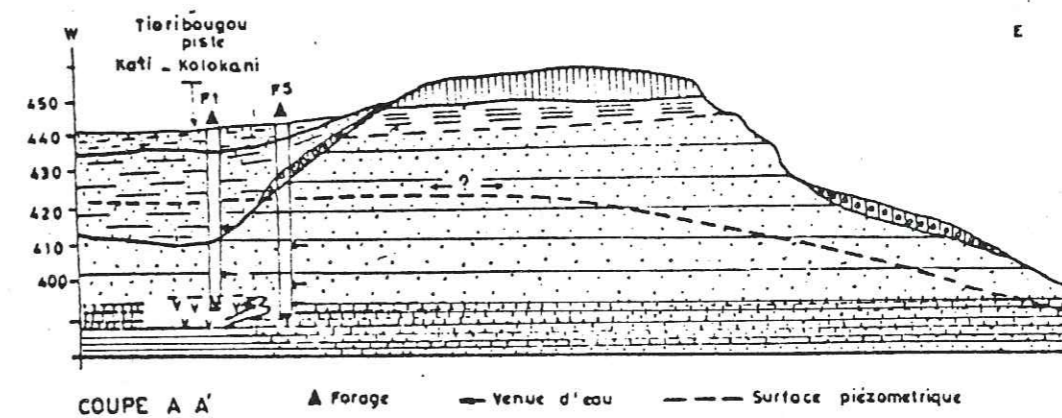
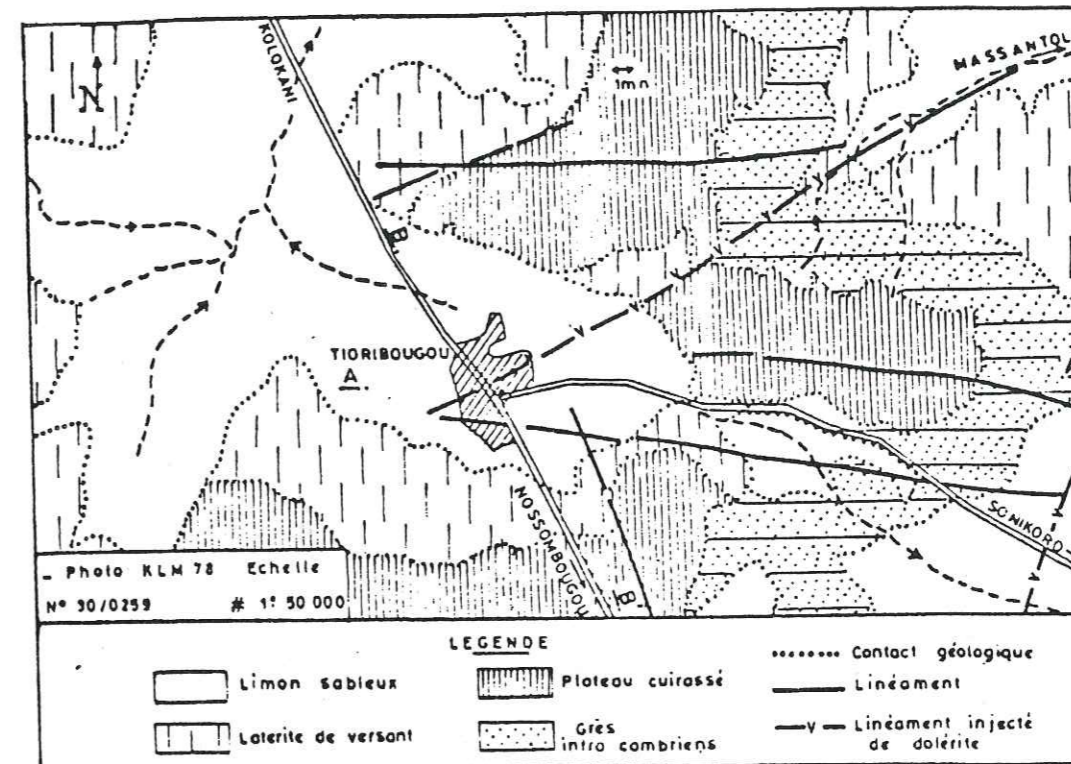
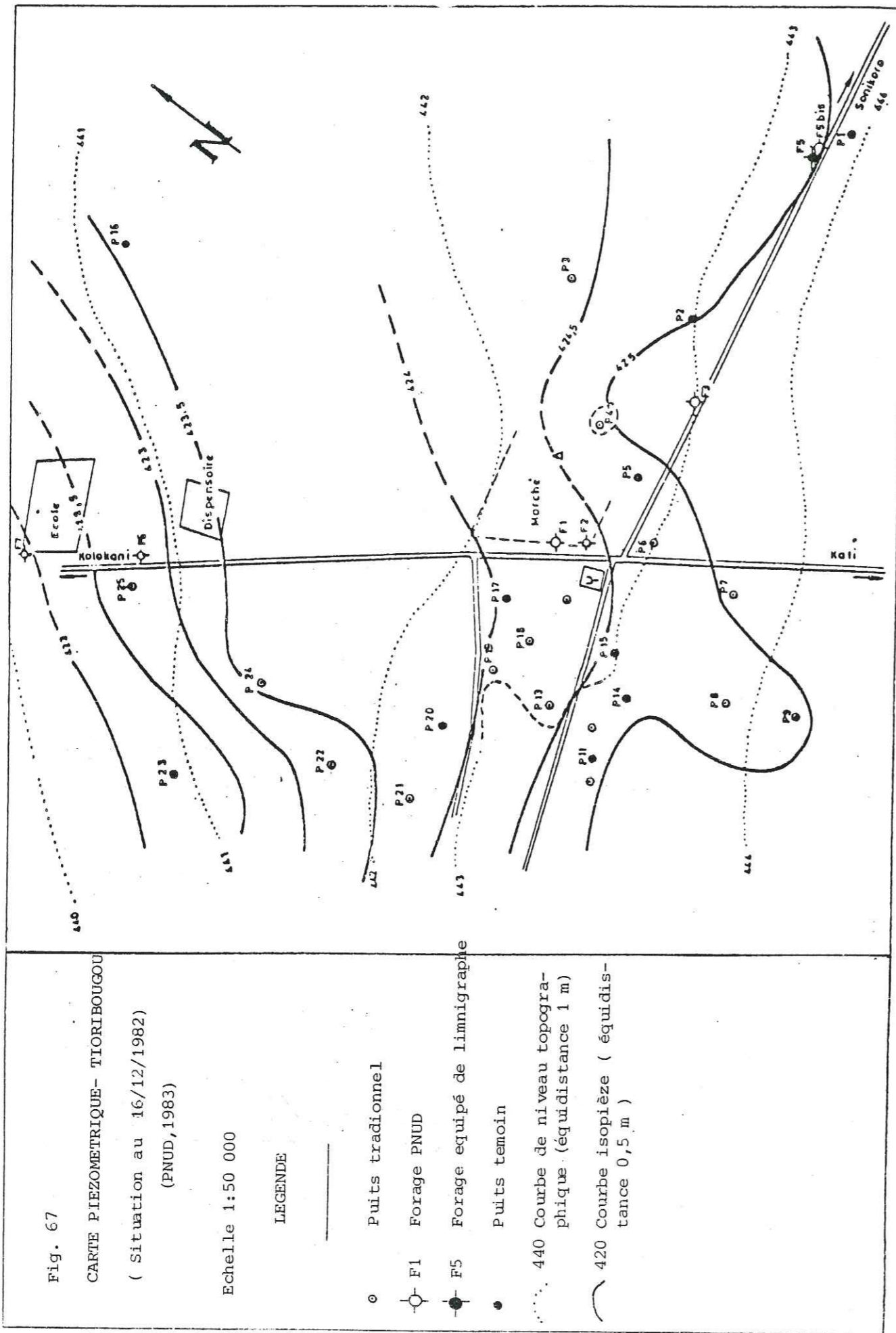


FIG. 66 - CARTE GEOLOGIQUE ET COUPES HYDROGEOLOGIQUES SCHEMATIQUES A TIORIBOUGOU (PNUD, 1983)



Du point de vue hydrogéologique, les eaux souterraines sont contenues dans un système aquifère bicouche, avec une nappe superficielle à surface libre dans les formations de recouvrement et la frange altérée du substratum, et une nappe profonde semi-captive dans le substratum fissuré. Ces 2 nappes sont en liaison hydraulique comme le montre la carte piézométrique (fig. 67). Cette liaison hydraulique est confirmée par l'apparition de phénomène de drainage au cours du pompage d'essai sur le forage F5.

Les valeurs de la transmissivité déterminées au cours de cet essai sont identiques pour le forage et les différents piézomètres (F5 bis, F3) soit $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Par contre les coefficients d'emmagasinement sont différents : $7 \cdot 10^{-3}$ au piézomètre F5 bis et $5 \cdot 10^{-5}$ au piézomètre F3. Cette différence, comme nous l'avons déjà signalé (Chapitre IV), serait liée au degré de liaison hydraulique entre nappe superficielle et la nappe sous-jacente.

8.3.3. Etude de la recharge au cours de l'hivernage 1983

8.3.3.1. Coefficient d'emmagasinement

Le premier problème posé pour l'estimation de la recharge est la connaissance du coefficient d'emmagasinement de la nappe superficielle qui constitue le premier réservoir souterrain accumulant les eaux d'infiltration.

Pour cela on a observé, pendant 2 mois et demie environ (4 janvier au 11 mars) c'est-à-dire durant la phase de tarissement, l'effet transitoire sur la surface piézométrique d'un pompage cyclique au forage F5 ; grâce à un réseau de puits témoins et du limnigraphe installé sur le forage F5 bis. Ainsi pour un volume total des prélèvements pendant la période d'observation de 5150 m^3 , on a un rabattement* de 0,32 m au forage F5 et un rayon d'action d'environ 600 m (fig. 68).

En assimilant le cône de déjection à un cône régulier centré sur le forage F5 on peut calculer le volume total de "terrain denoyé". Par comparaison avec le volume des prélèvements on obtient un coefficient d'emmagasinement d'environ 4,3 %.

Malgré les imprécisions sur la détermination du rayon d'influence (tous les puits témoins sont en effet dans le secteur aval de la nappe), et les hypothèses simplificatrices retenues pour ce calcul**, ce coefficient d'emmagasinement paraît représentatif pour la nappe superficielle du moins au niveau du forage F5.

Nous retiendrons pour les calculs ultérieurs une valeur de 4,5 % pour le coefficient d'emmagasinement.

* Le rabattement observé sur le limnigramme a été corrigé de la baisse naturelle de la nappe. Cette baisse est presque linéaire pour la période considérée comme le montrent les puits non influencés P17 et P20. Elle est de l'ordre de 40 cm/mois dans la nappe superficielle et de 35 cm/mois dans la nappe profonde.

** La forme du cône de dépression autour du forage n'est probablement pas simple en raison de la drainage liée à la communication hydraulique entre la nappe superficielle et la nappe profonde.

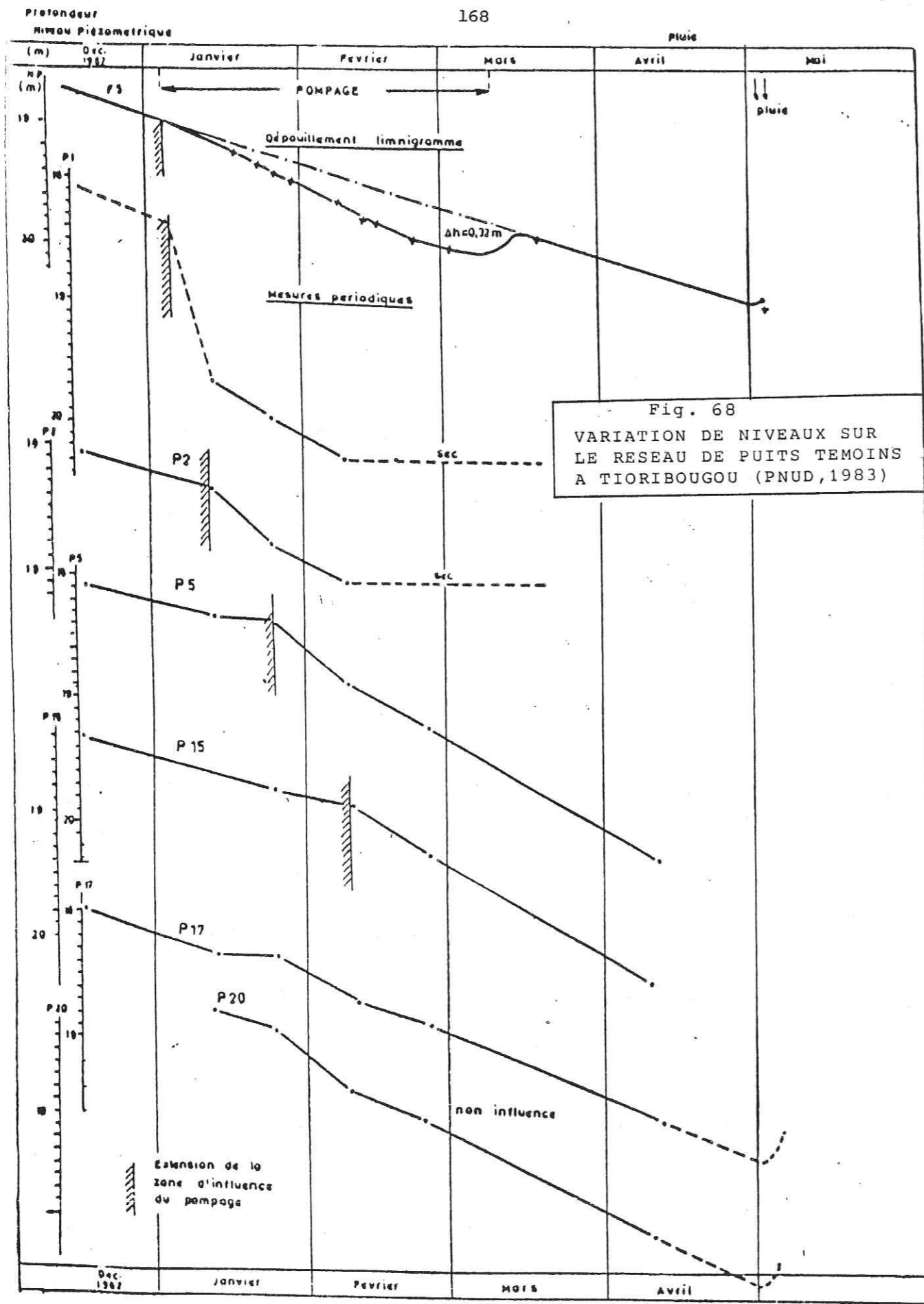


Fig. 68
VARIATION DE NIVEAUX SUR
LE RESEAU DE PUISX TEMOINS
A TIORIBOUGOU (PNUD, 1983)

8.3.3.2. Analyse de la recharge

8.3.3.2.1. Pluviométrie de 1983 à Tioribougou

Elle est connue grâce aux enregistrements du pluviographe installé à proximité du forage F₅. Les précipitations totales en 1983 ont été de 528 mm. Les premières pluies importantes de l'hivernage ont été enregistrées le 18 juin et les dernières le 5 octobre. La distribution mensuelle des pluies marque un maximum en août (205 mm). Les pluies des mois de juin, juillet et septembre sont presque équivalentes entre 88 et 105 mm.

Par comparaison avec la station de Kolokani, la pluie de 1983 représente environ 60 % de la pluviométrie moyenne. Nous nous trouvons donc dans un contexte pluviométrique défavorable pour la recharge des nappes.

Cependant si l'on considère les averses au-dessus d'un seuil pluviométrique minimum pouvant entraîner une infiltration (10 mm dans notre cas sur la base du dépouillement des limnigramme et pluviogramme), on note qu'une part importante des précipitations peut être considérée comme "utile" : 431 mm soit 80 % de la pluviométrie totale (Tableau 8).

Mois	Mai	Juin	Juil- let	Août	Sept.	Oct.	Total
Précipitation (mm)	(27)	91	88,1	205,3	105	11,9	528,3
Précipitations 10 mm	(17)	72	49,4	189,4	91,3	11,9	431

Tableau 8 - Distribution mensuelle des pluies en 1983 à Tioribougou.

Les averses supérieures à 10 mm sont généralement associées à des séquences de plusieurs jours pluvieux successifs.

L'intensité moyenne des pluies durant une averse varie entre 1 mm/h et 76 mm/h.

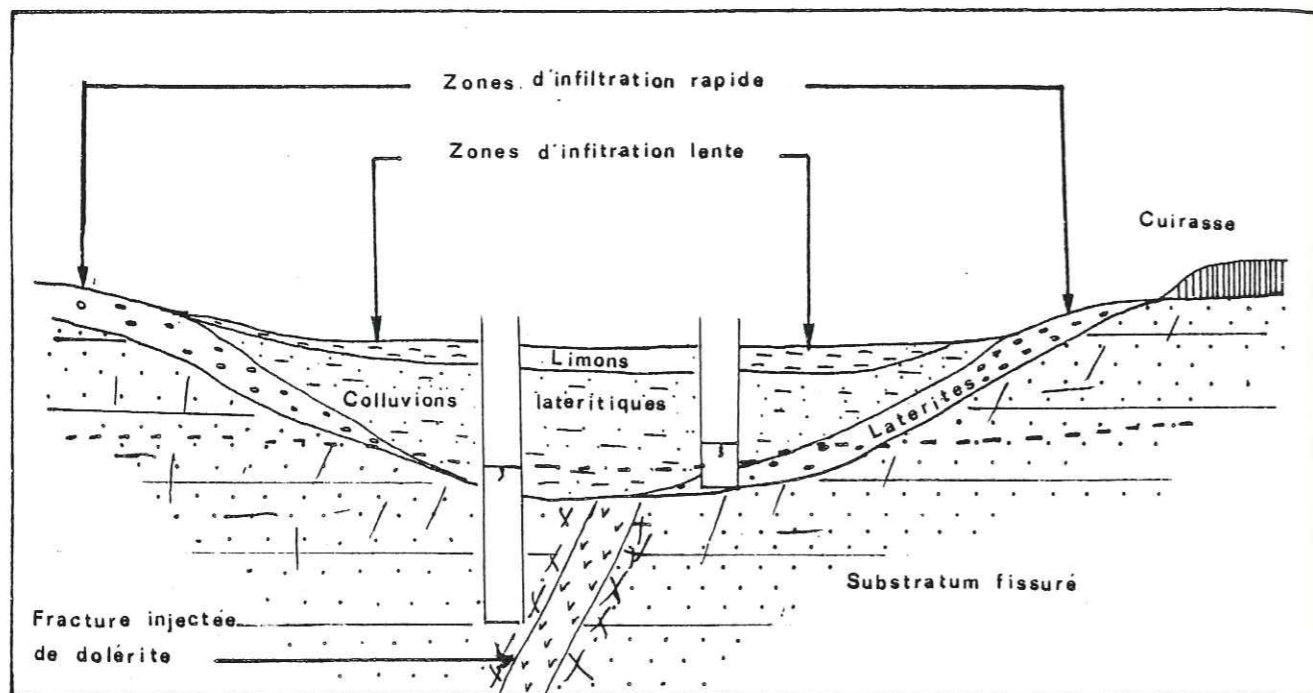


Fig. 70 - Schéma de l'infiltration à Tioribougou

une infiltration lente dont les eaux transitent par les alluvions argilo-sableuses (fig. 70).

Il est difficile de faire la part des deux infiltrations, mais il semble que l'infiltration rapide soit prépondérante en début d'hivernage au moment où le niveau de la nappe superficielle se situe dans la frange altérée du substratum. Ce qui expliquerait la réaction de la nappe aux pluies de fin de saison sèche.

Dans tous les cas, ces infiltrations provoquent une mise en charge de la nappe du substratum à perméabilité essentiellement de type fissural.

- le limnigraphe a réagi à toutes les hauteurs de pluies supérieures à 10 mm, alors que les précipitations inférieures ou égales à 10 mm n'ont pas eu d'effet sur les niveaux. On peut donc considérer cette valeur comme la réserve en eau facilement utilisable (RFU) du sol pour l'établissement du bilan journalier,

Coefficient d'infiltration ponctuel

L'allure des courbes du limnigramme fait que l'on a considéré que les transferts verticaux vers la nappe profonde se produisaient au cours de la décharge ; ainsi la variation "réelle" du niveau de la nappe est déterminée par différence entre les niveaux obtenus en prolongeant les courbes de tarissement avant et à la fin de la crue pour le temps correspondant à la pointe.

Ce mode d'évaluation des variations de niveau de la nappe est plutôt pessimiste, le rapport entre la hauteur enregistrée sur le limnigramme et celle ainsi déterminée pouvant être de 2.

En appliquant cette méthode aux cinq épisodes pluvieux de la première moitié de l'hivernage pour lesquels les données sont suffisantes, on a les résultats suivants (tableau ci-dessous).

Episode	Date de la séquence pluvieuse	P Variation de mm niveau de la nappe cm)		Infiltration (mm)	Coefficient d'infiltration (mm)	
		(1)	(2)			
I	18/06 - 20/06	50	22	10	4,5	9
II	22/06	22	36	18	8,1	37
III	04/07 - 05/07	223	14	8	3,6	16
IV	07/07 - 08/07	349	58	36	16,2	46
V	29/07 - 25/08	203A				

Tableau : Coefficients d'infiltration ponctuelle de quelques épisodes pluvieux au cours de l'hivernage 1983 à Tioribougou (PNUD, 1984, simplifié)

- (1) Variation de niveau enregistrée sur le limnigramme
 (2) Variation de niveau déterminée par les couches de tarissements.

La lame d'eau infiltrée est calculée sur la base d'un coefficient d'emménagement de 4,5 %. Elle est généralement faible pour les pluies du début de l'hivernage (inférieure à 10 mm).

Les coefficients d'infiltration ponctuelle sont compris entre 9 % et 46 %. Il est intéressant de noter que les épisodes II et III avec les mêmes hauteurs de pluie (22 mm) présentent des coefficients d'infiltration très différents : respectivement 37 % et 16 %. La pluie du 22 juin survient 2 jours après une séquence pluvieuse donc à un moment où la réserve en eau du sol n'est pas totalement nulle, tandis que celle du 4 juillet est consécutive à une période de 12 jours sans pluie. Ce qui confirme le rôle majeur joué par l'état de saturation du sol avant les pluies, dans les phénomènes d'infiltration.

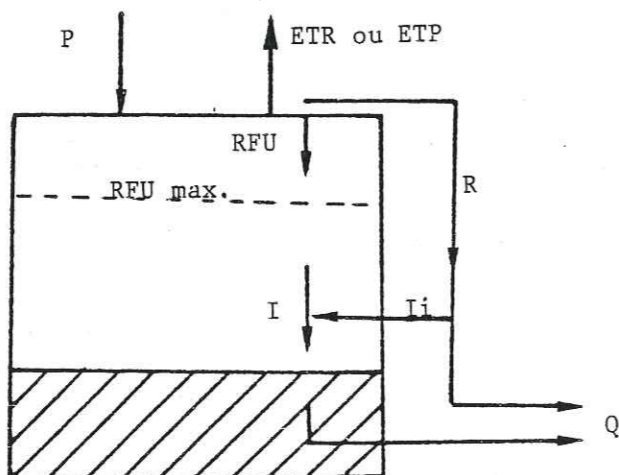
Coefficient d'infiltration moyen

La variation totale du niveau de la nappe durant l'hivernage 1983 est obtenue comme précédemment par extrapolation graphique des phases de tarissement pour la date de la pointe du maximum de variation enregistrée (20 août). Ce qui donne une remontée de + 2,3 m, à laquelle il faut ajouter la variation de niveau due aux pompages durant la période du 15 juin au 20 août qui est de 0,14 m. La remontée totale de la nappe pendant l'hivernage serait donc de 2,44 m ce qui correspond à une lame d'eau infiltrée de 110 mm. Le coefficient d'infiltration moyen calculé sur l'ensemble des pluies serait

$$I = \frac{110}{528} \times 100 = 20,8 \%$$

8.3.3.2.3. Evaluation de l'infiltration par la méthode du bilan d'eau du sol.

Il s'agit de la méthode classique de Thornthwaite qui consiste à prendre en compte, dans l'établissement du bilan d'eau, l'état d'humidité du sol. Le sol est poreux et peut contenir une réserve facilement utilisable R.F.U., dont l'eau peut être reprise par l'évaporation. Le bilan simplifié peut être représenté par le schéma suivant :



P : Précipitation
 ET, ETR : Evapotranspiration potentielle, réelle
 RFU : Réserve en eau du sol
 I, Ii : Infiltration directe et indirecte à la nappe souterraine
 r : Ruissellement de surface
 Q : Ecoulement : écoulement de surface + écoulement souterrain.

Suivant la période considérée 2 cas peuvent se présenter :

1er Cas P ETP ETR = ETP. On aura un excédent P-ETP qui servira à compléter la réserve du sol si R.F.U. R.F.U. max. S'il y a un surplus il sera disponible pour l'infiltration et le ruissellement.

2ème Cas PLETR. Lorsque RFU ≠ 0 on complète si possible ETR = ETP avec cette réserve ; et si RFU = 0 on a alors ETR = P.

L'établissement d'un tel bilan peut se faire sur la base d'un pas de temps mensuel, décadaire ou journalier.

Dans le cas de cette étude, le choix a porté sur le bilan journalier pour différentes raisons :

- le temps de réaction de la nappe aux averses est relativement très court,

- la distribution des pluies durant l'hivernage est très irrégulière et l'étude des coefficients d'infiltration ponctuels a montré l'importance des séquences de plusieurs jours de pluie successifs, dans le phénomène d'infiltration. Un bilan sur une longue période mensuelle par exemple, aurait pour effet de "gommer" ces séquences et sans oublier la difficulté qu'il y a d'apprécier la réserve en eau du sol (RFU), dont une valeur moyenne n'a pas de sens physique (COLLIN J.J., 1976).

Les principaux termes du bilan journalier ont été évalués comme suit :

- Pluviométrie (P) : dépouillement du pluviographe
- Evapotranspiration potentielle (ETP) : méthode de Penman sur la base des données moyennes mensuelles mesurées à Bamako. Les valeurs journalières sont obtenues en divisant la valeur mensuelle par le nombre de jours du mois considéré.

Tableau 10 ETP Penman durant l'hivernage (mm)

	Maï	Juin	Juil- let	Août	Sept.	Oct.
ETP mensuelle	205	145	128	114	117	127
ETP journalière	6,6	4,8	4,1	3,7	3,9	4,1

- Réserve en eau des sols (RFU) : elle est considérée comme étant égale à 10 mm pour les bilans journaliers, d'après les limnigrammes.

Tableau 11 Bilan hydrique journalier (mm) - TIORIBOUGOU (1983) - PNUD ETP Penman Bamako RFU = 10 mm

	Mai		Juin		Juillet		Août		Septembre		Octobre	
	P	ETR RFU Surp	P	ETR RFU Surp	P	ETR RFU Surp	P	ETR RFU Surp	P	ETR RFU Surp	P	ETR RFU Surp
1												
2				0	7,3	4,1 3,2 0	(10)	3,7 6,3 0	0,2	0,2 0 0		
3			3,1	3,1 0 0		3,2 0	(5)	3,7 7,6 0				
4	(17)	6,6 10 0,4			14,5	4,1 10 0,4		3,7 3,9				
5		6,6 3,4	5,8	4,8 1,0 0	7,8	4,1 10 3,7		3,7 0,2	1,5	1,5 0 0	11,9	4,1 7,8 0
6		3,4 0	4,8	4,8 1,0 0		4,1 5,9		0,2 0				4,1 3,7
7			1,0	0 0	11,4	4,1 10 3,2 51,8	3,7 10 38,1					3,7 0
8					23,5	4,1 10 19,4 18,5	3,7 10 14,8					
9						4,1 5,9		5,7 6,3	(2)	2 0 0		
10					6,6	4,1 8,4 0		3,7 2,6				
11			3,8	3,8 0 0	0,9	4,1 5,2 0		3,6 0	(25)	3,9 10 11,1		
12					2,3	4,1 3,4 0	10	3,7 6,3 0	(14)	3,9 10 6,2		
13						3,4 0		3,7 2,6				
14								2,6 0				
15												
16									(40)	3,9 10 28,3		
17			0,2	0,2 0 0					3,0	3,9 9,1 0		
18			30	4,8 10 15,2						3,9 5,2		
19			20	4,8 10 15,2			37,7	3,7 10 24,0		3,9 1,3		
20		0 0		4,8 5,2				3,7 6,3		1,3 0		
21		6,0 6,0 0 0		4,8 0,4			29,3	3,7 10 21,9				
22			22	4,8 10 7,6	8,7	4,1 4,6 0	16,6	3,7 10 12,9	7,0	3,9 3,1 0		
23				4,8 5,2		4,1 0,5	4,2	3,7 10 0,5				
24				4,8 0,4		0,5 0	0,2	3,7 6,5 0				
25				0,4			15,5	3,7 10 8,3				
26		4,0 4,0 0 0					3,7 6,3					
27							1,5	3,7 4,1 0				
28							3,7 0,4		12,3	3,9 8,4 0		
29			1,3	1,3 0 0	(5,1)	4,1 1,0 0	0,4	0				
30						1,0 0	5,5	3,7 1,8 0				
31												
Surplus mensuel		0,4		38,0		26,7		120,5		45,6		0

- Ruissellement (R) : deux bassins types étudiés par l'ORSTOM en zone sahélienne présentent des conditions géologiques et pluviométriques voisines de celles de Tioribougou :

. bassin de Koumbaka (Mali) sur les grès dogons, constitué de grès généralement recouverts de carapaces latéritiques plus ou moins démantelées, sols ferrugineux, alluvions de fond de vallée sablo-argileuse. Le coefficient de ruissellement déterminé est de 14% pour une superficie drainée de 25 km² et une pluie en année médiane de 500 mm.

. le bassin de Kount-Kouzout (Niger) sur des grès du continental terminal recouverts de latérite. Les grès couvrent 15% de la superficie du bassin avec 40% de sols ferrugineux et d'éboulis. Le coefficient de ruissellement est de 14% pour les mêmes conditions que précédemment.

La surface drainée au niveau de Tioribougou étant d'environ 6 km², nous retiendrons pour les calculs un coefficient de ruissellement de 20%.

- Infiltration (I) : elle représente le reliquat des surplus une fois soustrait le ruissellement.

Dans le cas de Tioribougou la balance des transferts souterrains amont-aval est considérée comme négligeable, les gradients hydrauliques étant très faibles ; il en est de même pour pour l'infiltration indirecte des eaux de ruissellement, la zone d'étude étant située à l'extrémité amont d'un bassin versant.

Les résultats des différents calculs sont représentés sur le tableau 11.

Les surplus d'eau pour l'ensemble de l'hivernage s'élèvent à 231 mm.

On a pour le ruissellement $R = P \times 0,20 = 528 \times 0,20 = 106$ mm

d'où une infiltration $I : 231 - 106 = 125$ mm

Le coefficient d'infiltration est de $\frac{125}{528} \times 100 = 23,7\%$.

Une incertitude de $\pm 5\%$ sur le coefficient de ruissellement donnerait des valeurs du coefficient d'infiltration comprises entre 18,8 et 28,8%.

8.4. CONCLUSION

Les coefficients d'infiltration déterminés pour 1983 par les variations de niveau de la nappe et par la méthode du bilan d'eau journalier sont du même ordre de grandeur : respectivement 20 et 23% des pluies d'hivernage. Une valeur de 20% paraît représentative pour l'année 1983 à Tioribougou, ce qui correspond à un volume de recharge de l'ordre de 110 000 m³/km².

Cependant cette concordance des résultats ne doit pas masquer la complexité du mode d'infiltration. Ces résultats demandent donc à être vérifiés au cours des phases ultérieures de l'étude. Des traçages pourraient être envisagés afin de mieux cerner le phénomène.

CONCLUSIONS GENERALES

CONCLUSIONS GENERALES

L'étude de la zone de Koula-Nossombougou apporte certains points nouveaux aux connaissances géologiques et hydrogéologiques des formations sédimentaires des Plateaux mandingues.

Du point de vue géologique, les observations d'affleurement et les résultats de forage nous ont permis de mettre en évidence une nouvelle série à laquelle nous avons donné le nom de "Série de Koula-Nossombougou".

Cette série s'individualise du reste de l'Infracambrien des Plateaux mandingues par la présence d'un niveau de calcaires et de jaspés au sein d'un important ensemble détritique caractérisé par une alternance de séquences schisteuses et de bancs gréseux à granulométrie généralement fine.

La continuité du niveau de calcaires et de jaspés dans la zone d'étude et le fait qu'il soit surmonté par une discordance de ravinement soulignée localement par un microconglomérat à galets de jaspés, nous ont conduit à distinguer dans la série, deux groupes :

- un groupe inférieur dont nous n'avons pas pu observer la base. Les séquences schisteuses y sont plus importantes. Il se termine par le niveau de calcaire-jaspé ;

- un groupe supérieur où les faciès gréseux et grésoschisteux sont prédominants. Il débute par un niveau de grès grossier à microconglomératique à galets de jaspés du groupe inférieur.

Toutes ces formations, dont l'épaisseur d'affleurement est d'environ 150 mètres, ont été affectées par d'importantes intrusions de roches basiques, essentiellement de dolérites. Le magma intrusif a cheminé par le réseau de fracture et s'est mis en place sous forme de dykes, sills et laccolites.

Ces intrusions doléritiques ont provoqué des perturbations importantes dans les formations encaissantes, notamment des rebroussements et des dislocations de certains niveaux.

La série de Koula-Nossombougou dépasse largement le cadre géographique de notre zone d'étude. Elle s'étend au Sud-Ouest dans la plaine de Dio où le niveau de jaspés et le microconglomérat ont été décrits par DARS (1961). Les calcaires signalés par le même auteur plus à l'Est dans les régions de Fana et de Dioïla pourraient également se rattacher à la série.

Du point de vue stratigraphique, nous avons émis l'hypothèse que la série de Koula-Nossombougou pourrait être l'équivalent de la série de Nara, retenant en cela une des deux hypothèses formulées par DARS (1961) pour les jaspés de Dio.

Tout comme le bassin de Nara, celui de Nossombougou serait une zone d'effondrement. L'histoire des deux bassins débute probablement à la même époque, c'est-à-dire au Cambrien si l'on se réfère aux travaux de ZIMMERMANN M. (1960) et de BENSE C. (1964) dans le bassin de Nara.

La succession des événements majeurs dans le bassin de Nossombougou pourrait être la suivante :

- dépôt du groupe inférieur en milieu marin peu profond et légèrement subsident ;
- arrivée de la première venue importante de dolérites qui serait contemporaine du dépôt des jaspes ;
- ces intrusions provoquent un soulèvement du bassin, le rendant ainsi au domaine continental ; et après une phase d'érosion se déposent les formations du groupe supérieur ;
- la série est ensuite couronnée par une seconde venue doléritique.

Les bassins de Nara et de Nossombougou étaient probablement séparés par un seuil précambrien à l'emplacement actuel des Plateaux de Kolokani - Banamba et communiquaient vraisemblablement par le Nord-Est comme le montre l'élargissement du bassin de Nossombougou.

Entité géologique, la série de Koula-Nossombougou constitue également une entité hydrogéologique.

Les facteurs hydrogéologiques favorables dans la zone sont indissociables de la présence de la dolérite. Sa mise en place fissurale a provoqué l'élargissement des fractures et la fissuration de certains bancs compétents créant des conditions propices à la circulation et à l'accumulation des eaux d'infiltration.

Le schéma hydrogéologique résultant est assez complexe, avec des zones aquifères présentant une hétérogénéité spatiale et verticale :

- dans l'espace, l'aquifère est morcelé par les intrusions doléritiques et par les plages de roches saines et compactes ;
- dans le plan vertical, les zones perméables sont stratifiées, associées préférentiellement à certains bancs plus fissurés ou aux joints de stratification, qui sont mises en relation par les fractures subverticales.

Le niveau de calcaires-jaspes constitue le principal aquifère de la zone de Koula-Nossombougou.

La localisation de ces aquifères discontinus nécessite des études géologiques et hydrogéologiques de détail et l'utilisation de diverses méthodes de prospection géophysique. Pour être efficaces, hydrogéologues et géophysiciens doivent être en relation constante, et doivent systématiquement confronter les résultats de forage avec les hypothèses qui ont servi à leur implantation.

La prospection magnétique et celle de mesure de la résistivité électrique sont les méthodes géophysiques adaptées aux conditions géologiques de la zone.

Les pompages d'essai confirment la nature discontinue des zones aquifères et la complexité des échanges hydrauliques qui s'y produisent, par l'apparition de phénomènes de limite étanche ou de drainance. Leur caractère fissural se manifeste par des rabattements très élevés en début de pompage.

Néanmoins, l'évolution des rabattements au cours des pompages suit les lois générales de l'hydrodynamique en milieu poreux et permet l'utilisation des méthodes classiques d'interprétation.

Les perméabilités sont très variables et sont fonction du degré de fracturation. Les transmissivités varient entre 1×10^{-3} et $5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, quant aux coefficients d'emmagasinement, ils sont compris entre 1×10^{-2} et 1×10^{-5} et montrent le caractère semi-libre à semi-captif des aquifères.

La minéralisation des eaux souterraines de la région de Koula-Nossombougou est en général faible avec une conductivité moyenne de 300 micro-mhos/cm. Les faciès chimiques sont du type bicarbonaté : calcique, sodique et magnésien.

Cette faible minéralisation est liée à la nature siliceuse des formations.

Cependant, on a rencontré des eaux très minéralisées au contact ou à l'intérieur des grands massifs de dolérite. Ces eaux sont chlorurées sodiques avec des teneurs en chlorure pouvant dépasser 4000 mg/l. Elles pourraient avoir une origine profonde liée aux foyers intrusifs.

Les teneurs en Tritium et carbone - 14 mettent en évidence des eaux actuelles et un mélange dans diverses proportions avec des eaux plus anciennes (supérieures à 10000 ans).

Les teneurs en Oxygène - 18 et en Deutérium concordent avec ces observations. Les eaux actuelles s'inscrivent sur la droite météorique locale, tandis que les eaux anciennes reflètent une recharge sous des conditions climatiques différentes.

Les teneurs en isotopes stables montrent par ailleurs la prédominance, dans la recharge des nappes, des apports liés aux pluies du milieu de la saison d'hivernage.

Cette recharge des nappes est confirmée par les fluctuations saisonnières des niveaux. Elle se produit même en année pluviométrique déficitaire comme 1983.

Les infiltrations se font soit par les fissures du substratum rocheux affleurant soit par les fonds des marigots qui comme nous l'avons signalé correspondent à des zones de fractures.

La nappe superficielle sert souvent de réservoir tampon accumulant les eaux d'infiltration et les distribuant ensuite aux nappes sous-jacentes.

Eu égard aux résultats de forages, la série de Koula-Nossombougou renferme d'importantes ressources en eau souterraine qu'il est difficile d'évaluer quantitativement dans l'état actuel des connaissances. Une telle évaluation ne peut se faire que sur la base de données géologiques et hydrogéologiques précises. Ces études sont d'autant plus urgentes qu'en plus de la satisfaction des besoins en eau des populations et du bétail, l'on envisage une exploitation des eaux souterraines pour des cultures de contre saison.

Par ce travail, nous espérons avoir contribué à une meilleure connaissance des multiples problèmes que pose l'approvisionnement en eau des populations des zones sahéliennes, qui passe inévitablement par la connaissance précise de la géologie des régions étudiées.

BIBLIOGRAPHIE

- ASTIER J.C. (1977). - Géophysique appliquée à l'hydrogéologie. Masson et Cie. Paris.
- BAHR J.M. (1980-1981). - Les ressources en eau souterraine au Mali (Afrique Occidentale). Quatre études régionales. Bulletin B.R.G.M., n° 4.
- BENSE C. (1964). - Les formations sédimentaires de la Mauritanie méridionale et du Mali sud-occidental (Afrique de l'Ouest). Mémoires B.R.G.M., n° 26.
- BERKALOFF E. (1970). - Interprétation des pompages d'essai. Cas des nappes captives avec une strate conductrice d'eau privilégiée. Bulletin B.R.G.M., n° 1.
- BESSELES B. (1977). - Le craton ouest-africain. Mémoires B.R.G.M. n° 88.
- BESSELES B., TROMPETTE R. (1980). - Géologie de l'Afrique : la chaîne panafricaine "zone mobile de l'Afrique centrale (partie sud) et zone mobile soudanaise". Mémoires B.R.G.M., n° 92.
- BRO M., HUBERT C., MOULARD P. (1980). - Recherche des aquifères de fracture dans des séries schisto-gréseuses au Mali à l'aide des techniques géophysiques. Bulletin B.R.G.M. n° 4.
- BRUNO M. (1982). - Usage des isotopes en hydrogéologie. Mémoire D.E.P. Institut Dolomieu. Université Grenoble I.
- CARRERE J.M. (1972). - Sédimentologie, stratigraphie des formations gréseuses attribuées au Paléozoïque supérieur dans la région de Bamako (Mali). Bulletin S.G.F. 7ème série, tome XIV.
- CASTANY G. (1967). - Traité pratique des eaux souterraines. Masson et Cie. Paris.
- CASTANY G., MARGAT J. (1961). - Dictionnaire français d'hydrogéologie. Edition B.R.G.M.
- CASTANY G., MARCE P., MARGAT J. (1976). - Contribution des traceurs naturels à l'évaluation des ressources en eau souterraine. La Houille Blanche n° 314.
- CASTANY G. (1982). - Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod Université. Paris.
- CEUPPENS J.C. (1982). - Contribution à la géologie et à l'hydrogéologie du cercle de Banamba. Rapport synthétique campagne 1980-1982. P.N.U.D. Rapport interne D.N.H.E. Bamako.
- CLAUER N. (1976). - Géochimie isotopique du strontium des milieux sédimentaires. Application à la géochronologie de la couverture du craton ouest-africain. Mémoires Sciences Géologiques Strasbourg n° 45.
- COLLIN J.J. (1976). - Les eaux souterraines de la plaine Saône-Doubs (gisement, hydrodynamique, hydrochimie, pollution, gestion et sauvegarde). Thèse Doctorat es-Science Lyon. Document B.R.G.M. n° 9.
- DARS R. (1961). - Les formations sédimentaires et les dolérites du Soudan Occidental (Afrique de l'Ouest). Mémoires B.R.G.M. n° 12.
- DAVIS N.S., De WIEST R.J.M. (1966). - Hydrogeology. John Wiley and sons. New York.
- DEFOSSEZ M. (1962). - Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la boucle du Niger. Mémoires B.R.G.M. n° 13.
- DEMASSIEUX L. (1981). - Hydraulique souterraine. Cours photocopies E.N.S.G. Nancy.
- DEYNOUX M. (1971). - Essai de synthèse stratigraphique du bassin de Taoudéni. Travaux Laboratoire Sciences de la Terre. St Jérôme, Marseille (B), 3.

- DINGER T., DRAY M., GUERRE A., TAZIOLI G.S., TRAORE S., ZUPPI G.M. (1983). - Sur l'alimentation des eaux souterraines de la zone de Kolokani-Nara (République du Mali). Colloque international sur l'hydrologie isotopique et la mise en valeur des ressources en eau. I.A.E.A. Vienne, Autriche. 12,16 sept. 1983. SM 270/41.
- DOBRIAN M.B. (1960). - Introduction to geophysical prospecting. Mc Graw - Hill. Book Company, New York-Toronto.
- DUBREUIL P. (1974). - Initiation à l'analyse hydrologique. Masson et Cie, Orstom. Paris.
- FABRE J. (1983). - Afrique de l'Ouest. Introduction géologique et termes stratigraphiques. Lexique stratigraphique international. Nouvelle série n° 1.
- FONTES J.C. (1976). - Les isotopes du milieu dans les eaux naturelles. Houille Blanche n° 3/4.
- FORKASIEWICZ J. (1978). - Essais de puits par paliers de débit. Analyse et interprétation des données. B.R.G.M. Rapport 78 SGN 040 HYD.
- FORKASIEWICZ J. (1972). - Interprétation des données de pompages d'essai pour l'évaluation des paramètres des aquifères. B.R.G.M. Rapport 72 SGN 273 AME.
- FRANCIS F.O. (1970). - Contribution à l'étude du mouvement d'eau à travers les milieux fissurés. Thèse Docteur - Ingénieur. Grenoble I.
- GENETIER B. (1984). - La pratique des pompages d'essai en hydrogéologie. B.R.G.M. Manuels et méthodes n° 9.
- GEORGES B. (1968). - Rôle du modèle latéritique dans la prospection des nappes d'eau souterraine en Afrique Occidentale. Bulletin B.R.G.M. n° 2.
- GUERRE A. (1984). - Interprétation des variations piézométriques sur le réseau d'observation installé dans la région du projet MLI 82/005 (1981-1983). PNUD/DNHE. Rapport interne. Bamako.
- GUERRE A. (1983-1984). - Etude hydrogéologique de Tioribougou. PNUD/DNHE. Rapports internes. Bamako.
- HAZAN R., MARGAT J. (1961). - Prévision des fluctuations du niveau piézométrique d'une nappe phréatique en zone aride : Nappe de la plaine du Tafilalt (Maroc présaharien). A.I.H.S. Colloque d'Athènes. Publication n° 56.
- I.A.E.A. (1979). - Isotope concentration in precipitation (1972-1975). Environmental Isotope Data n° 6.
- KRUSEMAN G.P., DE RIDDER N.A. (1974). - Interprétation et discussion des pompages d'essai. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Netherlands Translation. MEILHAR A.
- LABORDE J. (1980). - Hydrologie de surface. Cours polycopiés E.N.S.G., Nancy.
- LEGUY C. (1979). - Application des mesures isotopiques des teneurs en tritium à l'étude des circulations et des mélanges des eaux souterraines dans différents milieux poreux. Thèse 3ème cycle, Grenoble I.
- LELONG F. (1966). - Régime des nappes phréatiques contenues dans les formations d'altérations tropicales. Conséquences pour la pédogenèse. Sciences de la Terre, tome XI n° 2, Nancy.
- LILLE R. (1967). - Etude géologique du Guidimaka (Mauritanie). Essai de résolution structurale d'une série épimétamorphique. Thèse d'Etat. Grenoble, Mémoires B.R.G.M. n° 55.
- MARSILY G. (1981). - Hydrogéologie quantitative. Masson et Cie. Paris.
- OLIVE Ph. (1977). - A propos de la datation des eaux par le radiocarbonate. C.R.G. Thonon-les-Bains. Université P. et M. Curie, Paris.

- OUSMANE B. (1978). - Contribution à l'étude hydrogéologique des régions de socle du Sahel. L'hydrogéologie du Damagaran Occidental (Environ de Zinder, Niger). Thèse 3ème cycle. Montpellier.
- PNUD/DNHE. (1982). - Recherche et mise en valeur des eaux souterraines. Conclusions et recommandations du projet MLI/76/004. Rapport interne. Bamako.
- PNUD/DNHE. (1984). - Les eaux souterraines de l'Afrique. Le Mali. Rapport interne. Bamako.
- REICHELTE R. (1972). - Géologie du Gourma (Afrique Occidentale), un seuil et un bassin du Précambrien supérieur, stratigraphie, tectonique, métamorphisme. Mémoires B.R.G.M. n° 53.
- REMENIERAS G. (1976). - L'hydrologie de l'ingénieur. Ed. Eyrolles. Paris.
- RODIER J.A. (1975). - L'hydrologie des régions sahéliennes et la sécheresse 1968-1973. ORSTOM. Etudes scientifiques.
- SAVADOGO A.N. (1975). - Hydrogéologie du bassin versant de la Haute-Sissili (Haute-Volta). Thèse 3ème cycle. Université Grenoble I.
- SAVADOGO A.N., SARROT-REYNAULD J. (1983). - Utilisation des nouvelles données isotopiques et chimiques pour la connaissance du mode d'alimentation des nappes du socle cristallin de Haute-Volta. 108ème Congrès National des Sociétés Savantes. Grenoble.
- SAVADOGO A.N. (1984). - Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta. Etude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse Doctorat ès sciences. Grenoble I.
- SCHNEEBELI G. (1978). - Hydraulique souterraine. Editions Eyrolles. Paris.
- SCHOELLER H. (1960). - Salinité des eaux souterraines, évapo-transpiration et alimentation des nappes. Publication n° 52. A.I.H.S. Helsinki.
- SCHOELLER H. (1962). - Les eaux souterraines. Masson et Cie. Paris.
- SCHOELLER H. (1963). - Classification géochimique des eaux. Publications n° 64. A.I.H.S. Berkeley.
- SCHOELLER H., SCHOELLER M. (1979). - Une étude des eaux thermales du Massif Central français. Bulletin B.R.G.M. n° 2.
- TARDY Y. (1969). - Géochimie des altérations : études des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Mémoires Service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine n° 31.
- THIERY D., VANDENBEUSCH M., VAUBOURG P. (1983). - Interprétation des pompages d'essai en milieu fissuré aquifère. Documents B.R.G.M. n° 57.
- TOGOLA S. (1984). - Recherche d'eaux souterraines en zones doléritiques. D.N.H.E. Rapport interne. Bamako.
- VILLEMUR J.R. (1967). - Reconnaissance géologique et structurale du Nord du bassin de Taoudenni. Mémoires B.R.G.M. n° 51.

ANNEXES

ANNEXE I

METHODE D'INTERPRETATION DES POMPAGES D'ESSAI
 EN MILIEU FISSURE AQUIFERE :
 CAS D'UNE FISSURE HORIZONTALE CIRCULAIRE UNIQUE (THIERY D. et al., 1983)

Le modèle est celui de la figure ci-dessous :

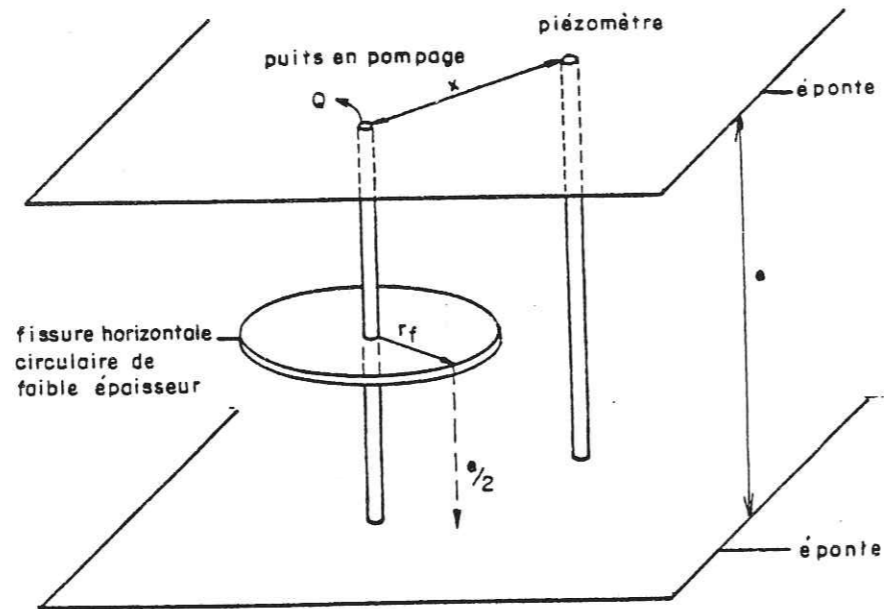


Fig. 72- Modèle de fracture circulaire horizontale

Outre les hypothèses du schéma de THEIS en milieu poreux, on suppose que :

- le forage traverse, en son centre, une fissure de rayon r_f située à mi-hauteur de la couche aquifère ;
- la fissure est de faible épaisseur par rapport à son rayon et à l'épaisseur de l'aquifère ;
- le débit est capté par l'aquifère et non par le puits ;
- la perméabilité équivalente de la fissure est infinie et la charge est égale en tout point de la fissure à celle existante dans le puits.

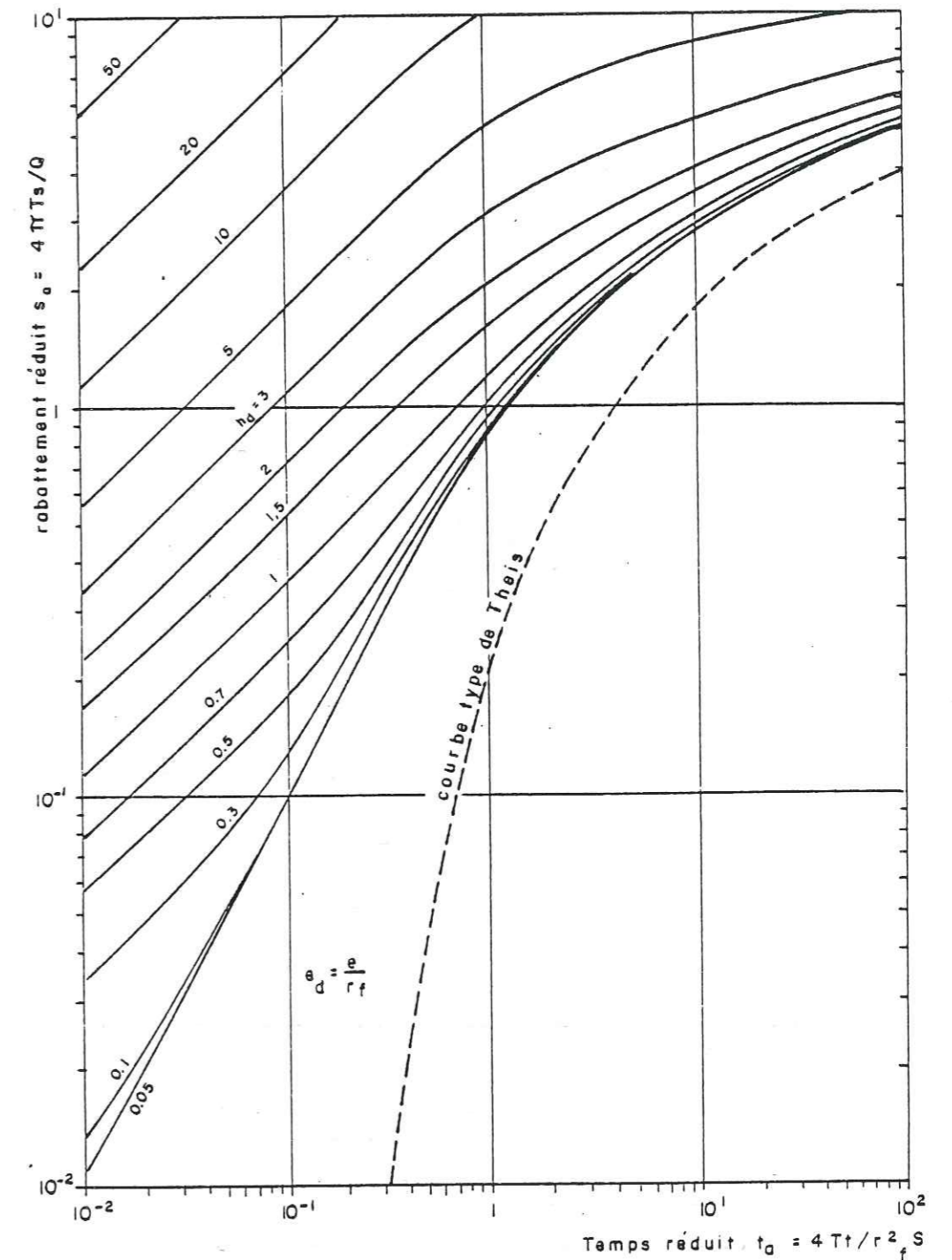


Fig. 73 - Courbe-type : fracture circulaire horizontale - Puits de pompage

1. Interprétation au puits de pompage

Au début du pompage, l'évolution des rabattements au puits est donnée par la relation de CARSLAW et JAEGER (1959).

$$s = \frac{Q \cdot e_D}{TS r_f^2} \quad e_D = \frac{e}{r_f} \quad (e = \text{épaisseur de la couche aquifère})$$

En coordonnées bilogarithmiques, on aura ainsi une droite de pente 1/2.

Les courbes-types, établies en fonction du paramètre e_D sont présentées à la figure 73. Les variables réduites sont :

$$s_a = \frac{4 \pi t_s}{Q} \quad t_a = \frac{4 T t}{r_f^2 S}$$

La fin de la pente 1/2 dépend des caractéristiques géométriques et hydrodynamiques de l'aquifère.

L'interprétation se fait par la méthode d'identification en relevant un point de coïncidence entre la courbe-type et la courbe expérimentale.

$$\begin{matrix} s & s_a \\ M & Ma \\ t & t_a \end{matrix}$$

On obtient :

$$T = \frac{Q}{4 \pi} \cdot \frac{s_a}{s}$$

$$S r_f^2 = 4 T \cdot \frac{t}{t_a} = \frac{Q}{\pi} \cdot \frac{t}{t_a} \cdot \frac{s_a}{s}$$

2. Interprétation au piézomètre

Les courbes-types (fig. 74) sont pour un piézomètre situé à une distance x du centre de la fracture. Elles sont graduées en fonction du paramètre $x_D = \frac{x}{r_f}$. Les variables réduites sont :

$$s_a = \frac{4 \pi T s}{Q} \quad t_a = \frac{4 T t}{x^2 S}$$

Pour $x_D > 3$, les courbes-types tendent vers la courbe de THEIS.

Par la méthode d'identification, on détermine :

$$T = \frac{Q}{4 \pi} \cdot \frac{s_a}{s}$$

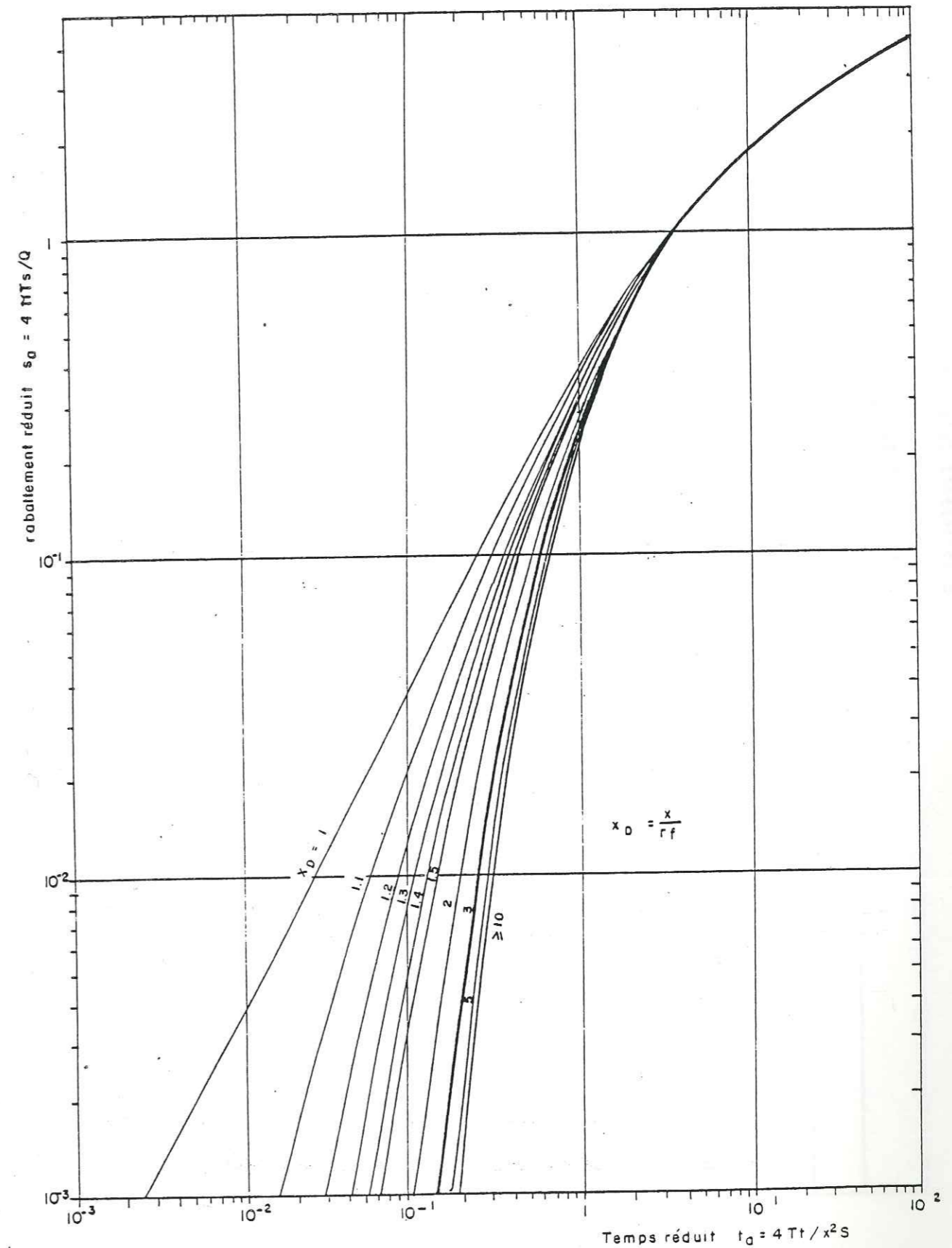


Fig.74 - Courbe-type : fracture circulaire horizontale - Rabattement dans un piézomètre

$$s = \frac{4 T}{x^2} \cdot \frac{t}{t_a} = \frac{Q}{x^2} \cdot \frac{t}{t_a} \cdot \frac{s_a}{s}$$

On peut aussi déterminer le rayon de la fracture r_f :

$$r_f = \sqrt{\frac{s \cdot r_f^2}{s}} \quad \leftarrow \text{calculé au puits} \quad \leftarrow \text{calculé au piézomètre.}$$

TABLE VALEURS des FONCTIONS de $e^u, K_0(x), -Ei(-x),$ and $Ei(-x)e^u$

x	e^u	$K_0(x)$	$e^u K_0(x)$	$-Ei(-x)$	$-Ei(-x)e^u$	x	e^u	$K_0(x)$	$e^u K_0(x)$	$-Ei(-x)$	$-Ei(-x)e^u$	x	e^u	$K_0(x)$	$e^u K_0(x)$	$-Ei(-x)$	$-Ei(-x)e^u$
0.010	1.0101	4.7212	4.7687	4.0379	4.0787	0.10	1.1052	2.4271	2.6823	1.8229	2.0147	1.0	2.7183	0.4210	1.1445	.2194	.5964
11	1.0111	4.6260	4.6771	3.9436	3.9874	11	1.1163	2.3333	2.6046	1.7371	1.9391	1.1	3.0042	3.656	1.0983	.1860	.5588
12	1.0121	4.5390	4.5938	3.8576	3.9044	12	1.1275	2.2479	2.5345	1.6595	1.8711	1.2	3.2301	3.185	1.0575	.1584	.5259
13	1.0131	4.4590	4.5173	3.7785	3.8282	13	1.1388	2.1695	2.4707	1.5889	1.8094	1.3	3.6693	2.782	1.0210	.1355	.4972
14	1.0141	4.3849	4.4467	3.7054	3.7578	14	1.1503	2.0972	2.4123	1.5241	1.7532	1.4	4.0552	2.437	0.9881	.1162	.4712
15	1.0151	4.3159	4.3812	3.6374	3.6925	15	1.1618	2.0300	2.3585	1.4645	1.7015	1.5	4.4817	2.138	.9582	.1000	.4482
16	1.0161	4.2514	4.3200	3.5739	3.6317	16	1.1735	1.9674	2.3088	1.4092	1.6537	1.6	4.9530	1.880	.9309	.0863	.4275
17	1.0171	4.1908	4.2627	3.5143	3.5746	17	1.1853	1.9088	2.2625	1.3578	1.6094	1.7	5.4739	1.655	.9059	.0747	.4086
18	1.0182	4.1337	4.2088	3.4581	3.5209	18	1.1972	1.8537	2.2193	1.3098	1.5681	1.8	6.0496	1.459	.8828	.0647	.3915
19	1.0192	4.0797	4.1580	3.4050	3.4705	19	1.2093	1.8018	2.1788	1.2649	1.5295	1.9	6.6859	1.288	.8614	.0562	.3758
0.020	1.0202	4.0285	4.1098	3.3547	3.4225	20	1.2214	1.7527	2.1408	1.2227	1.4934	2.0	7.3891	1.139	.8416	.0489	.3613
21	1.0212	3.9797	4.0642	3.3069	3.3771	21	1.2337	1.7062	2.1049	1.1829	1.4593	2.1	8.1662	1.008	.8230	.0426	.3480
22	1.0222	3.9332	4.0207	3.2614	3.3340	22	1.2461	1.6620	2.0710	1.1454	1.4273	2.2	9.0250	0.893	.8057	.0372	.3356
23	1.0233	3.8888	3.9793	3.2179	3.2927	23	1.2586	1.6199	2.0389	1.1099	1.3969	2.3	9.9742	0.791	.7894	.0325	.3242
24	1.0243	3.8463	3.9398	3.1763	3.2535	24	1.2713	1.5798	2.0084	1.0762	1.3681	2.4	11.0232	0.702	.7740	.0284	.3135
25	1.0253	3.8056	3.9019	3.1365	3.2159	25	1.2840	1.5415	1.9793	1.0443	1.3409	2.5	12.1825	0.623	.7596	.0249	.3035
26	1.0263	3.7664	3.8656	3.0983	3.1799	26	1.2969	1.5048	1.9517	1.0139	1.3149	2.6	13.4637	0.554	.7459	.0219	.2942
27	1.0274	3.7287	3.8307	3.0615	3.1452	27	1.3100	1.4697	1.9253	0.9849	1.2902	2.7	14.8797	0.493	.7329	.0192	.2854
28	1.0284	3.6924	3.7972	3.0261	3.1119	28	1.3231	1.4360	1.9000	0.9573	1.2666	2.8	16.4446	0.438	.7206	.0169	.2773
29	1.0294	3.6574	3.7650	2.9920	3.0800	29	1.3364	1.4036	1.8758	0.9309	1.2441	2.9	18.1742	0.390	.7089	.0148	.2693
0.030	1.0305	3.6235	3.7339	2.9591	3.0494	0.30	1.3499	1.3725	1.8526	0.9057	1.2226	3.0	20.0855	0.347	.6978	.0131	.2621
31	1.0315	3.5908	3.7039	2.9273	3.0196	31	1.3634	1.3425	1.8304	0.8815	1.2018	3.1	22.1980	0.310	.6871	.0115	.2551
32	1.0325	3.5591	3.6749	2.8965	2.9908	32	1.3771	1.3136	1.8089	0.8583	1.1820	3.2	24.5325	0.276	.6770	.0101	.2485
33	1.0336	3.5284	3.6468	2.8668	2.9631	33	1.3910	1.2857	1.7883	0.8361	1.1630	3.3	27.1126	0.246	.6673	.0089	.2424
34	1.0346	3.4986	3.6196	2.8379	2.9362	34	1.4050	1.2587	1.7695	0.8147	1.1446	3.4	29.9641	0.220	.6580	.0079	.2365
35	1.0356	3.4697	3.5933	2.8099	2.9101	35	1.4191	1.2327	1.7493	0.7942	1.1270	3.5	33.1155	0.196	.6490	.0070	.2308
36	1.0367	3.4416	3.5678	2.7827	2.8848	36	1.4333	1.2075	1.7308	0.7745	1.1101	3.6	36.5982	0.175	.6405	.0062	.2254
37	1.0377	3.4143	3.5430	2.7563	2.8603	37	1.4477	1.1832	1.7129	0.7554	1.0936	3.7	40.4473	0.156	.6322	.0055	.2204
38	1.0387	3.3877	3.5189	2.7306	2.8364	38	1.4623	1.1596	1.6956	0.7371	1.0779	3.8	44.7012	0.140	.6243	.0048	.2155
39	1.0398	3.3618	3.4955	2.7056	2.8133	39	1.4770	1.1367	1.6789	0.7194	1.0626	3.9	49.4025	0.125	.6166	.0043	.2108
0.040	1.0408	3.3365	3.4727	2.6813	2.7907	0.40	1.4918	1.1145	1.6627	0.7024	1.0478	4.0	54.5982	0.112	.6093	.0038	.2063
41	1.0419	3.3119	3.4505	2.6576	2.7688	41	1.5068	1.0930	1.6470	0.6859	1.0335	4.1	60.3403	0.100	.6022	.0033	.2021
42	1.0429	3.2879	3.4289	2.6344	2.7474	42	1.5220	1.0721	1.6317	0.6700	1.0197	4.2	66.6863	0.089	.5953	.0030	.1980
43	1.0439	3.2645	3.4079	2.6119	2.7267	43	1.5373	1.0518	1.6169	0.6546	1.0063	4.3	73.6998	0.080	.5887	.0026	.1941
44	1.0450	3.2415	3.3874	2.5909	2.7064	44	1.5527	1.0321	1.6025	0.6397	9933	4.4	81.4509	0.071	.5823	.0023	.1903
45	1.0460	3.2192	3.3673	2.5704	2.6866	45	1.5683	1.0129	1.5886	0.6253	9807	4.5	90.0171	0.063	.5761	.0021	.1866
46	1.0471	3.1973	3.3478	2.5504	2.6672	46	1.5841	0.9943	1.5750	0.6114	9685	4.6	99.4843	0.057	.5701	.0018	.1832
47	1.0481	3.1758	3.3287	2.5268	2.6483	47	1.6000	0.9761	1.5621	0.5979	9566	4.7	109.9472	0.051	.5643	.0016	.1798
48	1.0492	3.1549	3.3100	2.5068	2.6300	48	1.6161	0.9584	1.5498	0.5848	9451	4.8	121.5104	0.046	.5586	.0014	.1766
49	1.0502	3.1343	3.2918	2.4871	2.6120	49	1.6323	0.9412	1.5363	0.5721	9338	4.9	134.2898	0.041	.5531	.0013	.1734
0.050	1.0513	3.1142	3.2739	2.4679	2.5945	0.50	1.6487	0.9244	1.5241	0.5598	9229	5.0	148.4132	0.037	.5478	.0011	.1704
51	1.0523	3.0945	3.2564	2.4491	2.5773	51	1.6653	0.9081	1.5122	0.5478	9123						
52	1.0534	3.0752	3.2393	2.4306	2.5604	52	1.6820	0.8921	1.5006	0.5362	9019						
53	1.0544	3.0562	3.2226	2.4126	2.5440	53	1.6989	0.8766	1.4892	0.5250	8919						
54	1.0555	3.0376	3.2062	2.3948	2.5278	54	1.7160	0.8614	1.4781	0.5140	8820						
55	1.0565	3.0194	3.1901	2.3775	2.5120	55	1.7333	0.8466	1.4673	0.5034	8725						
56	1.0576	3.0015	3.1744	2.3604	2.4964	56	1.7507	0.8321	1.4567	0.4930	8631						
57	1.0587	2.9839	3.1589	2.3437	2.4811	57	1.7683	0.8180	1.4464	0.4830	8541						
58	1.0597	2.9666	3.1437	2.3273	2.4663	58	1.7860	0.8042	1.4363	0.4732	8451						
59	1.0608	2.9496	3.1288	2.3111	2.4516	59	1.8040	0.7907	1.4264	0.4637	8365						
0.060	1.0618	2.9329	3.1142	2.2953	2.4371	0.60	1.8221	0.7775	1.4167	0.4544	8280						
61	1.0629	2.9165	3.0999	2.2797	2.4230	61	1.8404	0.7646	1.4073	0.4454	8199						
62	1.0640	2.9003	3.0858	2.2645	2.4092	62	1.8589	0.7520	1.3980	0.4366	8116						
63	1.0650	2.8844	3.0719	2.2494	2.3956	63	1.8776	0.7397	1.3889	0.4280	8036						
64	1.0661	2.8688	3.0584	2.2346	2.3822	64	1.8965	0.7277	1.3800	0.4197	7960						
65	1.0672	2.8534	3.0450	2.2201	2.3691	65	1.9155	0.7159	1.3713	0.4115	7882						
66	1.0682	2.8382	3.0319	2.2058	2.3562	66	1.9348	0.7043	1.3627	0.4036	7809						
67	1.0693	2.8233	3.0189	2.1917	2.3434	67	1.9542	0.6930	1.3543	0.3959	7737						
68	1.0704	2.8086	3.0062	2.1779	2.3310	68	1.9739	0.6820	1.3461	0.3883	7665						
69	1.0714	2.7941	2.9937	2.1643	2.3188	69	1.9937	0.6711	1.3380	0.3810	7596						
0.070	1.0725	2.7798	2.9814	2.1508	2.3067	0.70	2.0138	0.6605	1.3301	0.3738	7528						
71	1.0736	2.7657	2.9693	2.1376	2.2949	71	2.0340	0.6501	1.3223	0.3668	7461						
72	1.0747	2.7519	2.9573	2.1246	2.2832	72	2.0544	0.6399	1.3147	0.3599	7394						
73	1.0757	2.7382	2.9455	2.1118	2.2717	73	2.0751	0.6300	1.3072	0.3532	7329						
74	1.0768	2.7247	2.9340	2.0991	2.2603	74	2.0959	0.6202	1.2998	0.3467	7266						
75	1.0779	2.7114	2.9226	2.0867	2.2492	75	2.1170	0.6106	1.2926	0.3403	7204						
76	1.0790	2.6983	2.9113	2.0744	2.2381	76	2.1383	0.6012	1.2855	0.3341	7144						
77	1.0800	2.6853	2.9002	2.0623	2.2273	77	2.1598	0.5920	1.2785	0.3280	7084						
78	1.0811	2.6726	2.8894	2.050													

ANNEXE III - 1

POMPAGE D'ESSAI : TOMBOUGOU (Descente)

Premier essai

Date Heure/minute	Temps de pompage (mn) t	Profondeur du niveau (m)		Débit m ³ /h	
		Forage F1	Piézomètre F2		
30/01/84 8H00	0	11,03	10,97		
	1	22,23			
	2	22,87			
	3	23,52		13,84	
	5	24,79	11,79		
	7	24,92	11,82		
	10	25,04		13,33	
	15	25,24			
	20	25,37	12,52		
	25	25,52	12,72		
	8H30	30	25,64		13,09
		35	27,72	13,18	
		40	25,88	13,42	
		45	26,00	13,61	
		50	26,15	13,76	
9H00	55	26,34	13,98		
	60	26,45	14,18	12,85	
	70	26,70	14,46		
	80	26,88	14,78		
	90	26,98	15,08		
10H00	100	27,18	15,35		
	120	27,46	15,85	12,20	
	150	27,77	16,52		
11H00	180	28,08	17,05	11,80	
	210	28,38	17,49		
12H00	240	28,67	17,91	11,80	
	270	28,89	18,30		
13H00	300	29,98	18,62	11,80	
	360	29,28	19,10	11,61	
	420	29,49	19,49		
15H00	480	29,67	19,82		
	540	29,78	20,09	11,61	
	600	29,94	20,34		
18H00	660	30,06	20,56	11,61	
	720	30,13	20,74	11,61	

ANNEXE III -2

POMPAGE D'ESSAI : TOMBOUGOU (Descente)

Deuxième essai

Date Heure/minute	Temps de pompage (mn) t	Profondeur du niveau (m)		Débit m ³ /h	
		Forage F2	Piézomètre F1		
31/01/84 12H00	0	11,97	12,08		
	1	17,95	12,28		
	2	20,52	12,41		
	3	21,03	12,50	16,00	
	5	21,42	12,67		
	7	21,77	12,82		
	10	22,17	13,03	15,00	
	15	22,45	13,36		
	20	22,67	13,63		
	12H30	25	22,93	13,89	
		30	23,06	14,12	15,00
		35	23,17	14,37	
		40	23,30	14,60	
		45	23,42	14,77	
	13H00	50	23,56	14,95	
55		23,72	15,14		
60		23,93	15,31	14,69	
70		24,20	15,67		
80		24,30	15,96		
14H00	90	24,51	16,22		
	100	24,66	16,46		
	120	24,94	16,93	13,84	
	150	25,30	17,55		
	180	25,67	18,07	13,84	
16H00	240	26,26	19,00	13,84	

POMPAGE D'ESSAI : TIORIBOUGOU (Descente)

Date Heure/minute	Temps de pompage (mn) t	Profondeur niveau			Débit (m ³ /h)	
		Forage F5	Piézomètre F5 bis	Piézomètre F3		
10/03/82 6h00	0	20,43	20,51	20,27	9,11	
	1	20,90	-	20,27		
	2	21,14	21,13			
	3	21,24	21,22			
	5	21,48	21,42			
	7	21,62	21,59			
	10	21,80	21,77	20,27		
	15	21,99	21,95	20,28		
	20	22,18	22,13	20,30		
	25	22,29	22,26			
	6h30	30	22,42	22,35		20,34
		40	22,63	22,55		20,38
	7h00	50	22,74	22,69		20,42
		60	22,83	22,80		20,47
	7h30	70	22,97	22,91		
90		23,13	23,09	20,57		
8h00	120	23,30	23,28	20,66		
8h30	150	23,46	23,43	20,72		
9h00	180	23,58	23,54	20,79		
	210	23,67	23,65	20,84		
10h00	240	23,73	23,73	20,87		
	270	23,80	23,80	20,92		
11h00	300	23,85	23,85	20,98		
12h00	360	23,95	23,95	21,01		
13h00	420	24,01	24,01	21,05		
14h00	480	24,06	24,06	21,07		
15h00	540	24,10	24,10	21,07		
16h00	600	24,13	24,14	21,07		
18h00	720	24,20	24,20	21,07		

POMPAGE D'ESSAI : TIORIBOUGOU (Remontée)

Date Heure/minute	Temps écoulé depuis		Profondeur du niveau			
	Début pompage t	Arrêt pompage t'	Forage pompé F5	Piézométrie F5 bis	Piézomètre F3	
11/03/82 18H00	720	0	24,20	24,20	21,07	
	721	1	23,73	23,87		
	723	3	23,54	23,60		
	725	5	23,35	23,43	21,07	
	727	7	23,19	23,18		
	730	10	23,04	23,14	21,07	
	735	15	22,85	22,95	21,07	
	740	20	22,70	22,78	21,05	
	745	25	22,58	22,65		
	18H30	750	30	22,47	22,55	21,03
		760	40	22,28	22,38	21,00
	19H00	770	50	22,10	22,20	20,93
		780	60	21,98	22,07	20,90
	19H30	790	70	21,86	21,96	
		810	90	21,72	21,80	20,95
20H00	840	120	21,50	21,51	20,73	
	870	150	21,33	21,44	20,66	
21H00	900	180	21,20	21,31	20,60	
	930	210	21,13	21,21	20,56	
22H00	960	240	21,05	21,14	20,52	
	990	270	20,99	21,08	20,49	
0H00	1020	300	20,93	21,03	20,48	
	1080	360	20,85	20,96	20,43	
2H00	1140	420	20,79	20,86	20,40	
	1200	480	20,73	20,82	20,38	
5H00	1380	660	20,63	20,72	20,34	
	1440	720	20,60	20,72	20,31	
8H00	1560	840	20,56	20,67		

POMPAGE D'ESSAI : NONKON (Descente)

Date Heure/minute	Temps de pompage (mn) t	Profondeur du niveau (m)	Débit (m ³ /h)	
22/06/84 8H00	0	23,63	10,30	
	1	27,28		
	2	28,06		
	3	29,34		
	5	30,40		
	7	31,13		
	10	31,90		
	15	31,68		
	20	33,01		
	25	33,31		
	8H30	30		33,50
		40		33,72
	9H00	50		33,85
		60		33,94
	9H30	70		34,03
90		34,18		
10H00	120	34,38		
	150	34,53		
11H00	180	34,68		
	210	34,80		
12H00	240	34,93		
	270	35,00		
13H00	300	35,16		
	360	35,38		
14H00	420	35,53		
	480	35,73		
	540	35,88		
	600	36,02		
20H00	720	36,34		

POMPAGE D'ESSAI : NONKON (Remontée)

Date Heure/minute	Temps écoulé depuis		Profondeur du niveau (m)	
	Début pompage t(mn)	Arrêt pompage t' (mn)		
22/06/84 20H00	720	0	36,34	
	721	1	34,31	
	723	3	33,08	
	725	5	32,00	
	727	7	33,83	
	730	10	29,78	
	735	15	28,89	
	740	20	28,28	
	745	25	28,11	
	20H30	750	30	27,95
		760	40	27,83
	21H00	770	50	27,78
		780	60	27,75
	21H30	790	70	27,75
		810	90	27,65
22H00	840	120	27,63	
	870	150	27,55	
23H00	900	180	27,51	
	930	210	27,48	
23/06/84 0H00	960	240	27,43	
	990	270	27,43	
	1020	300	27,41	
	1080	360	27,36	
	1140	420	27,30	
	1200	480	27,25	
	1260	540	27,21	
	1320	600	27,15	
	8H00	1440	720	27,10

POMPAGE D'ESSAI : KARADIE (Descente)

ANNEXE III - 7

Date Heure/minute	Temps de pom- page (mn) t	Niveau dynamique (m)		Débit (m ³ /n)	
		Forage pompé	Piézomètre		
16/12/83	14h00	0	18,62	18,94	
	1	20,44	18,18		
	3	20,70	18,37		
	5	20,76	18,56		
	7	20,82	18,63		
	10	20,85	-		
	12	20,86	-		
	15	20,89	-		
	20	20,90	-		
	25	20,91	-		
	14h30	30	20,92		-
	35	20,93	18,75		
	40	20,94	-		
	45	20,95	18,80		
	50	20,96	-		
	15h00	60	20,97		-
	70	20,99	-		
	80	21,00	-		
	15h30	90	21,01		-
	100	21,01	18,89		
	16h00	120	21,03		-
	150	21,06	18,91		
	17h00	180	21,08		-
	210	21,08	18,95		
	18h00	240	21,10		18,97
270	21,11	18,99			
19h00	300	21,12	-		
360	21,14	19,02			
420	21,17	19,05			
22h00	480	21,18	19,07		
540	21,19	19,09			
17/12/83	0h00	600	21,20	19,07	
	660	21,20	19,08		
	2h00	720	21,21	19,08	
	780	21,22	19,09		

ANNEXE III - 7 (Suite)

4h00	840	21,22	19,10	18,00
	900	21,23	19,12	
6h00	960	21,23	19,13	18,00
	1020	21,24	19,13	
8h00	1080	21,25	19,14	18,00
10h00	1200	21,27	19,15	18,00
12h00	1320	21,29	19,15	
14h00	1440	21,30	19,15	18,00

POMPAGE D'ESSAI : KARADIE (Remontée)

Date	Temps écoulé depuis		Profondeur niveau (m)	
	début pompage t (mn)	arrêt pompage t' (mn)	forage pompé	piézomètre
17/12/83				
14h00	1440	0	21,30	19,15
	1441	1	19,48	18,98
	1443	3	19,23	18,76
	1445	5	19,18	18,70
	1447	7	19,12	18,68
	1450	10	19,09	18,65
	1455	15	19,06	18,62
	1460	20	19,05	18,60
	1465	25	19,02	18,58
14h30	1470	30	19,01	18,56
	1480	40	18,98	18,54
	1490	50	18,96	18,52
15h00	1500	60	18,95	18,50
	1510	70	18,94	18,49
	1520	80	18,92	18,47
15h30	1530	90	18,91	18,46
	1540	100	18,90	18,45
16h00	1560	120	18,88	18,43
	1590	150	18,86	18,41
17h00	1620	180	18,84	18,40
	1650	210	18,83	18,38
18h00	1680	240	18,81	18,37
	1710	270	18,80	18,36
19h00	1740	300	18,80	18,35
20h00	1800	360	18,79	18,34
	1860	420	18,78	18,32
22h00	1920	480	18,76	18,31
	1980	540	18,76	18,30
18/12/83				
0h00	2049	600	18,75	18,30
	2100	660	18,72	18,29
2h00	2160	720	18,72	18,27
	2220	780	18,71	18,26
4h00	2280	840	18,71	18,25
	2340	900	18,70	18,25
6h00	2400	960	18,70	18,25
	2460	1020	18,70	18,25
8h00	2520	1080	18,70	18,25
10h00	2640	1200	18,70	18,25
12h00	2760	1320	18,69	18,24
14h00	2880	1440	18,69	18,24

POMPAGE D'ESSAI : NOSSOMBOUGOU (Descente)

Date Heure/minute	Temps de pom- page (mn) t	Niveau dynamique (m)		Débit (m ³ /n)
		Forage pompé	Piézo-mètre	
07/12/83				
13h00	0	8,03	9,71	
	1	15,10	9,73	
	3	17,40	9,76	18,94
	5	17,53	9,78	
	7	17,62	9,81	
	10	17,72	9,86	18,94
	15	17,75	9,92	
	20	17,80	9,97	18,94
	25	17,84	10,02	
13h30	30	17,85	10,05	18,94
	35	17,86	10,09	
	40	17,90	10,12	
	45	17,92	10,16	
	50	17,94	10,16	
14h00	60	17,95	10,21	18,94
	70	17,99	10,23	
	80	18,01	10,27	
14h30	90	18,06	10,31	
	100	18,06	10,33	
15h00	120	18,10	10,39	18,94
	150	18,15	10,45	
16h00	180	18,18	10,51	
	210	18,18	10,55	
17h00	240	18,22	10,57	18,94
	270	18,24	10,60	
18h00	300	18,25	10,65	18,94
	360	18,30	10,72	
20h00	420	18,31	10,74	18,94
	480	18,32	10,77	18,46
22h00	540	18,35	10,81	18,94
	600	18,37	10,83	18,46
08/12/83 1h	720	18,38	10,89	18,46
3h00	840	18,40	10,94	
5h00	960	18,44	10,97	18,46
7h00	1080	18,44	11,04	
9h00	1200	18,43	11,04	18,00

POMPAGE D'ESSAI : NOSSOMBOUGOU (Remontée)

Date Heure/minute	Temps écoulé depuis		Profondeur niveau Forage pompé
	Début pompage t	Arrêt pompage t'	
08/12/83 9h00	1200	0	18,43
	1201	1	10,69
	1203	3	9,63
	1205	5	9,43
	1207	7	9,38
	1210	10	9,28
	1215	15	9,20
	1220	20	9,14
	1225	25	9,10
	9h30	1230	30
1235		35	9,03
1240		40	9,00
1245		45	8,98
1250		50	8,95
10h00	1260	60	8,92
	1270	70	8,88
	1280	80	8,83
10h30	1290	90	8,81
	1300	100	8,78
11h00	1320	120	8,75
12h00	1380	180	8,65
13h00	1440	240	8,60

ANNEXE IV

ANALYSE CHIMIQUE DES EAUX

Les resultats sont exprimés en :

- . micromho/cm pour la conductivité à 25°C (1/R)
- . mg/l de CaCO₃ pour la dureté totale et l'alcanité (TH,TAC)
- . mg/l de N pour les Nitrates
- . mg/l de l'ion pour les autres elements

N°	Localité	Date	PH	1/R	TH	TAC	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
1	Bin	06/04/83	6	50	20	74	3.2	2.9	23.5	2.9	0	0.5	90		0.9
2	Bin	17/02/84	6.8	90	28	78	6.4	2.9	25.5	1.3	0	4.9	95		0.1
3	Bin	27/06/84	7	92	60	92	8	9.7	15.9	2.5	0	4	112		0.1
4	Choala F2	18/03/83	7.4	327	164	147	32	8.7	26	2.3	11	12	180		3
5	Choala F1	16/05/83	7.9	360	196	216	33.6	27.2	16.8	3	11.3	4.7	266		2.5
6	Choala F1	"	7.4	384	180	150	31.5	22.9	19	4.6	11.3	13.5	183		11
7	Choala F2	"	7.8	375	172	180	25.6	26.3	21.5	3	6.8	7.7	220		6.8
8	Choala F3	18/03/84	7.6	410	186	197	57.7	10.2	24.8	1.4	8.5	25	241		0.7
9	Choala F2	"	6.8	381	152	132	40	12.6	53.3	1.4	8.5	90	161		1.7
10	Choala F1	"	7.2	389	160	157	32.8	19	32.6	1.3	5.2	50	191		1.4
11	Choala F1	21/07/84	7.3	387	176	211	24	28	22.5	2.4	7.5	5.2	258		-
12	Dassombougou	18/02/83	6.2	120	52	75	9.6	6.8	16.6	2	0	11	92		-
13	Dassombougou	08/04/83	7	126	60	85	12	7.2	19.3	3.4	0	2.5	104		4.8
14	Diékouma-N	16/04/84	8.7	588	48	141	16	1.9	453	2.9	16	625	171	4.8	-
15	Diékouma-S	18/03/83	7.3	238	148	150	30.5	17.4	4.5	4	6.8	4	183		0
16	Diékouma-S	16/05/83	7.8	270	120	150	24.4	13.8	17.7	4.6	8.2	4.7	183		0.2
17	Diékouma-S	21/07/83	7.3	356	116	186	23	14	38.3	5	9	6.5	227		-
18	Diékouma-S	14/03/84	6.9	304	128	144	27.2	14.6	29.7	1.5	8	30.5	175		0
19	Diobabougou	06/02/83	6.2	88	44	93	8	5.8	24.2	1	0	1	112		1.3
20	Doérébougou	15/03/83	6.5	395	248	144	49.7	30.1	12	6	21.5	23.5	176		23
21	Doérébougou	28/07/83	7.3	572	256	123	87.3	9.2	13.6	8.5	28.2	26.2	150		30
22	Doérébougou	02/04/84	7	550	244	127	64.1	20.4	68.3	1.7	19.7	175	155		-
23	Dontiérebougou	22/04/83	5.6	114	40	66	8	4.8	21.1	10.1	0	15	80		2.5
24	Dontiérebougou	02/04/84	5.7	200	72	60	18.4	6.3	31.4	1	0	60	72		-
25	Dontiérebougou	"	5.7	118	52	49	12.8	4.8	30.9	0.6	0	50	60		-
26	Dotelebougou	18/05/83	7.7	310	132	135	27.2	15.5	13.6	3.8	22	6	165		0.3
27	Dotelebougou	16/03/83	7.4	270	128	139	31.2	18.9	4.5	2.4	21.3	6	168		2
28	Dotelebougou	21/07/83	6.4	298	144	116	32	15.5	10.1	2.4	14.5	27	141		-
29	Dotelebougou	14/03/84	6.8	335	136	131	34.4	12.2	40	1.4	23	50	159		1.4
30	Fonflébougou F1	21/02/83	7.1	312	144	220	29.6	17	44	4.1	0	17	269		0.3
31	Fonflébougou F1	08/04/83	8.1	399	132	305	20.8	19.4	84.6	4.8	9	5	373		0
32	Fonflébougou F2	04/07/83	7.8	293	120	193	25.6	13.6	35	4	6.5	1	236		0
33	Fonflébougou F2	"	8	318	92	204	26.4	6.3	52.7	6.5	8.2	1.5	249		-
34	Fonflébougou F1	03/02/84	7.6	421	144	196	33	15	24.6	5.1	5.7	1.5	240		-
35	Kalankoulou	06/02/83	6.6	180	96	170	18	12.4	30	10	0	4	206		1.8
36	Kalankoulou	15/03/83	7.4	120	92	104	20	10.2	5.8	1	0	2	126		2.1
37	Kalankoulou	27/07/83	6.3	176	93	162	21.6	9.2	32	2	00	2.3	198		-
38	Kalankoulou	02/04/84	6.5	192	92	150	22.4	8.7	35.6	0.3	0	15	182		-
39	Kalé	16/05/83	7.7	455	200	175	42.5	22.8	30.7	3	4.8	18.5	213		18.4

Annexes IV - Analyses chimiques des eaux

N°	Localité	Date	PH	1/R	TH	TAC	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
40	Kalé	21/07/83	7	489	192	170	30	28	8	3	2.7	2.2	208		-
41	Kalé	14/03/84	7.2 ^B	510	192	162	58.5	11.2	84.4	1.3	3	150	198		0.8
42	Kalé	14/03/83	7.3	387	200	173	50.9	8.9	63.8	2.6	3.8	18	211		29
43	Karadié	06/02/83	6.6	207	120	117	20.8	16.5	0.2	2.5	2.5	4	143		0
44	Karadié	22/02/83	6.5	192	116	119	20	16	0.2	3.9	0.5	1	145		0.1
45	Karadié	15/03/83	6.7	176	112	115	36	5.3	1.4	2.6	2	1	140		0.1
46	Karadié	28/07/83	6.3	211	112	122	25.6	11.6	3	3.6	0.7	0.2	149		-
47	Karadié	26/02/84	7.3	230	112	117	22.2	13.7	4.6	2.3	1.5	4.5	143		0.8
48	Karadié (puits)	"	6.1	41	10	15	2.4	1	4.8	1.3	0	4.9	18		0
49	Karadié	02/04/84	6.7	230	104	102	31.2	6.3	3	1	0.7	0.2	149		0
50	Kena	17/02/83	6.8	209	92	142	19.2	10	24	7.2	2.7	2.5	177		0
51	Kena	06/01/83	7	167	84	166	14.4	11.6	44.2	1.3	0.4	9.4	204		0.2
52	Kena	27/06/83	7.3	233	104	142	30	7	17	4	0.8	1.8	174		-
53	Kodiala	02/04/84	7.6	600	316	297	76.1	30.6	12.6	1	6.2	30	361		-
54	Koroka	06/02/83	7	167	84	83	14.4	11.6	5.5	1.3	0.4	9.4	102		0.2
55	Koroka	15/03/83	7.8	1400	408	176	110.6	32	230	43	50	92	214		170
56	Korokabougou	04/07/83	8	310	136	182	26.4	17	29	2.5	7.5	8.7	222		-
57	Korokabougou	02/02/84	7.2	392	104	184	32	6	81.4	2.5	4.5	67	225		-
58	Korokabougou	08/04/83	8.2	143	104	178	27.2	8.7	39.6	4.8	7	7.5	217		0.1
59	Kossaba	26/02/84	8	340	152	162	30.5	18.4	6.4	4.4	3	3.4	198		1.6
60	Kossaba (puits)	"	7	163	60	56	10.4	8.3	1.4	2.9	7	2.5	68		0
61	Koyo	25/02/83	7.1	252	152	154	27.2	20.4	17.9	5.1	32	7	188		0.1
62	Koyo	18/03/83	7.2	279	128	156	31.2	18.9	17	4	27.5	9	191		-
63	Koyo	16/05/83	7.9	332	144	153	25.6	19.5	17.2	6.7	28.8	4.7	187		0.3
64	Koyo	21/07/83	6.7	240	112	103	16	17	6.4	3.6	14	7.7	126		-
65	Koyo	14/03/84	6.7	263	108	108	21	13.6	40.9	1.4	20.2	50	132		0
66	Massantola F1	21/05/80	8.7	355	-	-	21.2	16.6	35	6.4	12.9	5	192		-
67	Massantola F2	"	9.1	351	-	-	25.9	16.2	34.8	6.7	13.2	4.8	196		-
68	Massantola F3	"	9.1	338	-	-	18.4	15.5	34.7	6.6	13.4	5.1	148		-
69	Massantola F1	12/01/83	6.7	286	124	173	24	15.5	27.1	5	11.5	3	211		-
70	Massantola F1	02/03/83	7.2	265	116	173	4	25.8	27.8	5.1	9.5	0.8	211		-
71	Massantola F1	18/04/83	7.5	327	136	167	21.6	20	13.1	12.2	8.6	3	204		-
72	Massantola F1	08/07/83	7.4	275	124	179	27.2	13.6	23.7	7	8.4	2.7	210		-
73	Massantola F1	26/07/83	7	295	108	165	20	14.1	24.8	5.5	2	1.7	201		-
74	Massantola F1	27/02/84	8	350	120	182	16.8	18.9	31	4	10.2	0.5	222		0.1
75	Massantola F1	27/03/84	8.7	382	148	167	36	14.1	22.5	3.2	14.5	3.5	205		7.8
76	Massantola F2	"	8.5	364	152	162	40.8	12.1	17.2	2.1	19	4.5	198		1.8
77	Massantola (pts)	"	6.9	65	24	36	4.8	3	4.6	3.2	0.5	0	44		1.7
78	Molébougou	17/02/83	6.7	230	156	177	26.8	21.6	10.6	7.1	0	0	215		0.3

Annexes IV - suite - Analyses chimiques des eaux

N°	Localité	Date	PH	1/R	TH	TAC	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻⁻	NO ₃ ⁻
79	Moiébébougou	17/02/84	7.2	328	140	188	21.6	20.9	22.5	1.9	0	2.9	229		-
80	N'Golobougou	29/03/84	12.3	1485	189	10	54.5	11.6	1754.2	6.6	2	2624	12	176.4	-
81	Nonkon F1	11/05/84	8	353	152	162	47.2	6.3	28.8	2	29	9	202		0
82	Nonkon F2	18/05/84	7	365	108	110	32	6.8	34.7	1.9	4.8	53	130		0.6
83	Nonkon F3	22/05/84	7	342	152	214	38.4	13.6	33.6	3	6.5	4	265		0
84	N'Gabakoro T	10/05/84	8.7	387	196	170	43.2	14.5	5.2	2.9	5.8	6	184		0
85	Nossombougou 1	29/12/82	7	238	172	176	52	10.2	1.6	1.8	0.5	0	216		0.1
86	Nossombougou 2	"	7	260	184	178	68	3.4	3.4	2	0.5	0	219		4
87	Nossombougou 1	17/02/83	7.4	218	176	171	34.4	21.6	2.9	4.2	0	1.5	209		0.4
88	Nossombougou 2	"	7.7	240	180	189	30.4	25.3	4.1	3.9	0	0.5	231		0
89	Nossombougou 3	"	7.6	212	172	180	33.2	21.6	3.3	4	0	0.3	218		0
90	Nossombougou 1	06/04/83	7.5	240	168	180	29.6	22.8	6	1	0	1.5	220		-
91	Nossombougou 2	"	7.2	265	180	193	30.4	25.2	6.7	1.1	0.5	1	236		-
92	Nossombougou 3	"	7.4	258	164	169	43	13.7	1.6	2.5	0.5	0.2	207		-
93	Nossombougou 3	17/02/84	7.5	288	140	164	6.4	30.1	10.8	1.3	0	0.5	201		0
94	Nossombougou 2	"	7.9	316	163	185	9.6	33.8	11	1.2	0	2.5	226		0
95	Nossombougou 1	"	7.8	310	160	175	32.9	19.2	8.3	1	0	3.5	214		0
96	Oussébébougou	18/03/83	8	282	104	187	40	0.9	40.5	2	1	4	229		4
97	Oussébébougou	16/05/83	7.6	330	120	192	20.8	16.5	34.3	3	0.8	3.5	235		2
98	Oussébébougou	21/07/83	6.7	311	96	164	14	14.5	35.9	2	1.7	6.5	200		-
99	Sirakorola F1	22/02/83	6.8	224	140	148	25.6	18.4	3.2	2.8	0	1	181		-
100	Sirakorola F2	15/03/83	7.4	330	244	250	72.1	15.5	4.1	0.9	1	1	306		0
101	Sirakorola F3	"	7.5	176	102	110	34.4	3.8	0.5	10	0	2	134		0.1
102	Sirakorola F1	22/04/83	7.3	374	244	250	52	27.7	4.4	1	0.6	2	306		0
103	Sirakorola F2	"	7	264	136	153	26	17.2	9.9	1	1.2	3.5	186		-
104	Sirakorola F3	"	6.8	202	104	112	20.8	12.6	4.4	1	0	1.5	138		-
105	Sirakorola F4	"	7.6	280	108	145	26.4	10.2	20.9	10.1	0	16	176		1.8
106	Sirakorola F1	28/07/83	7	405	234	246	62.5	18.9	5	2.1	0.3	0.5	301		-
107	Sirakorola F2	02/04/84	7.2	294	244	140	33.6	12.6	4.4	0.6	0.1	5	170		-
108	Sirakorola F3	"	6.6	206	96	91	36	1.5	3.9	0.4	0	10	111		-
109	Sirakorola F4	"	6.8	340	136	152	40	8.7	34.5	0.3	2.5	40	186		-
110	Sirakorola F4	25/05/84	7.6	280	108	145	26.4	10.2	23.2	10.1	4.8	16	176		-
111	Tiessembougou	26/02/84	8.1	304	148	166	22.4	22.3	11.4	1.3	5.3	1.9	203		-
112	Tioribougou F2	06/01/83	6.4	66	32	48	4.8	4.8	7.3	2.4	3	0	58		-
113	Tioribougou F5	21/02/83	5.7	94	32	50	4	5.3	11	3.8	0	7	62		-
114	Tioribougou F5	06/04/83	5.8	99	44	52	12	3.4	3.7	1.1	0	1.5	63		1.2
115	Tioribougou(pt)	02/02/84	5.5	68	36	44	6.4	5	3.2	3.4	0	2.9	54		0.7
116	Tioribougou F5	04/07/83	6.4	103	52	70	8	7.8	6.2	6.5	0.8	2.2	86		-
117	Tioribougou F2	"	5.6	155	52	56	20	0.5	7.6	2.5	0	11	68		-

Annexes IV - suite - Analyses chimiques des eaux

N°	Localité	Date	PH	1/R	TH	TAC	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻⁻	NO ₃ ⁻
118	Tioribougou F5	02/02/84	5.9	107	40	79	15.2	0.5	16.8	1.9	0.5	0	96		-
119	Tioribougou F2	02/04/84	6.3	189	76	41	13.2	6.8	47.6	2.1	0	100	50		1.7
120	Tioribougou F3	"	6.7	69	32	40	8	3	4	1.6	0	0	48		1.1
121	Tioribougou F5	"	6.6	89	44	46	8.8	5.3	12.9	1.6	0	20	56		1.9
122	Warala F1	29/03/84	7.6	1575	72	34	24	2.9	2733	2.6	27	4223	42		-
123	Warala F2	24/04/84	11.1	650	52	42	20	0.5	870	2.9	1.5	1350	10	21	-
124	Wolodo F1	01/04/82	6.5	82	60	70	6.4	10.7	4.4	0.7	0	0	86		-
125	Wolodo (puits)	07/04/82	6	62	22	32	4.8	2.4	6.4	1.7	0	2.5	42		-
126	Wolodo F2	"	6	66	32	58	5.6	4.4	11.4	3	0	0	74		-
127	Wolodo F1	29/12/82	7.5	95	60	80	9.6	8.7	9.9	1.8	4.2	0	97		-
128	Wolodo F1	17/02/83	7.1	200	92	145	27.2	17.5	2.4	3.5	0	0	178		0.3
129	Wolodo F2	06/04/83	5.8	99	44	52	12	3.4	3.7	1.1	0	1.5	63		1.2
130	Wolodo F1	27/06/83	7.3	346	236	242	62	19.6	2.8	1.6	0	0.2	296		-
131	Wolodo F1	17/02/84	6.8	204	92	112	16.8	12.1	9.4	0.6	0	2.2	135		0
132	Wolodo F2	12/02/84	6.7	104	40	52	8.4	4.6	8.7	1.2	0	6.7	62		0.1

Annexes IV - suite - Analyses chimiques des eaux

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1 - Echelle stratigraphique de la feuille de Bamako Est.....	48
Tableau 2 - Répartition des débits des forages captant l'aquifère des calcaires et jaspes....	59
Tableau 3a - Forages ayant traversé la dolérite.....	62
Tableau 3b - Forages captant l'aquifère de la dolérite.....	63
Tableau 4 - Karadié - Essai par paliers de débit.....	106
Tableau 5 - Nossombougou - Essai par paliers de débit.....	115
Tableau 6 - Analyses isotopiques des eaux de la zone de Koula-Nossombougou.....	144
Tableau 7 - Pluviométrie au cours de l'année 1983 dans quelques stations météorologiques des Plateaux mandingues.....	155
Tableau 8 - Distribution mensuelle des pluies en 1983 à Tioribougou.....	160
Tableau 9 - Coefficients d'infiltration ponctuelle de quelques épisodes pluvieux au cours de l'hivernage 1983 à Tioribougou.....	173
Tableau 10 - ETP Penman durant l'hivernage.....	175
Tableau 11 - Bilan hydrique journalier à Tioribougou.....	176

LISTE DES FIGURES

	Page
Fig. 1. Mali - Situation et grands ensembles géomorphologiques.....	14
Fig. 2. Structures d'ensemble de l'Afrique.....	16
Fig. 3. Carte structurale schématique de l'Afrique.....	16
Fig. 4. Carte géologique du Mali.....	18
Fig. 5. Situation et géomorphologie de la zone de Koula-Nossombougou.....	26
Fig. 6. Réseau hydrographique.....	28
Fig. 7. Carte topographique et situation des coupes géologiques.....	29
Fig. 8. Coupe à l'Est de Ténézana.....	31
Fig. 9. Coupe du Dougouba Koulou.....	32
Fig. 10. Coupe de Bafébougou.....	33
Fig. 11. Coupes du Niagoulé Koulou.....	35
Fig. 12. Coupe du Koulouninn Kouziguina.....	36
Fig. 13. Coupe du Nomokorokoulou.....	37
Fig. 14. Coupe de Tombougou.....	38
Fig. 15. Coupe lithostratigraphique synthétique de la série de Koula-Nossombougou.....	39
Fig. 16. Esquisse géologique synthétique de la série de Koula-Nossombougou.....	47
Fig. 17. Echelle lithostratigraphique du Précambrien supérieur et du Paléozoïque du Mali Occidental.....	49
Fig. 18. Essai de reconstitution paléogéographique au Cambrien. Région Nord de Bamako.....	51
Fig. 19. Relation entre profondeur des venues d'eau et le débit.....	64
Fig. 20. Bloc-diagramme schématique de l'infiltration et des circulations d'eau dans les formations de la série de Koula-Nossombougou.....	66
Fig. 21. Dispositif Schumberger.....	71
Fig. 22. Sondage électrique.....	71
Fig. 23. Sébénikélé - Profils magnétique et électrique.....	74
Fig. 24. Tiessembougou - Profil magnétique, sondage électrique et coupe de forage.....	75
Fig. 25. Sirablé - Profils magnétique et électrique - Coupe de forage.....	76
Fig. 26. Sirablé - Sondage électrique.....	77
Fig. 27. Bassala - Profil magnétique - Coupe de forage.....	79
Fig. 28. Bassala - Sondages électriques.....	80
Fig. 29. Tombougou - Pompage d'essai : méthode de Boulton (premier essai).....	87
Fig. 30. Tombougou - Pompage d'essai : méthode de Boulton (deuxième essai).....	88
Fig. 31. Tombougou - Pompage d'essai : méthode de Jacob (premier essai).....	90
Fig. 32. Tombougou - Pompage d'essai : méthode de Jacob (deuxième essai).....	91
Fig. 33. Tioribougou - Pompage d'essai : méthode de Walton.....	94
Fig. 34. Tioribougou - Pompage d'essai : méthodes semi-logarithmiques (Jacob, point d'inflexion de Hantush). Descente.....	96
Fig. 35. Tioribougou - Pompage d'essai : méthode de Jacob. Remontée.....	98
Fig. 36. Nonkon - Pompage d'essai : méthode de Boulton.....	102
Fig. 37. Nonkon - Pompage d'essai : méthode de Jacob (descente).....	103
Fig. 38. Nonkon - Pompage d'essai : méthode de Jacob (remontée).....	104
Fig. 39. Karadié - Pompage d'essai : essai par paliers de débit.....	107
Fig. 40. Karadié - Pompage d'essai : méthode de Walton.....	109
Fig. 41. Karadié - Pompage d'essai : méthodes semi-logarithmiques (Jacob, point d'inflexion de Hantush). Descente.....	111
Fig. 42. Karadié - Pompage d'essai - Remontée.....	112
Fig. 43. Nossombougou - Essai par paliers de débit.....	114
Fig. 44. Nossombougou - Pompage d'essai : méthode de Theiss.....	116
Fig. 45. Nossombougou - Pompage d'essai : méthode de Jacob.....	117
Fig. 46. Nossombougou - Pompage d'essai : Remontée.....	118
Fig. 47. Principaux types d'anomalies rencontrées dans les pompages d'essai.....	121
Fig. 48. Eaux bicarbonatées calcaïques.....	127

Fig. 49. Eaux bicarbonatées magnésiennes.....	128
Fig. 50. Eaux bicarbonatées sodiques.....	129
Fig. 51. Eaux chlorurées.....	130
Fig. 52. Carte des teneurs en Calcium.....	132
Fig. 53. Evolution du chimisme des eaux à Massantola Ecole.....	134
Fig. 54. Carte de la concentration totale en sels dissous.....	136
Fig. 55. Diagramme Deutérium - Oxygène 18.....	146
Fig. 56. Relation entre teneur en Oxygène 18 et activité mesurée du Carbone 14 dans la zone du projet PNUD.....	146
Fig. 57. Carte piézométrique.....	152
Fig. 58. Carte pluviométrique.....	154
Fig. 59. Ajustement à la loi de Gauss : pluies annuelles à Bamako.....	156
Fig. 60. Ajustement à la loi de Gauss : pluies annuelles à Kolokani.....	157
Fig. 61. Moyenne mobile sur 5 ans.....	158
Fig. 62. Distribution des pluies mensuelles.....	158
Fig. 63. Fluctuation piézométrique à Tioribougou (puits).....	160
Fig. 64. Fluctuation piézométrique (limnigramme F5 bis) - Tioribougou.....	162
Fig. 65. Fluctuation piézométrique à Nossombougou (puits).....	162
Fig. 66. Carte géologique et coupes hydrogéologiques schématiques à Tioribougou.....	165
Fig. 67. Carte piézométrique à Tioribougou.....	166
Fig. 68. Variation de niveaux sur le réseau de puits témoins à Tioribougou.....	168
Fig. 69. Pluviométrie et évolution des niveaux dans le forage F5 bis à Tioribougou durant l'hivernage 1983.....	170
Fig. 70. Schéma de l'infiltration à Tioribougou.....	172
Fig. 71. Modèle du bilan d'eau du sol.....	174
Fig. 72. Modèle de fracture circulaire horizontale.....	190
Fig. 73. Courbe-type : fracture circulaire horizontale - Puits de pompage.....	191
Fig. 74. Courbe-type : fracture circulaire horizontale - Rabattement dans un piézomètre.....	193

TABLE DES MATIERES

	Page
INTRODUCTION.....	9
CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE MALI.....	13
1.1. CADRE PHYSIQUE.....	13
1.1.1. Situation géographique - Relief.....	13
1.1.2. Climat - Végétation.....	13
1.1.3. Hydrographie.....	15
1.2. GEOLOGIE.....	17
1.2.1. Introduction.....	17
1.2.2. Formations du socle.....	19
1.2.3. Formations sédimentaires.....	19
1.2.3.1. Infracambrien et Paléozoïque.....	19
1.2.3.2. Post-Paléozoïque.....	19
1.2.4. Tectonique.....	20
1.3. HYDROGEOLOGIE.....	20
1.3.1. Historique des recherches.....	20
1.3.2. Principaux aquifères.....	21
1.3.2.1. Aquifères discontinus.....	21
1.3.2.1. Aquifères continus.....	22
CHAPITRE II - GEOLOGIE DE LA ZONE DE KOULA-NOSSOMBOUGOU.....	27
2.1. GENERALITES.....	27
2.1.1. Situation.....	27
2.1.2. Climat.....	27
2.1.3. Géomorphologie.....	27
2.1.4. Hydrographie.....	28
2.2. GEOLOGIE.....	30
2.2.1. Description des coupes d'affleurements.....	30
2.2.1.1. Coupe à l'Est de Ténézana.....	30
2.2.1.2. Coupe du Dougouba Koulou.....	32
2.2.1.3. Coupe de Bafébougou.....	33
2.2.1.4. Coupes du Niagoulé Koulou.....	33
2.2.1.5. Coupe du Koulouninn Kouziguina.....	34
2.2.1.6. Coupe du Nomokorokoulou.....	36
2.2.1.7. Coupe de Tombougou.....	38
2.2.2. Coupe lithostratigraphique synthétique.....	38
2.2.2.1. Groupe inférieur.....	38
2.2.2.2. Groupe supérieur.....	42
2.2.3. Dolérites.....	42
2.2.3.1. Les Dykes.....	43
2.2.3.2. Les Sills.....	43
2.2.3.3. Les massifs doléritiques (Laccolites).....	43
2.2.4. Formations de recouvrement.....	45
2.2.4.1. Latérites.....	45
2.2.4.2. Alluvions - Colluvions.....	45
2.2.5. Tectonique.....	45
2.2.6. Carte géologique.....	46
2.2.7. Problème de la position stratigraphique de la série de Koula-Nossombougou.....	46
2.2.7.1. Extension de la série.....	46
2.2.7.2. Hypothèses sur ses relations avec les autres séries des Plateaux mandingues.....	48
2.2.7.3. Discussions.....	50
2.2.8. Conclusions.....	52

CHAPITRE III - HYDROGEOLOGIE DE LA ZONE DE KOULA-NOSSOMBOUGOU.....	55
3.1. AQUIFERES SUPERFICIELS.....	57
3.2. AQUIFERES OU SUBSTRATUM FISSURE.....	57
3.2.1. Contexte hydrogéologique général.....	58
3.2.1.1. Aquifères localisés.....	58
3.2.1.2. Aquifères semi-généralisés à généralisés.....	58
3.2.2. Comportement hydrogéologique des différentes formations de la série de Koula-Nossombougou.....	59
3.2.2.1. Formations du groupe inférieur.....	59
3.2.2.2. Niveau des calcaires et des jaspes.....	59
3.2.2.3. Formation du groupe supérieur.....	60
3.2.2.4. Dolérites.....	60
3.2.3. Rapport entre la profondeur des venues d'eau et le débit.....	63
3.3. CONCLUSION.....	65
 CHAPITRE IV - METHODES DE PROSPECTION ET IMPLANTATION DES FORAGES.....	67
4.1. INTRODUCTION.....	69
4.2. METHODES HYDROGEOLOGIQUES ET GEOMORPHOLOGIQUES.....	69
4.3. METHODES GEOPHYSIQUES.....	70
4.3.1. Méthodes électriques.....	71
4.3.2. Méthodes magnétiques.....	72
4.4. EXEMPLES D'IMPLANTATIONS.....	73
4.4.1. Aquifères associés aux linéaments.....	74
4.4.2. Aquifères associés à une fracturation semi-généralisé.....	74
4.4.2.1. Tiessembougou.....	74
4.4.2.2. Sirablé.....	75
4.4.2.3. Bassala.....	78
4.5. CONCLUSION.....	81
 CHAPITRE V - CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES : POMPAGES D'ESSAI.....	83
5.1. INTRODUCTION.....	85
5.2. METHODE DE POMPAGE.....	85
5.3. INTERPRETATION DES POMPAGES.....	85
5.3.1. Site de Tombougou.....	85
5.3.1.1. Hydrogéologie.....	85
5.3.1.2. Pompage.....	86
5.3.1.3. Interprétation.....	86
5.3.2. Site de Tioribougou.....	93
5.3.2.1. Géologie et hydrogéologie.....	93
5.3.2.2. Pompage.....	95
5.3.2.3. Interprétation.....	95
5.3.2.3.1. Descente.....	95
5.3.2.3.2. Remontée.....	99
5.3.2.4. Conclusions.....	100
5.3.3. Site de Nonkon.....	101
5.3.3.1. Conditions géologiques et hydrogéologiques.....	100
5.3.3.2. Pompage.....	101
5.3.3.3. Interprétation.....	101
5.3.3.3.1. Descente.....	101
5.3.3.3.2. Remontée.....	105
5.3.3.3.3. Conclusions.....	105
5.3.4. Site de Karadié.....	105
5.3.4.1. Conditions géologiques et hydrogéologiques.....	105
5.3.4.2. Pompage d'essai.....	106
5.3.4.3. Interprétation.....	106
5.3.4.3.1. Essai par paliers de débit.....	106

5.3.4.3.2. Descente.....	108
5.3.4.3.3. Remontée.....	110
5.3.4.4. Conclusions.....	113
5.3.5. Site de Nossombougou.....	113
5.3.5.1. Géologie et hydrogéologie.....	113
5.3.5.2. Pompage d'essai.....	113
5.3.5.3. Interprétation.....	115
5.3.5.3.1. Essai par paliers de débit.....	115
5.3.5.3.2. Descente.....	115
5.3.5.3.3. Remontée.....	119
5.3.5.4. Conclusions.....	119
5.4. CONCLUSIONS.....	120
 CHAPITRE VI - ETUDE GEOCHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES.....	123
6.1. INTRODUCTION.....	125
6.2. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES EAUX.....	125
6.2.1. Température.....	125
6.2.2. pH.....	125
6.2.3. Conductivité.....	125
6.3. FAMILLES CHIMIQUES.....	126
6.3.1. Eaux bicarbonatées.....	126
6.3.1.1. Eaux bicarbonatées calciques.....	126
6.3.1.2. Eaux bicarbonatées magnésiennes.....	131
6.3.1.3. Eaux bicarbonatées sodiques.....	131
6.3.1.4. Eaux bicarbonatées mixtes.....	131
6.3.2. Eaux chlorurées.....	131
6.4. GENÈSE DE LA MINERALISATION.....	131
6.4.1. Calcium - Magnésium.....	133
6.4.2. Sodium - Potassium.....	133
6.4.3. Bicarbonates.....	135
6.4.4. Chlore.....	135
6.4.5. Sulfates.....	137
6.4.6. Nitrates.....	137
6.5. CONCLUSION.....	137
 CHAPITRE VII - ETUDE ISOTOPIQUE DES EAUX SOUTERRAINES.....	139
7.1. GENERALITES.....	141
7.1.1. Deutérium - Oxygène -18.....	141
7.1.2. Tritium.....	142
7.1.3. Carbone 13 - carbone 14.....	142
7.2. ANALYSES DES RESULTATS.....	143
7.2.1. Deutérium - Oxygène 18.....	143
7.2.2. Isotopes radioactifs.....	145
7.2.3. Interprétation.....	147
7.3. CONCLUSION.....	148
 CHAPITRE VIII - PIEZOMETRIE - RECHARGE - RESSOURCE EXPLOITABLE.....	149
8.1. PIEZOMETRIE GENERALE DE LA NAPPE.....	151
8.1.1. Surface piézométrique.....	151
8.1.2. Profondeur des niveaux statiques.....	153
8.2. FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES.....	153
8.2.1. Pluviométrie.....	153
8.2.2. Fluctuations piézométriques.....	153
8.2.3. Conclusions.....	159

8.3. EVALUATION LOCALE DE LA RECHARGE : SITE DE Tioribougou.....	164
8.3.1. Introduction.....	164
8.3.2. Présentation du site de Tioribougou.....	164
8.3.3. Etude de la recharge au cours de l'hivernage 1983.....	167
8.3.3.1. Coefficient d'emmagasinement.....	167
8.3.3.2. Analyse de la recharge.....	169
8.3.3.2.1. Pluviométrie de 1983 à Tioribougou.....	169
8.3.3.2.2. Evaluation de l'infiltration par l'analyse du limnigramme.....	171
8.3.3.2.3. Evaluation de l'infiltration par la méthode du bilan d'eau du sol.	174
8.4. CONCLUSION.....	177
CONCLUSIONS GENERALES.....	179
BIBLIOGRAPHIE.....	185
ANNEXES.....	189
ANNEXE I - Méthode d'interprétation des pompages d'essai en milieu fissuré aquifère : cas d'une fissure horizontale circulaire unique.....	190
ANNEXE II - Table des valeurs des fonctions $K_0(x)$ et $e^{-x}K_0(x)$	195
ANNEXE III - Mesures des pompages d'essai.....	196
ANNEXE IV - Analyses géochimiques des eaux.....	207
LISTE DES FIGURES.....	212
LISTE DES TABLEAUX.....	213

UNIVERSITE DE GRENOBLE
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE GIGNOUX
B 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL. 0437 87 46 48

RESUME

La région de Koula-Nossombougou située à environ une centaine de kilomètres au Nord de Bamako fait partie du grand ensemble géomorphologique que constituent les Plateaux Mandingues.

L'étude géologique : coupes d'affleurement et de forage a permis d'y individualiser une série constituée de formations gréso-schisteuses dans lesquelles s'intercale un niveau de calcaires surmontés de jaspes et à laquelle nous avons donné le nom de la région.

La présence de ce niveau de calcaires et de jaspes a conduit à rattacher la série de Koula-Nossombougou à la série de Nara, cambrienne, dont elle serait séparée par le "seuil" précambrien de Kolokani-Banamba.

Les formations de la série de Koula-Nossombougou ne doivent leurs capacités aquifères qu'à la présence d'un réseau dense de fracturations et surtout à celle d'importantes intrusions de dolérites. La mise en place fissurale de ces dernières a provoqué l'élargissement des fractures et la fissuration des zones de contact favorisant l'infiltration et la circulation des eaux.

Les aquifères sont discontinus et présentent une forte hétérogénéité verticale avec la stratification des zones perméables donnant naissance à des nappes semi-captives à captives.

Le niveau des calcaires et des jaspes constitue le principal aquifère.

L'implantation des forages nécessite la mise en oeuvre de méthodes de prospections géophysiques : électrique, magnétique.

La complexité du mode d'infiltration et de circulation se reflète dans la minéralisation, la composition isotopique des eaux, ainsi que les pompages d'essai.

Malgré le déficit pluviométrique de ces dernières années, les nappes se rechargent annuellement.

MOTS-CLES

Plateaux Mandingues, série de Koula-Nossombougou, calcaires-jaspes, dolérites, aquifère fissuré, prospection géophysique, hydrodynamique, géochimie, isotope, recharge.

17 OCT. 1985

UNIVERSITE DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE-GIGNOUX
E 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL (76) 87.46.43