



HAL
open science

Hydrogéologie des formations fissurées de la partie sud du plateau Mossi entre le Nazino et le Nakambe (région de Kombissiri-Manga), Burkina-Faso

Dieudonné Yameogo

► **To cite this version:**

Dieudonné Yameogo. Hydrogéologie des formations fissurées de la partie sud du plateau Mossi entre le Nazino et le Nakambe (région de Kombissiri-Manga), Burkina-Faso. Hydrologie. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1988. Français. NNT: . tel-00756428

HAL Id: tel-00756428

<https://theses.hal.science/tel-00756428>

Submitted on 23 Nov 2012

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.

YAMEOGO (D.)



THESE

Présentée à

**L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE, TECHNOLOGIQUE
ET MEDICALE DE GRENOBLE**

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE 3ème CYCLE DE GEOLOGIE APPLIQUEE
(OPTION HYDROGEOLOGIE)**

PAR

Dieudonné YAMEOGO

UNIVERSITE DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL. 04 77 46.43

25 MARS 1988

SUJET

**HYDROGEOLOGIE DES FORMATIONS FISSUREES
DE LA PARTIE SUD DU PLATEAU MOSSI
ENTRE LE NAZINO ET LE NAKAMBE**

**(REGION DE KOMBISSIRI-MANGA)
BURKINA-FASO**

4

Soutenu en mars 1988 devant la Commission d'Examen

- | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|------------|
| Monsieur R. BARBIER | Professeur émérite, USTMG | Président |
| Monsieur J. SARROT REYNAULD | Professeur USTMG, Institut Dolomieu | Rapporteur |
| Monsieur J. ROCHAT | Professeur Pharmacie, USTMG | Examineur |
| Monsieur A. MOREL | Maître de Conférences, USTMG | Examineur |

GRENOBLE

Thèse de doctorat de l'Université Scientifique,
Technologique et Médicale de Grenoble

Titre de l'ouvrage :

**HYDROGEOLOGIE DES FORMATIONS FISSUREES DE
LA PARTIE SUD DU PLATEAU MOSSI ENTRE LE
NAZINO ET LE NAKAMBE
(Région de KOMBISSIRI - MANGA)
BURKINA - FASO**

Nom de l'auteur : Dieudonné YAMEOGO

Etablissement : Université Scientifique, Technologique et
Médicale de Grenoble

RESUME

Situé entre le Nazino et le Nakambé, le Sud du plateau Mossi connaît un climat de type soudanéen marqué par une pluviométrie en baisse et une évapotranspiration élevée.

C'est un plateau de faible altitude légèrement incliné vers le Sud, sur lequel se dessine un réseau hydrographique variable en densité qui draine toute la région vers les deux principales rivières.

Le substratum est constitué essentiellement des formations éburnéennes et birrimiennes (migmatites, granitoïdes, amphibolites, schistes et micaschistes). Sur ce bâti cristallin se met en place un réseau de fracturation complexe que révèle l'étude des photographies aériennes. Ces fractures jouent un rôle important dans l'infiltration et le stockage des eaux.

La détermination des zones aquifères en vue d'implanter les ouvrages de captage revient à localiser les fractures le long desquelles se mettent en place des nappes discontinues.

La prospection géophysique est la méthode par excellence adaptée à la recherche d'eau en pays cristallin. La productivité hydraulique des ouvrages est dépendante non de leur profondeur mais des conditions hydrogéologiques.

L'étude piézométrique a mis en évidence des zones d'alimentation et des zones de drainage à travers les altérites et les fissures du bed-rock.

L'hydrochimie montre la présence de trois types d'eaux faiblement minéralisées. Le chimisme de l'eau est en relation étroite avec la nature des formations géologiques à travers lesquelles elles circulent et le mode de circulation.

MOTS CLES

Plateau Mossi ; Soudanéen ; Altitude ; Réseau hydrographique ; Substratum ; Fracturation ; Prospection géophysique ; Productivité hydraulique ; Hydrochimie.

THESE

Présentée à

**L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE, TECHNOLOGIQUE
ET MEDICALE DE GRENOBLE**

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE 3ème CYCLE DE GEOLOGIE APPLIQUEE

(OPTION HYDROGEOLOGIE)

PAR

Dieudonné YAMEOGO

SUJET

**HYDROGEOLOGIE DES FORMATIONS FISSUREES
DE LA PARTIE SUD DU PLATEAU MOSSI
ENTRE LE NAZINO ET LE NAKAMBE**

**(REGION DE KOMBISSIRI-MANGA)
BURKINA-FASO**

Soutenu en mars 1988 devant la Commission d'Examen

Monsieur R. BARBIER

Professeur émérite, USTMG

Président

Monsieur J. SARROT REYNAULD

Professeur USTMG, Institut Dolomieu

Rapporteur

Monsieur J. ROCHAT

Professeur Pharmacie, USTMG

Examineur

Monsieur A. MOREL

Maître de Conférences, USTMG

Examineur

GRENOBLE

25 MARS 1988

UNIVERSITE DE GRENOBLE
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE-GIGNOUX
B 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL: (70) 27.46.43

AVANT-PROPOS

Au terme de ce mémoire, j'éprouve des difficultés à citer nommément les personnes qui, d'une manière ou d'une autre ont contribué à sa réalisation. La liste est longue, mais j'espère qu'elles se reconnaîtront à travers ces lignes.

A tous j'exprime ma profonde gratitude.

Mes remerciements et ma reconnaissance toute particulière vont d'abord au Professeur J. SARROT-REYNAULD, qui après m'avoir accueilli dans son laboratoire a toujours été attentif à mes difficultés de toutes dimensions. En partageant mes conditions de travail sur le terrain, lors de son passage au Burkina-Faso, il a sans doute motivé ma volonté d'atteindre l'objectif fixé par ses conseils et ses encouragements.

Je lui dois tout ce travail.

Mes remerciements vont également à Monsieur le Professeur R. BARBIER, qui me fait l'honneur de présider ce Jury. Monsieur le Professeur J. ROCHAT, de la Faculté de Pharmacie de Grenoble, pour avoir accepté juger ce travail en participant au Jury. Monsieur le Professeur A. MOREL, qui a bien voulu sacrifier son temps en participant à ce Jury.

Au camarade F.K. KOALA, Directeur Général du BUMIGEB, qui a bien voulu m'accorder tout ce temps pour terminer ce mémoire à Grenoble, malgré l'ampleur des travaux de service. Au camarade A. TAHO, Directeur des sondages et forages sans qui, ce travail aurait été impossible. En m'acceptant d'abord dans sa direction pour mon stage de terrain, il a ensuite montré à mon égard des qualités humaines tout en m'inprégnant de sa longue expérience d'homme de terrain compétent: l'amour du travail. Je ne dirai pas l'essentiel si je n'évoque pas l'aide morale et surtout matérielle dont j'ai bénéficiées de lui. En me permettant de terminer ce mémoire à Grenoble dans de bonnes conditions, il en est l'artisan. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude. Au camarade N.J. OUEDRAOGO, Directeur Général de la SOREMIB pour tout ce qu'il a fait pour moi. Au camarade A.N. SAWADOGO, Recteur de l'Université de Ouagadougou, pour ses conseils multiples. En sacrifiant son temps précieux pour m'accompagner sur le terrain, il m'a apporté tout le réconfort moral nécessaire. Au camarade P.E. GAMSONRE pour tous ses encouragements. Au camarade I.D. TIAMA, Directeur des Affaires administratives et financières du BUMIGEB pour qui des mots me manquent pour exprimer toute ma reconnaissance. Au camarade A. YOUNGARE, Chef du Personnel du BUMIGEB, pour son dévouement à la réalisation de ce travail. Au camarade A. OUEDRAOGO, Chef de matériel du BUMIGEB, qui m'a toujours mis à l'aise devant mes difficultés matérielles. Au camarade B. OUEDRAOGO, Ingénieur des Mines à la SOREMIB pour m'avoir initié aux travaux de géologue et son acharnement à l'apparition de ce mémoire.

A toute l'administration du BUMIGEB pour l'intérêt qu'elle porte à ce travail en facilitant mon voyage à Grenoble.

Ma reconnaissance va à tout le personnel du BUMIGEB dont la franche collaboration a permis de réaliser ce travail dans un cadre enthousiasmé.

Aux équipes de Failing 1 et pompage 1 avec à leur tête I. KABRE et T. DABRE. Je dois les résultats obtenus, à leur dévouement au travail et à leur franche collaboration durant mes longs séjours sur le terrain.

Il m'est agréable de remercier Monsieur J.C. CEUPENS, Chef de mission D.I.W.I. au Burkina Faso pour m'avoir placé à la tête d'une équipe de prospection géophysique et avoir mis à ma disposition du matériel technique pour les mesures in-situ des caractéristiques physiques de l'eau.

Mademoiselle J. ALARY du laboratoire de la Faculté de Pharmacie de Grenoble pour l'aide qu'elle m'a apportée lors des analyses chimiques de mes échantillons d'eau. Madame CORDEAU du laboratoire d'Hydrogéologie de l'Institut Dolomieu, qui a bien voulu sacrifier son temps au dosage de mes échantillons d'eau. J'adresse toute ma reconnaissance à Madame N. REVOL pour le talent avec lequel elle a assuré la frappe de ce mémoire.

Je remercie mes amis T.H. DJEUDA qui a consacré beaucoup de temps à m'aider dans les analyses chimiques de mes échantillons d'eau et au traitement informatique de la fracturation. J.P. JOURDA, N. SORO, B. SIAKA, A. GLAO, D. INZA, C. EBA et ceux de 3ème cycle dont la collaboration a créé des conditions idéales de travail.

A mes Parents, dont les encouragements et la patience ont été un réconfort moral nécessaire à la poursuite de mes études, je dis merci.

A tous, j'exprime ma profonde gratitude

--

A la mémoire de mon Père,

A mon Oncle M.R. YAMEOGO

A mon Père aîné A. YAMEOGO

A mes Parents

A mes amis

RESUME

Situé entre le Nazimo et le Nakambé, le Sud du plateau Mossi connaît un climat de type soudanéen marqué par une pluviométrie en baisse et une évapotranspiration élevée.

C'est un plateau de faible altitude légèrement incliné vers le Sud, sur lequel se dessine un réseau hydrographique variable en densité qui draine toute la région vers les deux principales rivières.

Le substratum est constitué essentiellement des formations éburnéennes et birrimiennes (migmatites, granitoïdes, amphibolites, schistes et micaschistes). Sur ce bâti cristallin se met en place un réseau de fracturation complexe que révèle l'étude des photographies aériennes. Ces fractures jouent un rôle important dans l'infiltration et le stockage des eaux.

La détermination des zones aquifères en vue d'implanter les ouvrages de captage revient à localiser les fractures le long desquelles se mettent en place des nappes discontinues.

La prospection géophysique est la méthode par excellence adaptée à la recherche d'eau en pays cristallin.

La productivité hydraulique des ouvrages est dépendante non de leur profondeur mais des conditions hydrogéologiques.

L'étude piézométrique a mis en évidence des zones d'alimentation et des zones de drainage à travers les altérites et les fissures du bed-rock.

L'hydrochimie montre la présence de trois types d'eaux faiblement minéralisées. Le chimisme de l'eau est en relation étroite avec la nature des formations géologiques à travers lesquelles elles circulent et le mode de circulation.

Mots clés

Plateau Mossi; soudanéen; altitude; réseau hydrographique; substratum; fracturation; prospection géophysique; productivité hydraulique; hydrochimie.

INTRODUCTION

L'eau est une ressource naturelle nécessaire et indispensable tant pour l'homme que pour le milieu naturel qui l'entoure.

Le problème de l'eau se pose avec acuité dans certaines régions du Monde, notamment dans les pays du Sahel auxquels appartient le Burkina-Faso.

Dans ce pays, beaucoup de centres urbains et ruraux connaissent des problèmes d'eau en saison sèche. Ainsi, dans les provinces du Zoundwéogo (Manga) et du Bazéga (Kombissiri), les habitants dès Décembre sont obligés de se déplacer sur plusieurs kilomètres pour s'approvisionner en eau de qualité d'ailleurs douteuse.

C'est dans le cadre de la résolution de ces problèmes que depuis 1983 des grands projets d'hydraulique villageoise tendant à doter chaque village d'au moins un forage (selon les densités) ont vu le jour.

C'est dans la réalisation de ces projets que la banque islamique du développement (B.I.D.) a financé l'exécution de 425 forages positifs dans les régions de Tiébélé, Manga, Kombissiri, Zorgho où se situe notre secteur d'étude.

Cela nous a permis d'apporter notre modeste contribution, d'une part à l'implantation et à l'exécution de ces forages et d'autre part de bénéficier des résultats obtenus afin de compléter nos investigations hydro-géologiques du secteur concerné.

TRAVAUX ANTERIEURS EFFECTUES DANS LA ZONE

1/ Sur le plan géologique

J. SAGATZKY dans sa publication "Géologie et ressources minières du Burkina-Faso (Haute-Volta) méridional" fournit une carte géologique à l'échelle 1/500.000 du degré carré de Tenkodogo.

En 1957, J. DUCCELLIER à partir de la carte 1/500.000 de Ouagadougou qui se prolonge sur le degré carré de Tenkodogo individualise le secteur riche en pegmatites de Kaïbo (Lilgomdè).

Entre 1962 et 1967, des travaux de recherches géologiques et géophysiques ont été entrepris respectivement par la société anonyme de prospection aéroportée, par la campagne générale de géophysique, par F. LACHAU, L.F. BONNARD et enfin par J. VOGT.

En 1971, R. TRINQUART dresse une carte au 1/200.000 de Tenkodogo.

2/ Sur le plan hydrogéologique

En 1965, Y. DERREAL et J. ARCHAMBAUT fournissent des données hydrogéologiques pour l'équipement des cercles de Léo et Zabré. Toutes ces études ont été faites de façon ponctuelle et aucune carte au 1/200.000 couvrant notre secteur n'existe. Nous avons dû grâce aux levés géologiques et aux lames minces confectionnées, vérifier les cartes géologiques locales, dresser une esquisse géologique de l'ensemble du secteur concerné.

Dans le domaine hydrogéologique, les travaux antérieurs s'étaient plutôt préoccupés de résoudre les problèmes aigus de manque d'eau de certains villages. Ce qui ne permettait pas sans doute de mener une étude hydrogéologique régionale pouvant aboutir à des résultats concluants. Il a donc fallu avec les données déjà existantes entreprendre une étude générale pour aboutir aux résultats que nous avons obtenus.

PREMIERE PARTIE
BREF APERCU SUR LA GEOGRAPHIE ET SUR LA GEOLOGIE
DU BURKINA FASO

1 - APERCU GEOGRAPHIQUE

2 - APERCU GEOLOGIQUE

3 - TECTONIQUE

CHAPITRE I
BREF APERCU SUR LA GEOGRAPHIE ET SUR LA GEOLOGIE
DU BURKINA FASO

--

I - APERCU GEOGRAPHIQUE

1.1 - Position géographique du Burkina-Faso en Afrique de l'Ouest

Le Burkina-Faso se situe au coeur de l'Afrique occidentale (ex. A.O.F.). Il est limité au Nord et à l'Ouest par la République du Mali, au Sud par les Républiques de Côte-d'Ivoire, du Ghana, du Togo, du Bénin et à l'Est par la République du Niger (Fig.1).

1.2 - Relief

Le pays forme une vaste pénéplaine d'altitude moyenne, 320 m, légèrement pentée vers le Sud. Cependant, on note du Nord au Sud-Ouest, des collines à sommet souvent latéritique d'orientation générale sud-ouest - nord-est correspondant aux sillons birrimiens. L'altitude de ces collines ne dépasse pas 600 mètres (Fig.2).

1.3 - Hydrographie

Sur le plan hydrographique, le Nord et le Nord-Est du pays sont drainés par les affluents du fleuve Niger. Au centre, au Sud ainsi qu'à l'Ouest le drainage se fait par les Voltas noire, rouge et blanche. La Comoé elle, prend sa source dans les plateaux gréseux de Bobodioulasso et draine tout le Sud-Ouest du pays. De ces cours d'eau, seules la Comoé et la Volta noire restent pérennes (Fig.3).

1.4 - Le climat

Par sa position géographique, le Burkina Faso connaît un climat de type soudanéen caractérisé par deux saisons bien distinctes:

- . une saison pluvieuse de Juin à Octobre avec un maximum de précipitations en Août-Septembre;
- . une saison sèche allant d'Octobre à Juin.

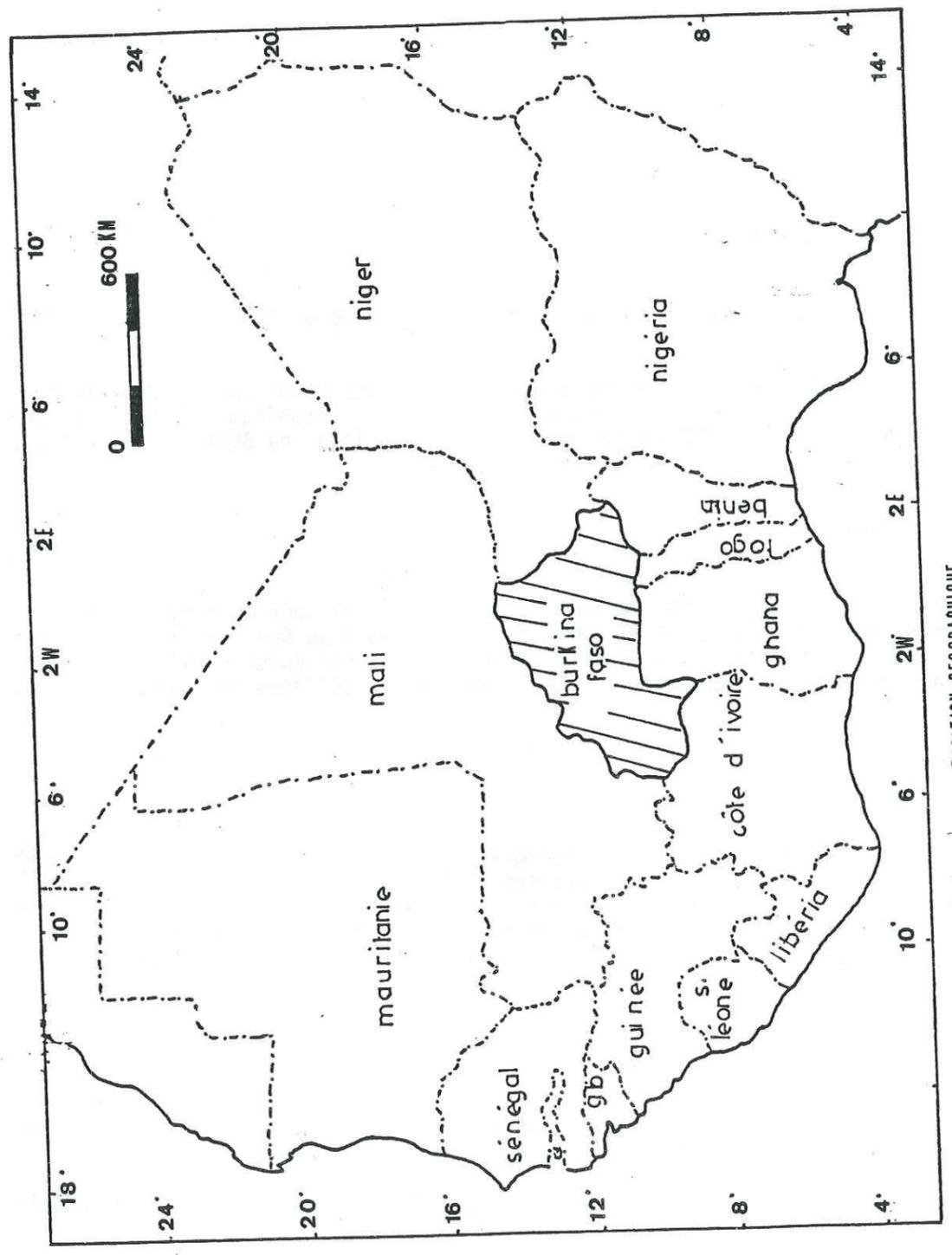


FIG 1 BURKINA FASO : POSITION GEOGRAPHIQUE

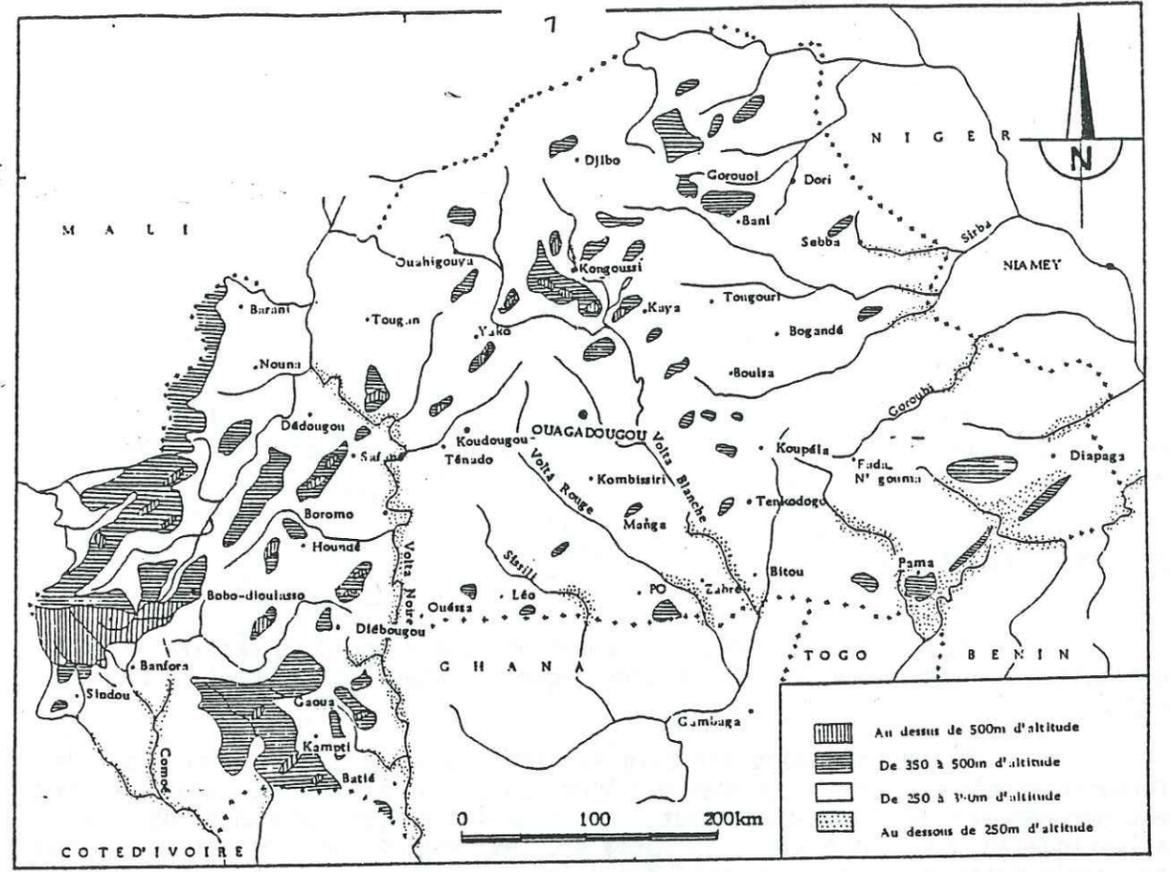


fig2 carte physique du burkina faso

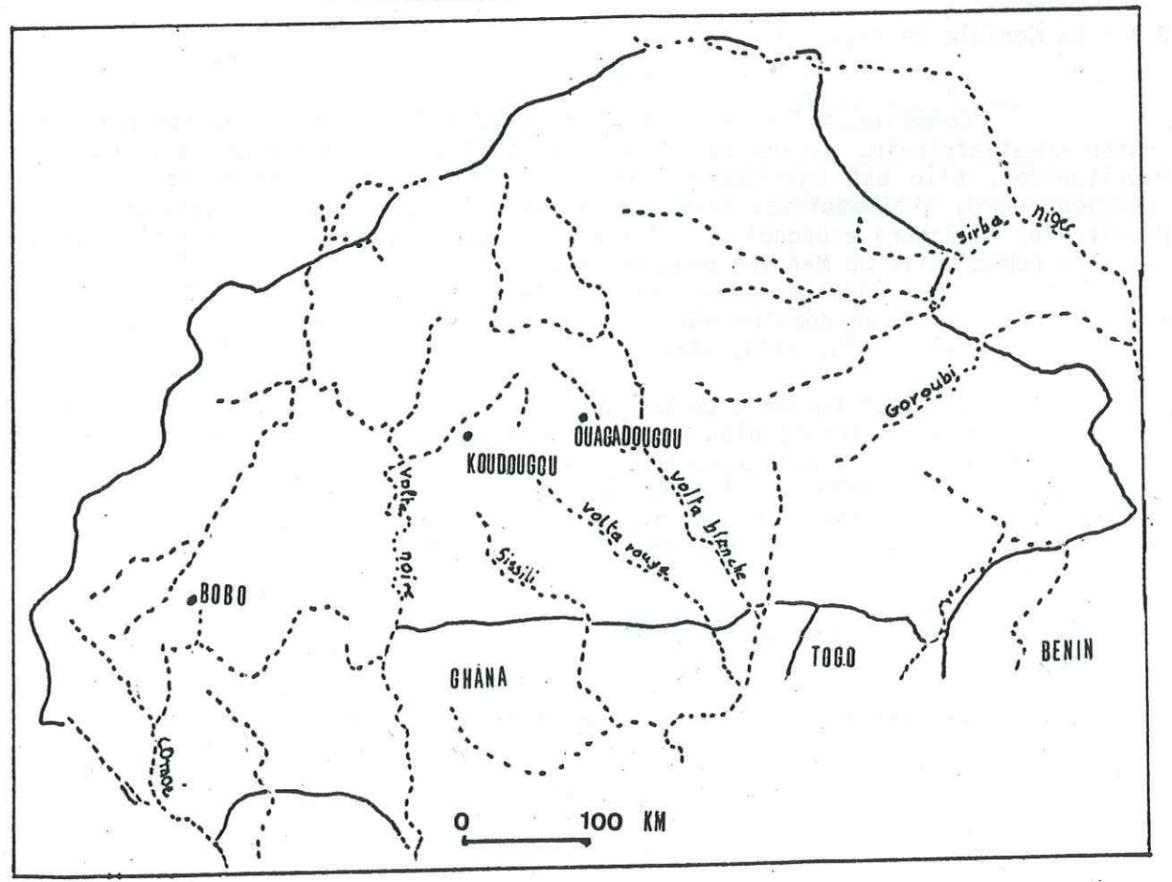


FIG 3 BURKINA FASO : RESEAU HYDROGRAPHIQUE

J.P. BASSOT a distingué trois séries dans les granites et formations métamorphiques de Kéniéba-Kédougou. Ce sont les séries de:

- . Mako
- . Dialé
- . Daléma

La série de Mako se caractérise par des formations volcaniques surtout basiques, mises en place dans une fosse marine, qui représentent la base du Birrimien au Sénégal oriental (BASSOT, 1984).

Cette série forme une bande étroite et est limitée à l'Est par les séries birrimiennes du Dialé et du Daléma à dominante sédimentaire avec des dépôts de type plate-forme épicontinental (BASSOT et VACHETTE, 1984).

Ces séries du Dialé et du Daléma semblent correspondre à deux parties d'une même formation séparées par le massif granitique de SARAYA. Ce sont des séries à caractères détritiques dans lesquelles s'est mis en place le complexe volcano-plutonique calco-alcalin (BASSOT, 1985).

Les diverses granitisations qui les affectent sont pour les unes syn- ou tarditectoniques et pour les autres post-tectoniques. Des radiodatations effectuées sur ces granites ont donné des âges compris entre -2000 et -2100 MA correspondant ainsi à une mise en place au cours de l'orogénèse éburnéenne. De ce fait, les fenêtres de Kayes et de Kéniéba formeraient avec les formations birrimiennes des témoins intéressants de l'orogénèse éburnéenne entre les parties nord et sud du craton ouest-africain (Fig.5).

2.3 - La dorsale de Man (Léo)

La dorsale de Man intéresse aussi bien la Guinée, le Mali, la Sierra-Léone, le Libéria, la Côte-d'Ivoire, le Niger, le Ghana que le Burkina-Faso. Elle est limitée au Sud par l'Océan Atlantique, à l'Est par la chaîne du Mont-Togo et le bassin des Volta et à l'Ouest par la chaîne des Rokélides d'âge pan-africain. Au Nord, elle est couverte en discordance par les formations du protérozoïque supérieur du bassin de Taoudéni et/ou par les sédiments de la chaîne pan-africaine (J. BERTRAND, SARFARTI, A. MOUSSINE-POUCKINE en 1987).

Deux domaines composent la dorsale de Man:

- . le domaine Kénéma-Man d'âge archéen (-3000 à -2500 MA) constitué par les formations libériennes;

- . le domaine Baoulé-Mossi composé de formations libériennes reprises par l'orogénèse éburnéenne et de formations déposées au cours du Birrimien (2400 à 1500 MA).

Ce domaine comporte deux zones bien distinctes:

- . La Sasca caractérisée par les formations libériennes bien conservées;

- . et la zone où les reliques du libérien sont rares et méconnaissables.

Ainsi définies, les formations de la dorsale de Man ont subi deux cycles orogéniques connus qui sont le cycle libérien, le plus ancien et le cycle éburnéen. Le libérien regroupe les formations antérieures à 2500 MA et selon B. BESSOLES, il est possible qu'il existe un socle catarchéen, à condition bien sûr de vérifier cela par des calculs isochroniques.

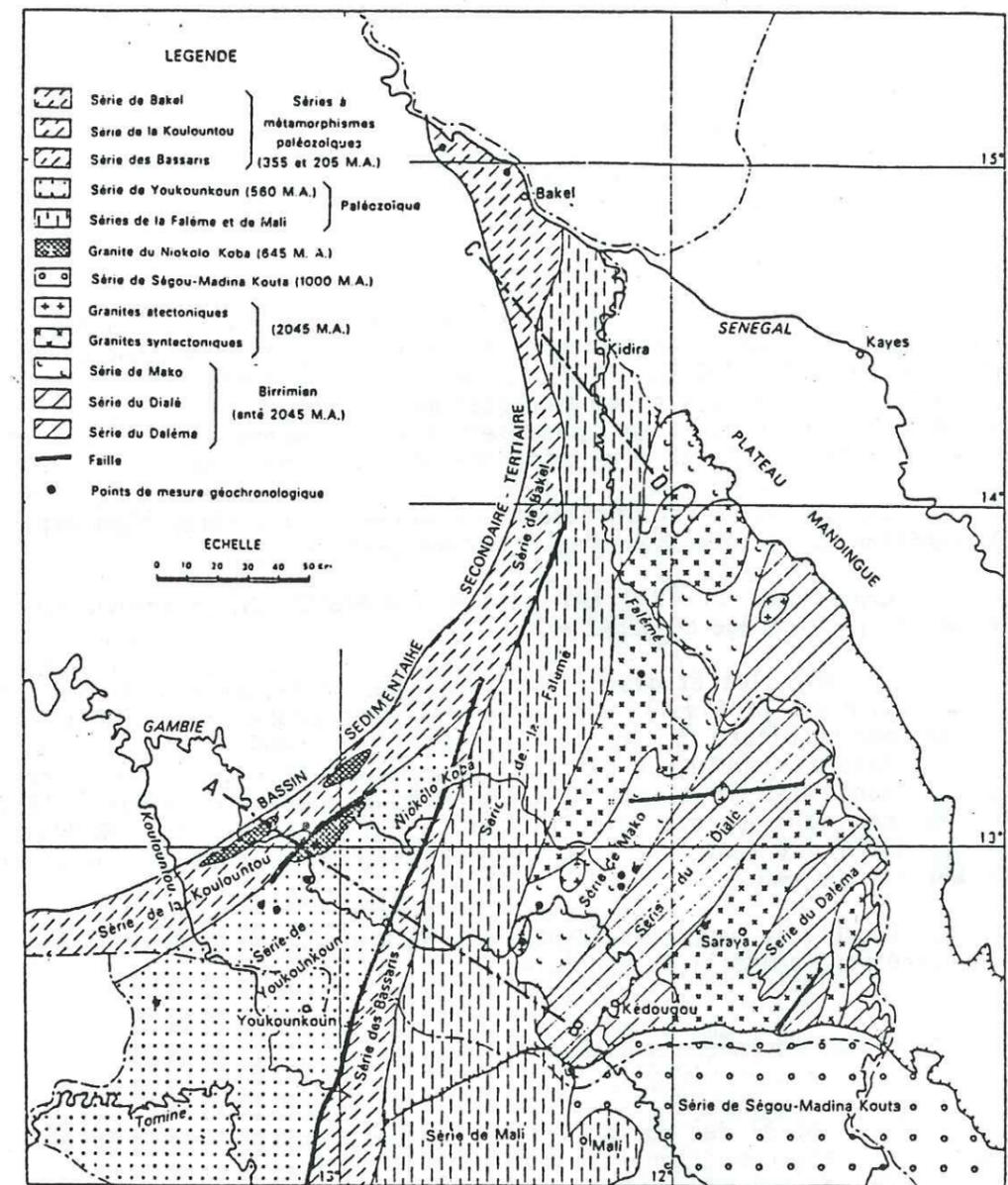


Figure 5 Carte géologique des formations précambriennes et paléozoïques du Sénégal oriental (BASSOT, 1969). Contexte géologique de la série de Mako.

Les formations libériennes couvrent la majeure partie de la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Burkina-Faso, le Niger, le Mali et le Nord-Est de la Guinée. Mais ce sont des formations qui ont subi des transformations importantes dans le domaine Baoulé-Massi auquel appartient notre terrain d'étude. C'est un domaine comme nous l'avons dit précédemment qui est affecté intensément par l'orogénèse éburnéenne.

Le type Sasca bien représenté au Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire a pour formations essentielles celles du Kénéma-Man: amphibolites, granites, granodiorites, granites subpegmatitiques gneissifiés que nous avons d'ailleurs vu lors d'une excursion géologique dans la région en 1982. Ces formations sont d'âges compris entre -3300 et -2850 MA d'après les mesures géochronologiques de (PAPON et al., 1968; J. CAMIL et al., 1984). Certains granites pourraient toutefois être birrimiens comme le fait remarquer B. BESSOLES (1978).

Au Burkina-Faso, les gneiss sont considérés comme appartenant au Libérien, surtout les gneiss anatectiques à composition trondjémite du Protérozoïque inférieur, P. TEMPIER (1986). Il en est de même pour les leptynites, les métabasites, les schistes et micaschistes variés nés d'un métamorphisme sans doute mésozoïque, sur lesquels se surimposerait un métamorphisme épizoïque d'âge éburnéen qui efface l'ancienne orientation des roches archéennes.

Cet ensemble est fortement migmatisé et granitisé. Son appartenance au Libérien est hypothétique et très controversée.

Cependant, en 1970 LAY (cité par MARCELLIN) a trouvé sur une amphibolite de Kpéré un âge de -2642 +/- 35 MA.

En 1984, les études de A.N. SAVADOGO sur les migmatites et amphibolites du bassin de la Sissili ont donné des âges probables de -3300 MA et 3200 MA. Tous ces résultats impliquent l'existence d'un Libérien dans le domaine Baoulé-Mossi. Mais il semble que ces âges sont isolés et doivent être vérifiés par des datations U/Pb en cours (M. CAEN-VACHETTE, 1986; P. TEMPIER, 1986). Notons enfin que dans le complexe du Ntem au Sud Cameroun, Anne NEDELEC et Emmanuel N. NSIFA ont daté par la méthode Rb-Sr 2890 +/- 270 MA le granite charnockitique d'Ebolowo.

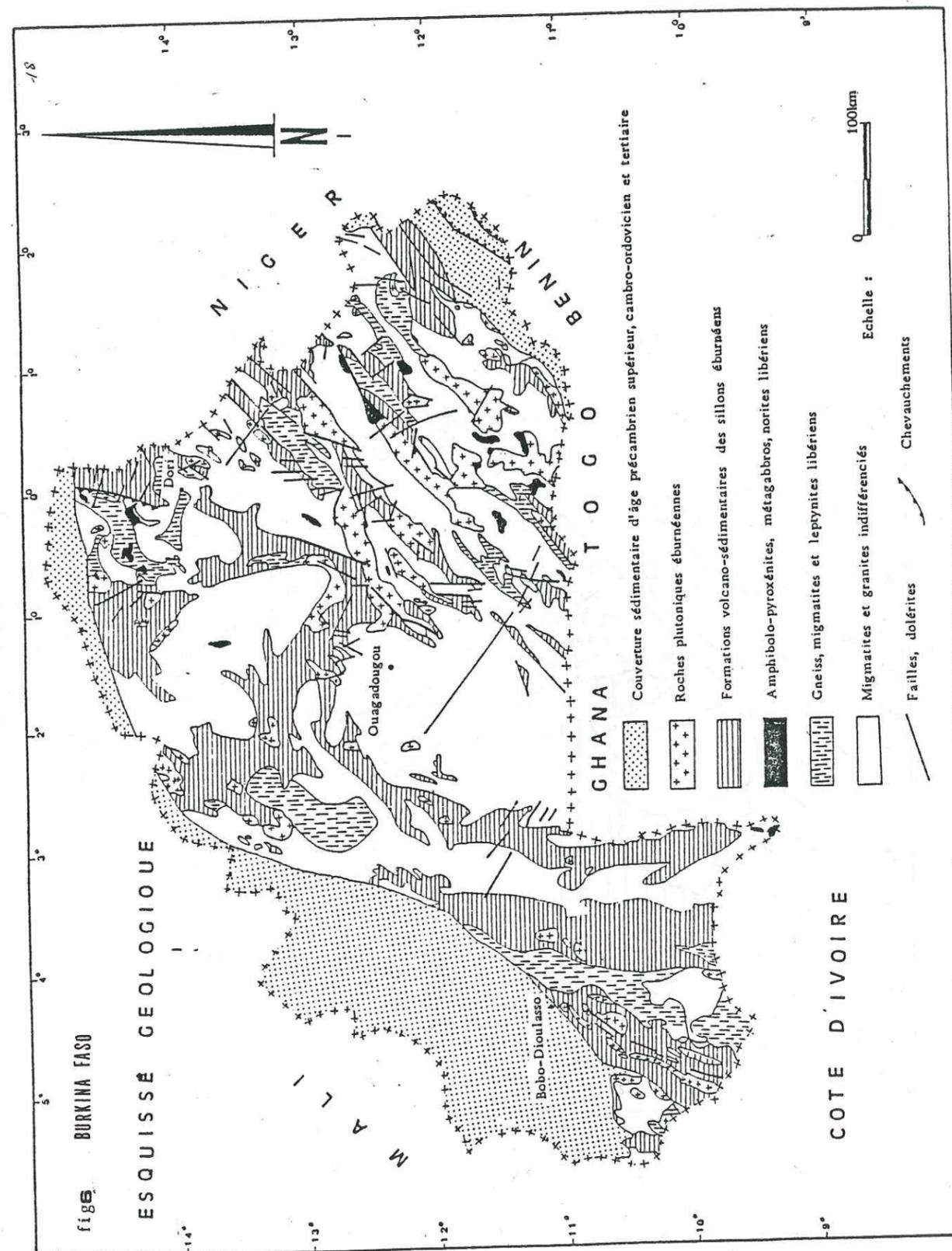
Quant à la partie occidentale du Burkina-Faso l'élément géologique essentiel correspond aux sillons birrimiens.

2.4 - Les formations éburnéennes du Burkina-Faso

L'essentiel des formations se compose d'orthogneiss et migmatites à amphiboles et biotites, roches orientées formées par la migmatisation de roches volcaniques et subvolcaniques ou encore par la recristallisation en cours d'orogénèse d'anciens granites.

2.4.1 - Les gneiss à biotite

Ce sont des roches de teinte grise avec une texture orientée composées de quartz engrenés, microclines, myrmékites, biotites vertes observables à côté des schistes dans certains régions.



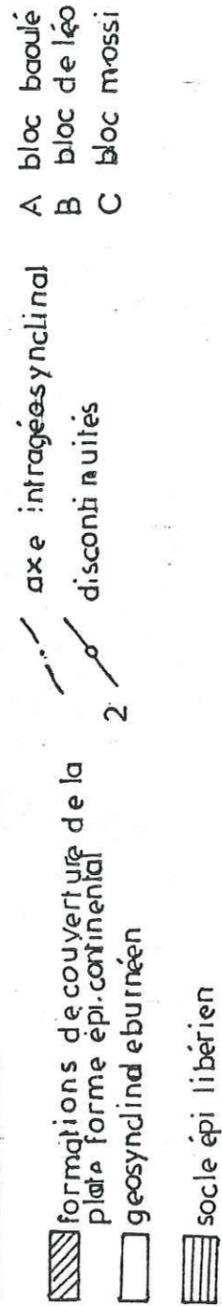
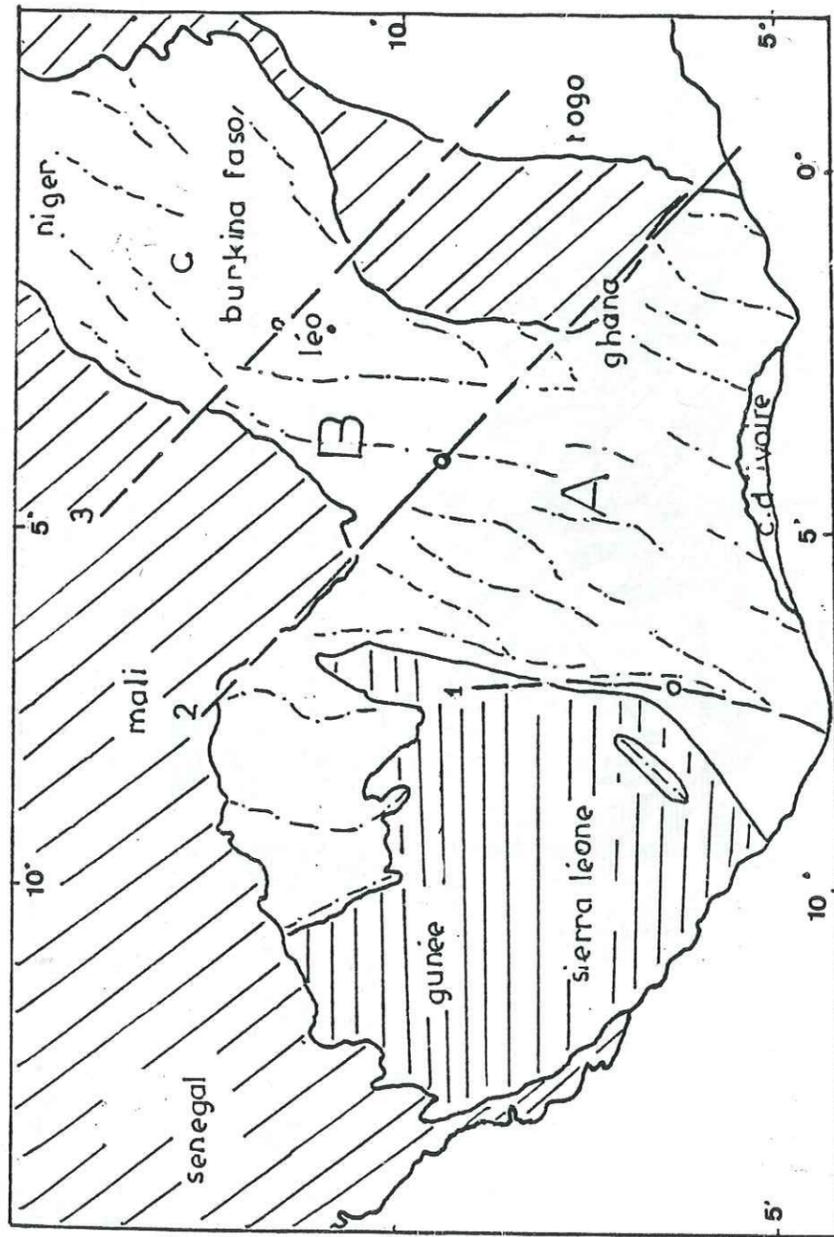


FIG 7 ORGANISATION STRUCTURALE DU GEOSYNCLINAL EBURNEEN PAR B. TAGINI . 1971

2.4.2 - Les migmatites

Ce sont des roches à texture orientée, de teinte claire, pauvres en ferromagnésiens avec des grains de quartz plus gros que ceux des gneiss.

2.4.3 - Les granites calco-alcalins

Parmi ces granites on distingue:

. les granites à biotite gris clairs peu ou pas orientés à grains moyens ou gros avec parfois des filons d'aplite et de pegmatite sans micas comme celui de Sinikiéré au Nord-Est de Manga;

. les granites migmatitiques, granites aplitiques liés aux migmatites en bouffés diffuses ou en massif, Fig.6.

3 - TECTONIQUE

L'observation de la carte de l'organisation structurale du domaine éburnéen dressée par B. TAGINI en 1971, fig.7, montre le partage du bouclier Baoulé-Mossi en trois blocs A, B et C par les discontinuités de la Léraba (2) et de la Volta Rouge (3). Ces discontinuités vont entraîner des changements de directions au niveau des sillons birrimiens de ce bouclier. Au Sud, les directions sont NE-SW. Au niveau du bloc B, elles deviendront pratiquement N-S, puis de nouveau NE-SW au niveau du bloc C tout à fait au Nord.

DEUXIEME PARTIE

POSITION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU SECTEUR D'ETUDE

1 - POSITION GEOGRAPHIQUE

2 - GEOLOGIE DU SECTEUR ETUDIE

CHAPITRE II

POSITION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU SECTEUR D'ETUDE

—

1 - POSITION GEOGRAPHIQUE

La zone d'étude se situe au Sud du Burkina-Faso entre Kombissiri au Nord et le territoire ghanéen au Sud.

D'une superficie d'environ 4800 km², elle est comprise entre les longitudes 0°50' et 1°35' Ouest et les latitudes 11° et 12°35' Nord.

Au Nord elle est située entre la Volta rouge et la Volta blanche. Sa partie sud, plus effilée, traverse en diagonale la Volta rouge au niveau de la forêt classée de cette dernière près de Nobéré. Fig.8.

1.1 - Relief

Ce secteur constitue un vaste plateau légèrement incliné vers le Sud. Dans sa partie nord, prennent naissance les affluents des Voltas blanche et rouge, situées respectivement à l'Est et à l'Ouest.

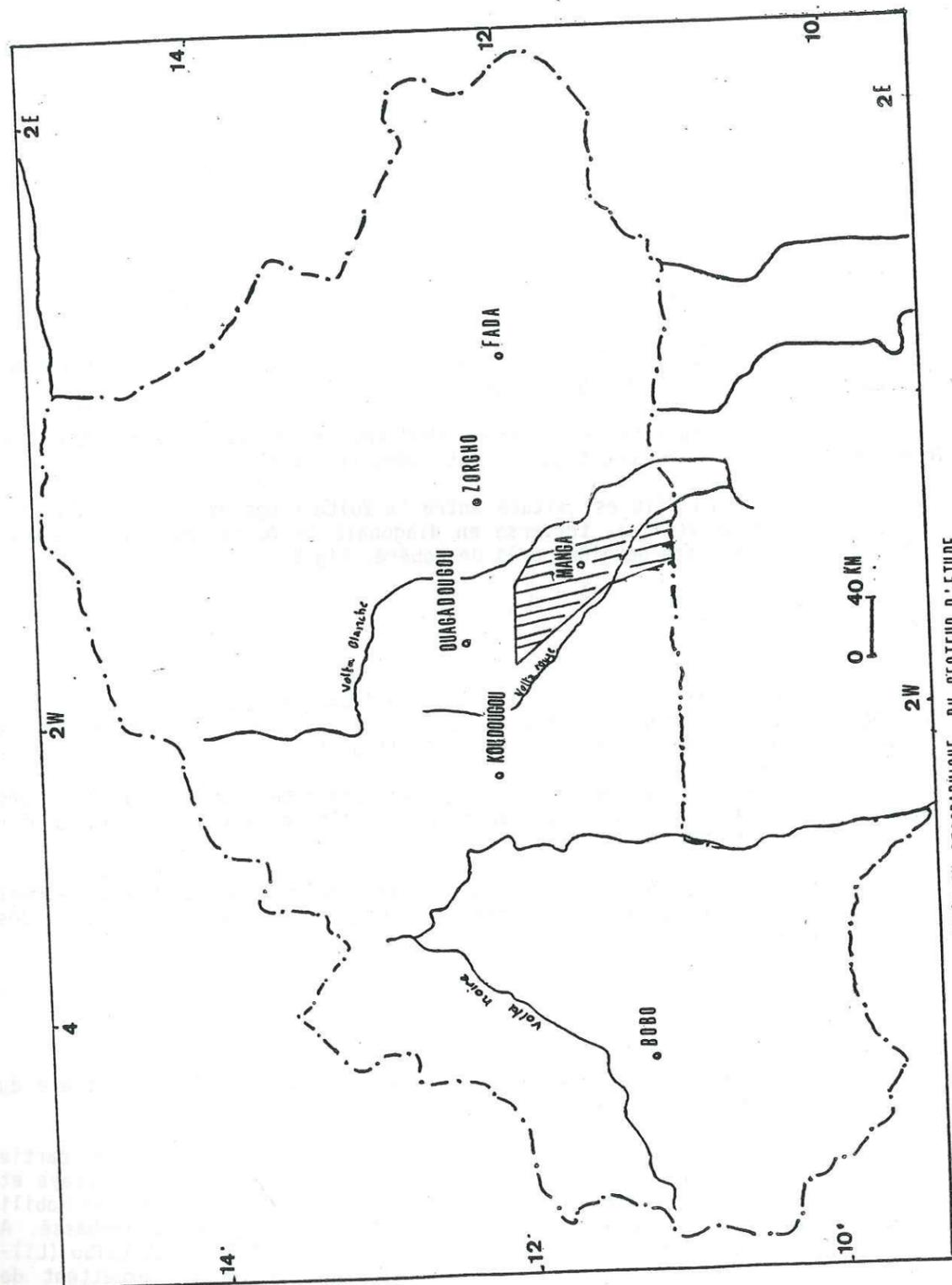
Sur le plan morphologique, les altitudes de ce plateau sont comprises entre 220 m et 320 m, avec toutefois le pic Nahouri au Sud qui culmine avec ses 447 m à Tiébélé.

Ça et là sur ce plateau se dressent des petites collines à sommet latéritique, non bauxitique, autour desquelles on peut remarquer souvent des affleurements rocheux.

1.2 - Voies d'accès

La zone est accessible par la route Ouagadougou-Pô-frontière du Ghana, route orientée sensiblement nord-sud.

Kombissiri se trouve à 42 km de Ouagadougou sur cet axe. Sa partie nord-ouest est accessible par la route Ouagadougou-Léo, passant par Rakaye et Silimba. En descendant toujours vers le Sud, donc vers Pô et au niveau de Nobili une bifurcation descendant vers le Sud-Est conduit à Manga et à Yambassé. A partir de Manga, de nombreuses pistes, dont celle menant à Bindé et Kaïbo (Lil-gomdé) qui intersecte la route Nobili-Kaïbo, Manga-Sakouilga, permettent de parcourir toute la zone malgré les problèmes que pose souvent un réseau hydrographique dense en hivernage. De Pô, l'accès à tous les sites de forage le long de la route Pô-Tiébélé est possible jusqu'à l'extrême sud-est du secteur.



1.3 - Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est lâche sur le plateau central depuis Sakouilga au Sud de Manga jusqu'à Douougou à l'Ouest de Kombissiri (0,41 km/km²).

A ce niveau, seuls le Bazéga au Sud-Ouest de Toécé, le Kouilibé et le Soussogou au Nord de Mandié constituent les principales rivières.

Bien qu'aucune d'entre elles ne garde l'eau toute l'année, des retenues d'eau sont aménagées en vue de l'alimentation en eau des populations et du bétail en saison sèche.

Ce réseau est partagé en deux par une ligne oblique qui va de Tuili au Nord-Ouest de la zone d'étude à Basbédo au S-E de Manga.

Le plateau ouest est drainé vers la Volta Rouge, tandis que la Volta blanche draine la partie est. L'Est de Kaïbo et toute la partie sud du secteur d'étude présentent un réseau hydrographique bien dense (1,28 km/km²). A ce niveau, les rivières les plus importantes sont l'Ibamboué, un affluent de la Volta Rouge au Nord de Tiébélé et le Sinia au Sud de Mouma.

Volta blanche et Volta Rouge constituent avec la Volta noire les principales rivières du pays qui se jettent toutes en territoire Ghanéen (Fig.9).

1.3.1 - Nature du réseau hydrographique

Nous avons évoqué dans le chapitre précédent le fait qu'il existe une différence dans la répartition des cours d'eau entre les différentes parties du secteur d'étude. BOURGUET L., dans une étude menée en 1980 en Côte d'Ivoire a donné des exemples de types de réseau hydrographique dans lesquels nous retrouvons parfaitement ceux de notre secteur notamment.

1.3.2 - Le type 4

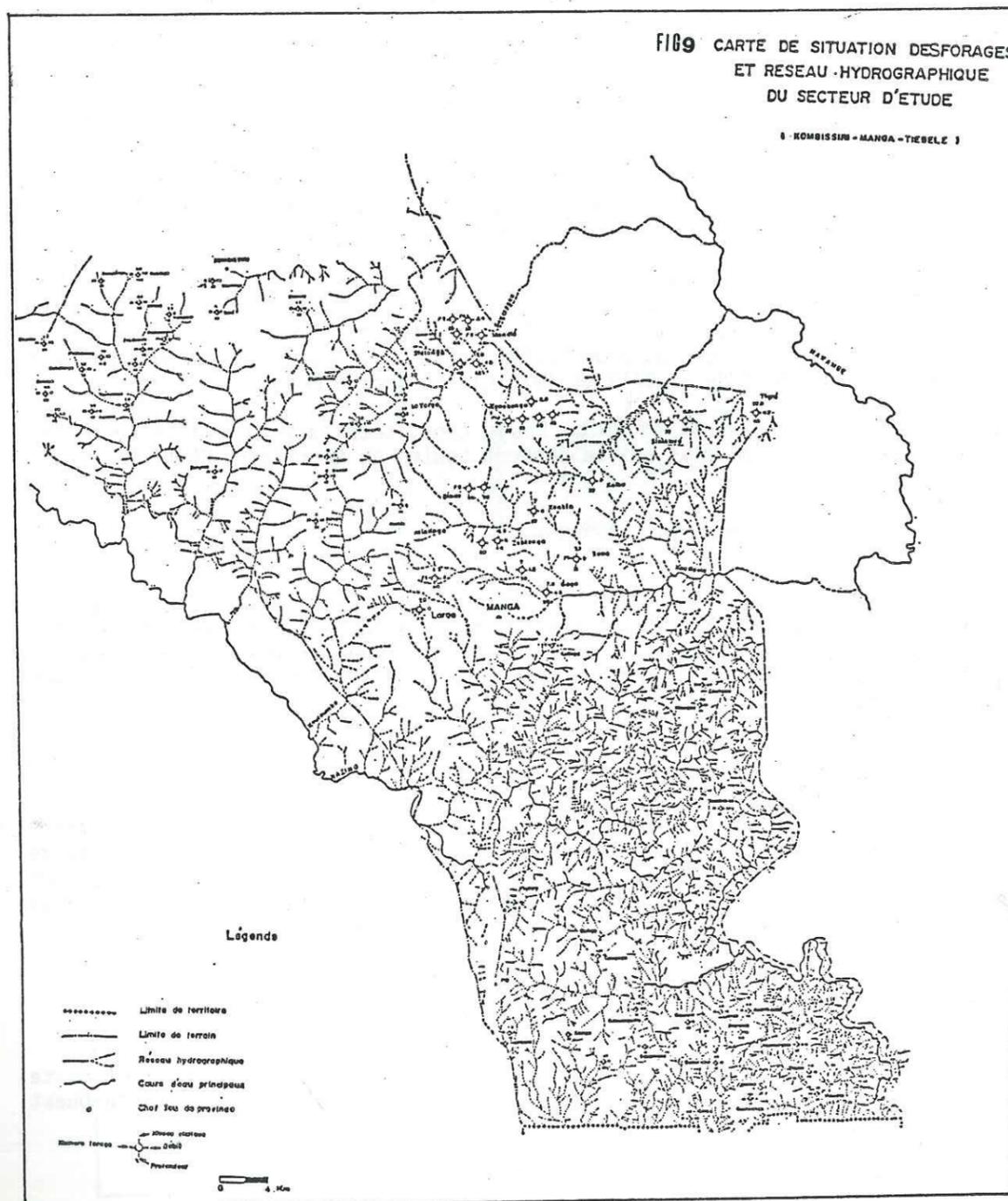
Il est celui caractérisant le bouclier libérien formé essentiellement de roches gneissiques, de granites et de granito-gneiss. Le réseau de cette zone est très varié. Souvent à tendance polygonale, il est parfois orthogonal ou alors présente de larges plages avec des marigots parallèles. Nous trouvons ce type dans la partie est du secteur d'étude.

1.3.3 - Le type 6

C'est un type de zone schistes-granite. Le réseau est ici mixte d'allure parallèle ou courbe. Nous le trouvons au Sud de Manga et au Nord-Ouest de notre zone.

1.3.4 - Le type 7

Il caractérise un réseau de terrains schisteux avec de nombreux affluents parallèles orientés sur une direction principale de fracturation. La schistosité est parfois soulignée par de petits affluents rectilignes.



L'existence d'affluents courbes souligne une grande épaisseur d'altération ou une fracturation peu importante. Fig.10

Nous reviendrons sur le réseau hydrographique après l'étude géologique du secteur pour montrer son importance en cartographie et en hydrogéologie. En attendant, il faut dire que la particularité du réseau hydrographique en zone sub-sahélienne comme celle de notre terrain est qu'il ne suit pas exactement le tracé des failles comme en zone forestière. L'examen de la carte de fracturation va nous le montrer clairement.

1.4 - Climat

Notre secteur d'étude connaît toutes les caractéristiques du climat soudanésien que nous avons définies pour l'ensemble du pays au début de ce mémoire.

1.4.1 - Détermination des termes du bilan hydrologique

Bien que notre terrain d'étude ne soit pas un bassin versant, nous avons tout de même tenu à déterminer les facteurs du bilan qui pourront nous donner une idée sur le devenir des eaux de pluie donc des réserves en eau souterraine du secteur concerné.

1.4.2 - La température

Nous avons déjà dans le chapitre précédent donné ses caractéristiques, du moins ses amplitudes de variation. Le tableau ci-dessous donne l'évolution de la température du centre de la zone entre 1976 et 1985. Ces valeurs représentent la moyenne des températures maximales à 12 heures sous-abri mesurées à l'O.R.D. de Manga.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
Températures maximales à 12 heures sous-abri	33	36,1	37,8	38,2	32,5	32	31,4	30,5	31	28,2	34,8	24,2	33,3

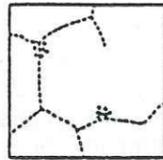
Tableau 1: Valeurs moyennes des températures maximales 1976-1985 mesurées à l'ORD de Manga.

1.4.3 - L'Humidité relative

L'humidité relative est une valeur qui varie au cours de l'année. Cette variation semble suivre l'alternance des deux saisons dont nous avons parlé. Elle passe d'une valeur minimale en saison sèche, à une valeur maximale en saison pluvieuse dans le secteur. Le tableau 2 indique les valeurs moyennes de l'humidité relative, mois par mois, pendant la période 1976-1985 à l'O.R.D. de Manga.



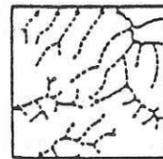
RESEAU TYPE 1
Réseau hydrographique d'allure courbe ou arrondie ("chaus fleur") délimitant des interfluvés larges, arrondis ou allongés. Thalweg à fond plat, nombreuses zones inondables.
— d'après carte topographique 1/200 000 de Boumbali.



RESEAU TYPE 2
Réseau polygonal à 3 directions proches de 120° avec tronçons rectilignes de plusieurs kilomètres. Aspect "nid d'abeille" ou panneaux anguleux allongés.
— calqué sur photo aérienne n° UNOP 45/192.1/50 000.

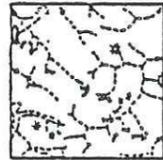


RESEAU TYPE 3
Réseau rectiligne à 2 directions orthogonales ou obliques, avec petits affluents courts. Inselbergs à parois verticales.
— calqué sur photo aérienne n° 72 CIV 026/500/039.1/50 000.



RESEAU TYPE 4 : ZONE GEOLOGIQUE DU BOUCLETTIER LIBERIEN
Le bouclier libérien formé essentiellement de roches paléozoïques, comprend également des granites, des granito-gneiss et des roches vertes.
Le réseau hydrographique de cette zone est très varié, le plus souvent à tendance polygonale, il est parfois orthogonal ou encore présente de larges piéges avec des tronçons parallèles notamment à proximité des grands marigots.
— d'après carte topographique 1/200 000 d'Odienne.

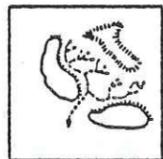
RESEAU TYPE 5 : ZONE FORESTIERE
La couverture forestière ne permet pas de percevoir sur photos l'allure du réseau hydrographique.



RESEAU TYPE 6 : ZONE INDETERMINEE SCHISTES
Réseau avec d'allure parallèle ou courbe avec présence de quelques îlots inondables et de nombreuses caïsses sur l'interfluvé.
— d'après carte topographique 1/200 000 de Korhogo.



RESEAU TYPE 7 et 8 : SCHISTES
Nombreux affluents parallèles orientés sur une direction principale de fracturation. La schistosité est parfois soulignée par de petits affluents rectilignes.
La présence de quelques affluents à allure courbe indique soit une plus forte teneur d'altération, soit une fracture liée mais importante.
— d'après cartes topographiques 1/200 000.



RESEAU TYPE 9 : ROCHES VERTES
Réseau érigé très dense et ramifié sur le pourtour des collines, vite regroupé à l'aval pour franchir les glacis caïssés périmétriques.
— d'après cartes topographiques 1/200 000.

Réseaux en zone birimienne

FIG 10 Exemples de types de réseaux hydrographiques en Côte-d'Ivoire (BOURGUET L. 1980) où apparaît également la variation de la densité du réseau en fonction des faciès pétrographiques

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
Humidité relative en %	17	25	38	42	40	61	72	56	24	21	20	18	36,1

Tableau 2: Valeurs moyennes de l'humidité relative à l'O.R.D. de Manga pendant la période 1976-1985

1.4.4 - Les précipitations

Notre secteur est compris entre les isohyètes 800 au Nord et 1000 mm dans la région de Tiébélé au Sud. FIG 11

Le tableau 3 nous donne les valeurs des précipitations dans les différentes localités du secteur en cours de décennie.

Localités	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total/an et par localité
Tiébélé		1.6	0.4	15	28.1	101	116.1	210	234.1	200	98	2.2	1.2	1007.7
Manga					26	99	108	202.4	300.1	194	62.3	2	4.5	998.3
Béré					19	92.5	100.7	201.6	291.4	196	53	1.3	2.1	897.2
Toécé					17.1	92	93.4	188.4	274	173	52.4	0.9	-	891.2
Kombissiri				1.2	15	98	97.7	197	258.1	182	48.8	1.4	0.8	900
Doulougou				0.1	21	79	90.8	152	260	170.1	46.08	1.04	1	821
Total mois par mois		1.6	0.4	16.3	126.2	561.2	606.7	1151.4	1617.7	1115.1	360.58	7.84	9.6	Moyenne annuelle
Moyenne mois par mois		0.26	0.06	2.7	2.1	93.3	101.1	191.9	269.6	185.8	60	1.2	1.6	919.2

Tableau 3 - Précipitations dans le secteur d'étude 1976-1985

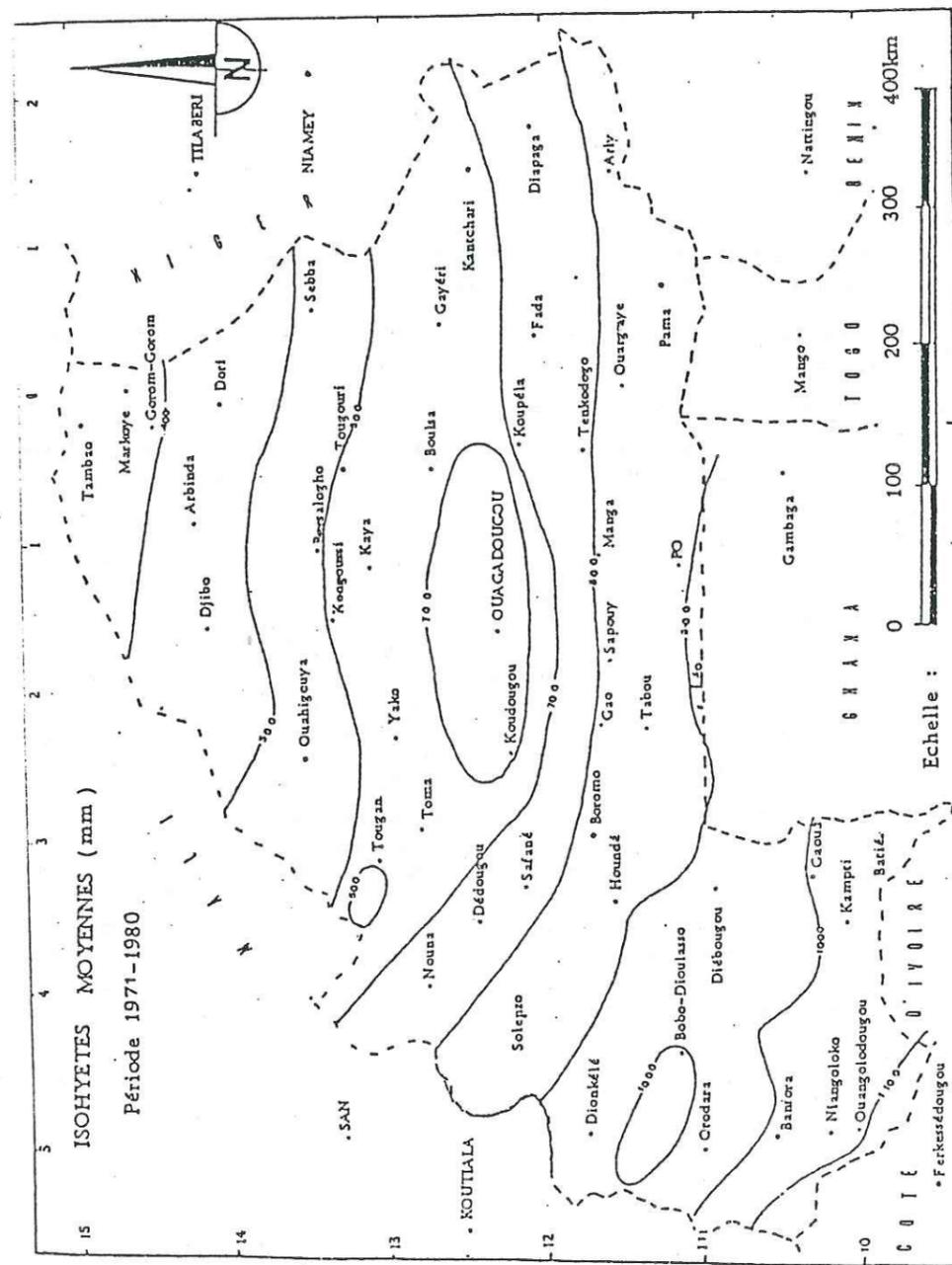


Fig.11

La représentation graphique de ce tableau montre un pic prononcé en Juillet, Août et Septembre qui sont des mois marqués par des fortes pluies au cours de l'année. C'est pendant ces mois que la moyenne de l'année est dépassée. Fig.12.

On constate donc par rapport à ces résultats que la pluviométrie varie dans le temps et dans l'espace, puisque les valeurs maximales sont atteintes au Sud (Tiébélé), alors qu'elles deviennent faibles au Nord (Doulougou). La figure 13 montre justement deux isohyètes moyennes des vingt dernières années.

On peut remarquer sur cette figure une baisse de la pluviométrie entre 1961 et 1984. Cette baisse se poursuit puisque entre 1984 et 1987, les hauteurs des pluies recueillies çà et là sont déficitaires par rapport aux valeurs des années précédentes.

1.4.5 - L'insolation

Elle est représentée ici mois par mois et en heures sur le tableau 4 qui regroupe les résultats obtenus à l'O.R.D. de Manga.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Insolation en heures	262.8	269.8	267.1	270.7	264.08	252	239	230	219	271,9	293	278

Tableau 4 : Valeurs moyennes de l'insolation entre 1971 et 1985 à l'O.R.D. de Manga

1.4.6 - Le ruissellement

Une première station de jaugeage installée en 1965 au pont de la route Ouagadougou - Pô sur la Volta rouge a été réinstallée en 1973 sur le nouveau pont plus en aval. Cette station nous a permis de suivre dans le temps les variations du débit en fonction des hauteurs d'eau.

N° Jaugeage	Hauteur d'eau (en m)	Q (m3/s)	Dates
1	0.19	0.68	3/7
2	0.5	2	24/7
3	1.55	10.12	5/8
4	2.14	16	3/9
5	2.54	21.5	26/9
6	1.5	9	4/10

Tableau 5: Tableau de jaugeage au pont de Nobéré de Juillet à Octobre

FIG 12 - Variation des précipitations en fonction du temps

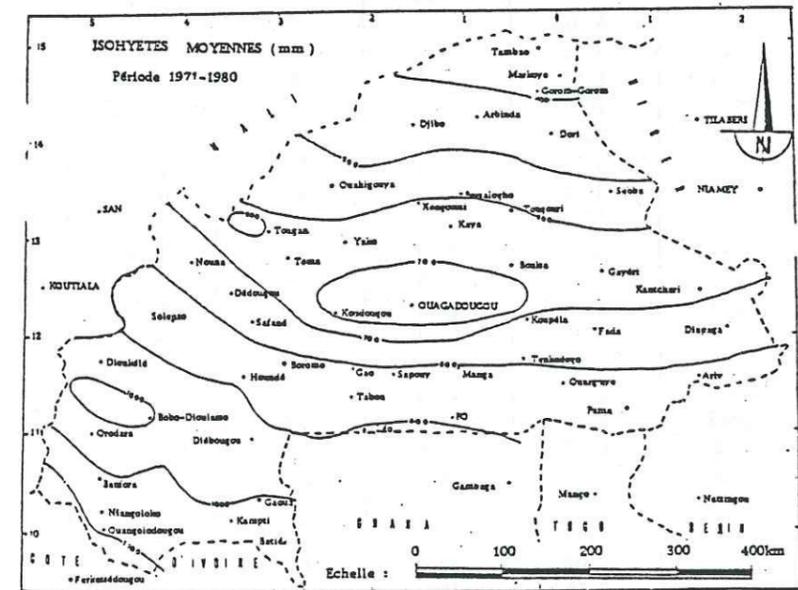
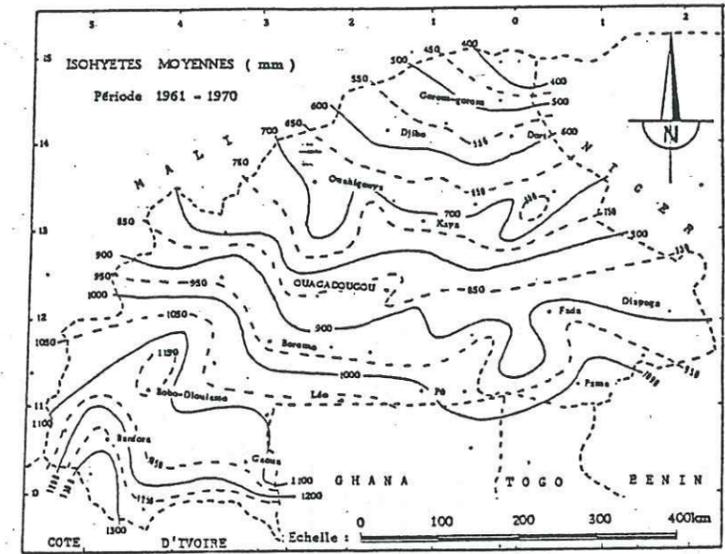
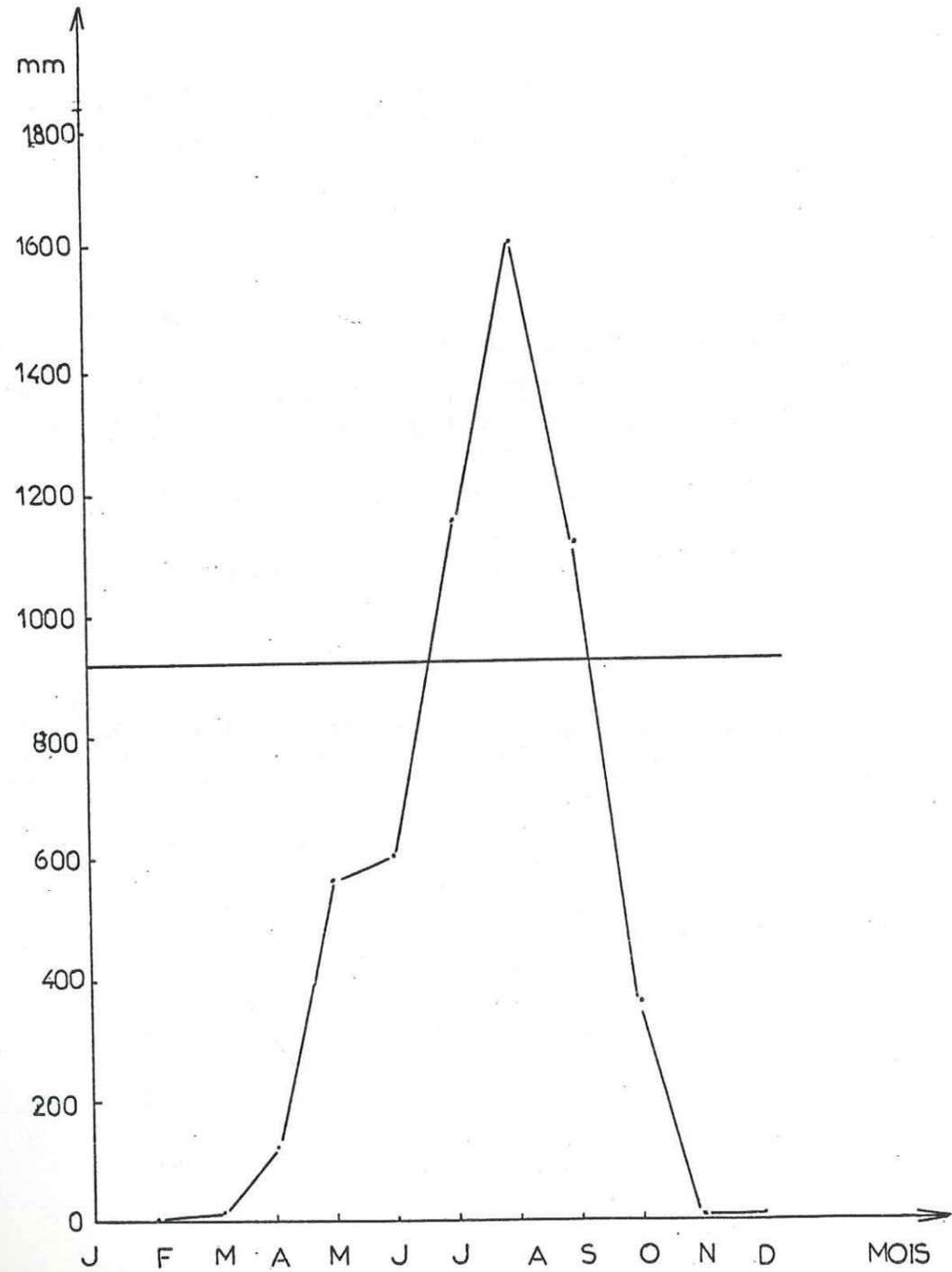


FIG 13 - Isohyètes moyennes de 1961 à 1980

A partir de ce tableau nous avons obtenu la courbe de tarrage ci-dessous. Fig.14.

Le tableau 6 donne la valeur des débits journaliers en 1984. Cela nous a permis d'estimer les débits moyens des cours d'eau pendant la période d'écoulement et de nous rendre compte qu'il existe une relation étroite entre débits et précipitations.

Le jaugeage effectué n'étant pas celui d'un bassin versant, nous considérons seulement la surface correspondant à la quantité d'eau écoulée sous le pont de Nobéré.

N°	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre
1			5.83	26.3	2.96	4.56
2		0.89	9.71	37.8	1.99	1.85
3		1.77	11.9	43.0	1.84	0.27
4	0.563	2.56	12.4		1.57	0.22
5	4.56	2.84	9.75		1.35	0.196
6	8.29	3.40	6.04			0.196
7	10.1	3.15	8.34	47.6	1.23	0.172
8	10.9	4.02	11.8	45.1	2.41	0.149
9	11.3	4.31	16.6	42.2	2.62	0.175
10	13.8	3.28	24.3	41.7	2.02	0.109
11	17.4	1.83	29.4	43.1	1.06	0.091
12	21.9	2.76	29.7	43.3	0.918	0.091
13	23.5	3.47	25.6	43	0.790	0.075
14	20.1	3.65	22.1	39.4	0.677	0.075
15	14.5	2.99	21.6	35.1	0.616	0.075
16	7.21	2.43	22.6	30.5	0.609	0.075
17	3.39	3.43	22.8	25.4	0.580	
18	3.52	3.21	21.5	19.5	0.543	
19	4.40	3.78	20.5	12	0.491	
20	3.01	2.77	24.7	5.89	0.446	
21	1.47	1.46	29.0	3.89	0.484	
22	0.861	2.37	27.3	3.69	0.491	
23	0.662	4.27	24.7	4.99	0.524	
24	0.79	4.17	30.8	4	0.498	
25	0.836	5.34	39.1	3.36	0.484	
26	0.722	6.25	46.5	2.75	0.465	
27	0.640	4.61	41.5	2.2	0.446	
28		5.03	38.1	2.45	0.511	
29		5.59	34.8	3.14	0.575	
30		4.19	30.3			
Moyennes	6.20	3.33	22.8	25.8	1.12	0.48

Moyenne
9.9 m³/s

17.31 m³/s

Tableau 6 - Débits journaliers de la Volta rouge à Nobéré

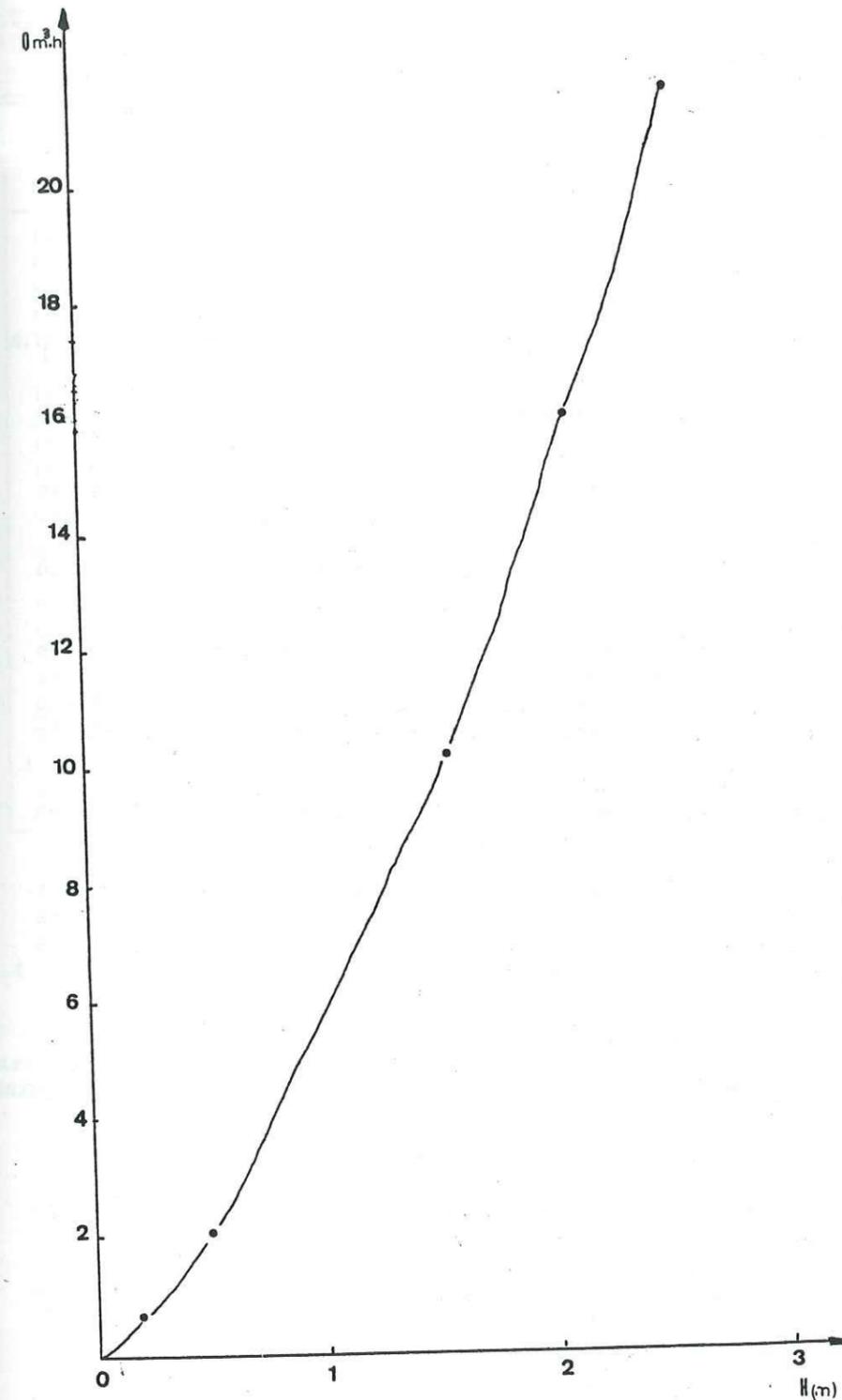


FIG 14 COURBE DE TARAGE DE LA VOLTA ROUGE A NOBERE

1.4.7 - L'Evapotranspiration

L'enrichissement en eau de l'atmosphère est dû d'une part à l'évaporation directe à partir des plans d'eau et d'autre part à la transpiration des végétaux qui participent au transfert de l'eau du sous-sol à l'atmosphère. On regroupe alors ces formes de perte d'eau sous le terme global d'évapotranspiration dans l'établissement du bilan

$$P = E + R + I$$

1.4.7.1 - Détermination de l'E.T.P.

On sait depuis fort longtemps qu'en présence d'un couvert végétal continu, l'E.T.P. tend vers des valeurs maximales.

Elle ne dépend pas des espèces végétales, mais est fonction des facteurs atmosphériques.

Beaucoup de chercheurs ont abouti à des formules pouvant à partir des paramètres climatiques permettre le calcul de l'E.T.P. d'une région donnée.

Chaque formule est applicable spécifiquement dans le contexte où elle est mise au point.

Pour notre part, l'I.R.A.T. (Institut de Recherches Agronomiques Tropicales) a mené des études dans la région notamment à Sarria et à Mogtéo et a montré par la même occasion que les trois formules conduisant aux résultats les plus homogènes et proches des valeurs mesurées étaient celles de **BLANEY-CRIDDIE**; **WAKER** et **TURC**.

Des études analogues menées dans les pays voisins notamment en Côte d'Ivoire ont abouti aux mêmes conclusions.

C'est pourquoi nous avons choisi celle de **TURC** qui effectivement dans la pratique donne des valeurs vraisemblables, comparables aux valeurs mesurées. Mais l'application de cette formule doit se faire en tenant compte des périodes où l'humidité relative est maximale.

Selon cette formule:

$$E.T.P. = (I_g + 50) \times 0,40 \frac{t}{t+15}$$

avec

$$I_g = I_{gA} \left(0,18 + 0,62 \frac{h}{H} \right)$$

I_g = Radiation solaire globale exprimée en petite calorie par cm² de surface horizontale et par jour.

I_{gA} = Energie de la radiation solaire qui atteindrait le sol en l'absence d'atmosphère exprimée en cal/cm²/jour. Elle ne dépend que de la latitude et est fournie par les tables d'Angot.

$\frac{h}{H}$ = Insolation relative

ou h = Durée d'insolation en heures mesurée à l'héliographe

H = Durée atmosphérique du jour exprimée dans la même unité que h . La valeur H ne dépendant que de la latitude du lieu.

H est donné par les tables d'Angot.

Pour une humidité relative $< 50\%$

$$E.T.P. = (I_g + 50) \times 0,40 \frac{t}{t+15} \left(1 + \frac{50 - Hr}{70} \right)$$

Le tableau 7 donne les valeurs de l'E.T.P. calculée de la région (Manga) mois par mois.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
I_{gA}	736	804	866	896	894	886	890	885	867	815	645	710
H	357	331	374	371	393	384	394	388	366	368	348	354
h	262.8	269.8	267.1	270.7	264.08	252	239	230	219	271.9	293	278
h/H	0.73	0.81	0.71	0.72	0.67	0.65	0.60	0.59	0.59	0.73	0.84	0.78
$0.18 + 0.62 \frac{h}{H}$	0.63	0.68	0.62	0.62	0.59	0.58	0.55	0.54	0.54	0.63	0.70	0.66
I_g	463	546.7	536.92	555.5	527.4	513.8	489.5	477.9	468.18	513.4	451.5	468.5
$I_g + 50$	513	596.7	586.9	605.5	577.4	563.8	539.5	527.9	518.18	563.4	501.5	518.5
t^0	33	36.1	37.8	38.2	32.5	32	31.4	30.5	31	28.2	34.8	24.2
$t^0 + 15$	48	51.1	52.8	53.2	47.5	47	46.4	45.5	46	43.2	49.8	39.2
$\frac{t^0}{t^0 + 15}$	0.68	0.70	0.71	0.73	0.68	0.68	0.67	0.67	0.67	0.65	0.69	0.69
$0.40 \frac{t^0}{t^0 + 15}$	0.27	0.28	0.28	0.29	0.27	0.27	0.26	0.26	0.26	0.26	0.27	0.24
Hr	17	25	38	42	40	61	72	56	24	21	20	18
$50 - Hr$	33	25	22	8	10				26	29	30	32
$1 + \frac{50 - Hr}{70}$	1.47	1.35	1.31	1.11	1.14				1.37	1.41	1.42	1.45
E.T.P. mensuelle	203.6	225.5	215.2	194.9	177.7	152.2	140.2	137.2	184.5	206.54	192.27	180.4
E.T.P. annuelle	2 2 1 0, 1 mm											

Tableau 7: Calcul de l'ETP par la formule de L. TURC (station météorologique de Manga)

1.4.7.2 - Détermination de l'évapotranspiration réelle

Il existe plusieurs méthodes de détermination de l'évapotranspiration réelle parmi lesquelles nous appliquerons celles de **COUTAGNE**, **TURC** et **THORNTHWAITE**.

a/ L'E.T.R. par la formule de **COUTAGNE**

L'expression de l'E.T.R. suivant cette formule est:

$$E.T.R. = P - \lambda P^2 \quad (P \text{ étant exprimé en m})$$

$$\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14T}$$

La formule de **COUTAGNE** est valable pour les régions où P est compris entre

$$\frac{1}{8\lambda} \quad \text{et} \quad \frac{1}{2\lambda}$$

Dans notre cas, nous obtenons une valeur de 770 mm. Pour l'évapo-transpiration réelle.

b/ L'E.T.R. par la formule de TURC

Suivant cette formule l'expression de l'évapotranspiration réelle

s'écrit:

$$E.T.R. = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad \text{avec} \quad \begin{matrix} P \text{ (mm)} \\ T \text{ (}^\circ\text{C)} \\ ETR \text{ (mm)} \end{matrix}$$

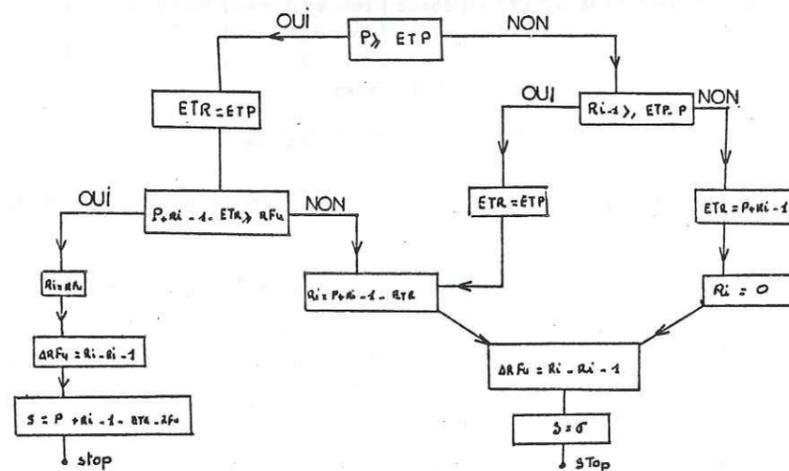
$$L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$$

E.T.R. = 928,4 mm dans notre cas.

c/ L'E.T.R. selon la méthode du bilan de THORNTHWAITE

Dans le calcul de l'E.T.R. par le bilan de THORNTHWAITE, l'évapo-transpiration potentielle et la précipitation interviennent. Nous tiendrons compte aussi que le sol a une réserve de 100 mm. C'est le R.F.U. qui est la quantité maximale d'eau que le sol peut retenir de l'écoulement.

L'organigramme ci-dessous permet non seulement de déterminer l'E.T.R. mais aussi d'autres valeurs comme la réserve utile et le déficit.



Mois	P (mm)	ETP (mm)	R Fu (mm)	ETR (mm)	S	Ri	D	Exc
J	0,26	203,6	0	0,26	0		203,3	
F	0,06	225,5	0	0,06	0		225,0	
M	2,7	215,2	0	2,7	0		212,5	
A	2,1	194,9	0	21	0		173,9	
M	93,3	177,7	0	93,9	0		51,1	
J	101,1	152,2	51,7	101	0		51,1	
J	191,9	140,2	100	140,2	0	51,7		51,7
A	269,6	137,2	100	137,2	132,4			132,4
S	185,8	184,2	100	184,2	1,6			1,6
O	60	206,5	46,5	60	0	-146,5		
N	1,2	192,27	0	46,5	0		148,07	
D	1,6	180,4	0	46,5	0		136,2	
TOTAL	919,2	2209,87		833,7				

Tableau 8 : Bilan moyen annuel du secteur d'étude pendant la période 1976-1985

Le tableau 9 est un tableau comparatif des différentes valeurs de l'E.T.R. obtenues à partir des méthodes de COUTAGNE, TURC et de THORNTHWAITE

Formule	ETR (mm)
COUTAGNE	772,0
TURC	928,4
THORNTHWAITE	833,7

tableau 9

Nous constatons que la valeur obtenue de l'ETR par le bilan de THORNTHWAITE est intermédiaire entre celles de COUTAGNE et de TURC. Nous la retiendrons pour l'établissement du bilan hydrologique.

d/ Le ruissellement

Nous avons donné dans le tableau 6 le débit moyen du cours d'eau. En considérant cette valeur, nous avons pu déterminer le volume d'eau écoulé sous le pont de Nobéré. Il est de 13,46 10³ m³.

Ramené à la superficie du secteur concerné par l'écoulement soit 2/3 de la superficie totale, nous avons déterminé la hauteur d'eau correspondant à ce volume. Elle est de 42 mm.

e) L'Infiltration

L'équation du bilan est:

$$P = E + R + I$$

connaissant les autres termes du bilan, nous pouvons déduire l'infiltration

$$P = E + R + I$$

$$I = P - (E + R) \text{ soit } 919,2 \text{ mm} - (833,7 + 42) = 43,5 \text{ mm}$$

Le tableau 10 représente alors le bilan hydrologique du secteur

P (mm)	E (mm)	R (mm)	I (mm)
919,2	833,7	42	43,5
%	90,6	4,5	4,7

Tableau n°10: Tableau du bilan hydrologique

En considérant ce bilan dans le tableau ci-dessus, nous constatons que 4,7 % seulement des eaux de pluies s'infiltrent dans le sous-sol et participent ainsi à l'alimentation des nappes souterraines.

On comprend donc que lorsque les pluies cessent, le niveau piézométrique des nappes baisse pour ne remonter qu'en hivernage.

La figure 15 représente des courbes de fluctuation des nappes en fonction des périodes. Nous reviendrons d'ailleurs sur la fluctuation des niveaux piézométriques pour montrer qu'il existe d'autres facteurs qui interviennent de façon importante.

2 - GEOLOGIE DU SECTEUR D'ETUDE

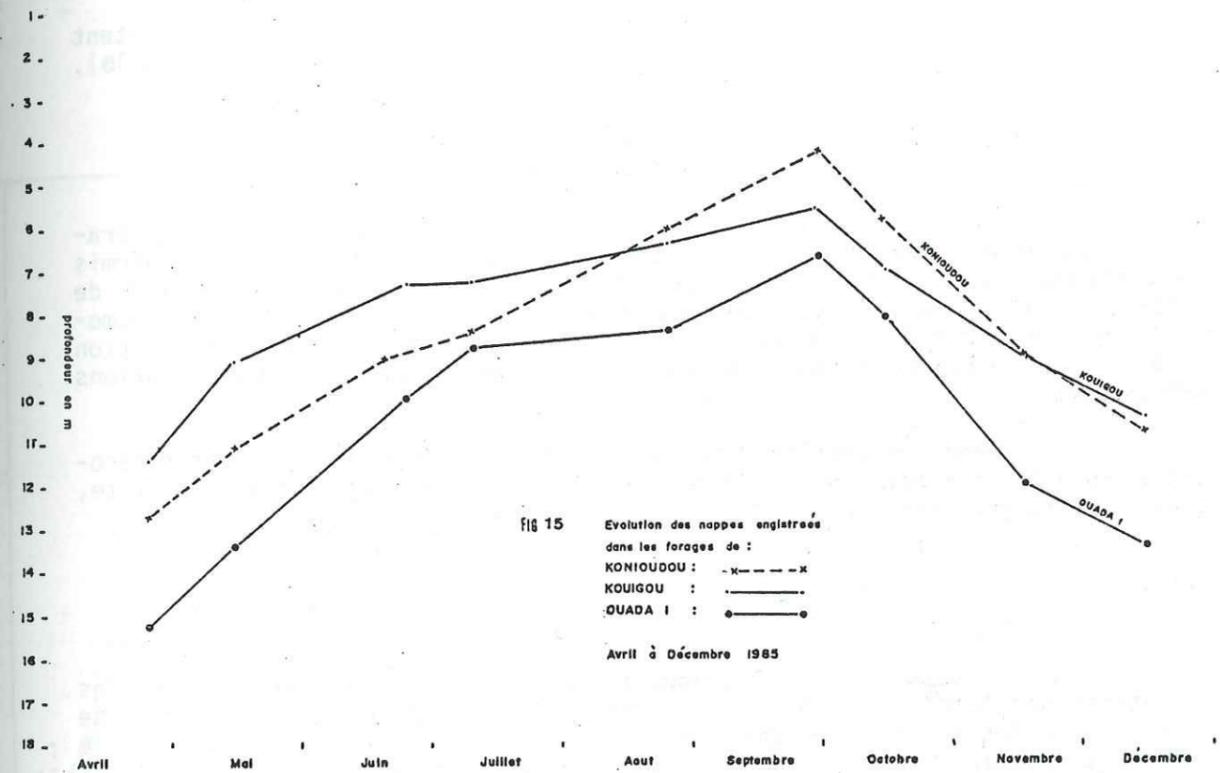
Généralités

Après les généralités sur la géologie du craton ouest africain et celles du Burkina-Faso, nous abordons maintenant l'étude géologique du secteur d'étude. On y distingue les grands ensembles pétrographiques suivants:

- les granites et les migmatites;
- les séries métamorphiques;
- les roches éruptives basiques;
- les cuirasses ferrugineuses.

Les granites et les migmatites constituent les formations dominantes couvrant les 3/4 de la zone.

Les séries métamorphiques, quant à elles, forment quelques bandes de un à quelques kilomètres de large. Les granites orientés appelés couramment



granito-gneiss, les migmatites et les roches métamorphiques forment des ensembles généralement concordants.

Les roches éruptives basiques sont d'une part des massifs de dolérites (Nord et Sud-Ouest) et d'autre part des massifs moins homogènes à prédominance d'amphibolites. de façon générale, les formations rencontrées se partagent en deux groupes qui sont:

- . les formations birrimiennes avec des niveaux le plus souvent peu métamorphiques remarquables dans les unités de Lilgomdé (Kaïbo);
- . les formations antébirrimiennes dont les pegmatites représentent l'ultime phase de transformations (cf. carte géologique, fig.16).

2.1 - Granites et migmatites

C'est l'ensemble le plus vaste avons-nous dit dans les généralités. Les levés de terrain et les forages exécutés dans la région ont permis de distinguer plusieurs types de granites et de migmatites sur la base de critères structuraux et minéralogiques. Bien qu'il existe des migmatites homogènes et hétérogènes, nous avons préféré nous en tenir à leur composition minéralogique globale en vue d'une cartographie permettant les interprétations tectoniques.

Parmi les granites, il convient de distinguer les granites hétérogènes (granites migmatitiques) des granites homogènes (granites à biotite, granites porphyroïdes).

2.1.1 - Les granites hétérogènes

Ce sont les plus couramment rencontrés. Leur différence avec les migmatites homogènes ou hétérogènes se trouve dans la dominance des plages de granites sur les plages de migmatites. Ce sont donc des granites contenant de nombreuses enclaves et panneaux de migmatites ou enclaves amphibolo-biotitiques apparaissant dans une direction conforme aux grandes directions structurales nord-est - sud-ouest. Ce type est visible au PK 42 sur l'axe Ouagadougou-Léo entre Sinciné et Rakaye.

2.1.2 - Granite homogène à biotite

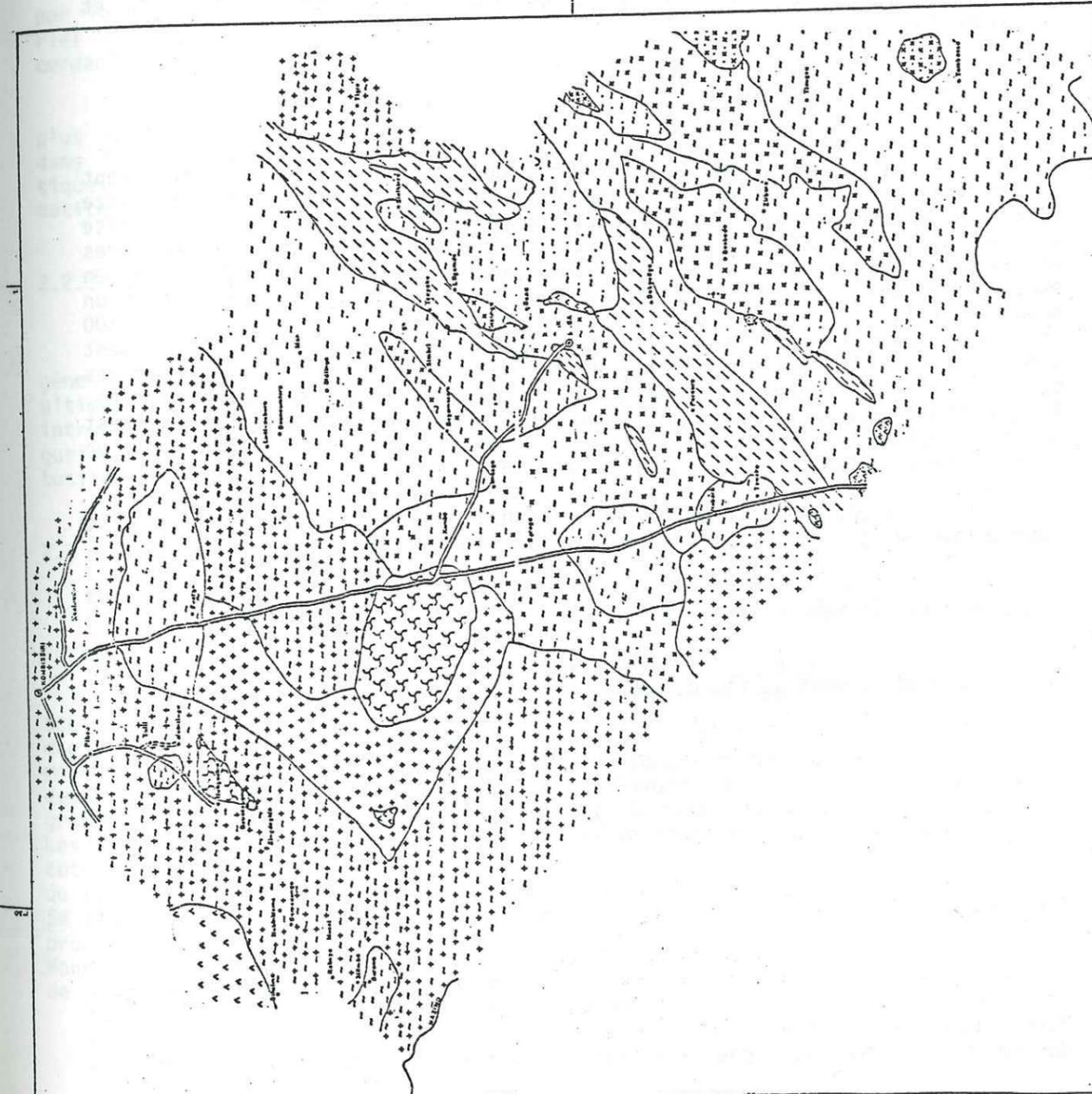
C'est un granite fréquent dans le domaine des migmatites. Il ne forme des massifs importants qu'au Nord-Ouest de Kambo et des massifs non cartographiables entre Manga et Nobéré. C'est un granite calco-alcalin à grains fins dont la texture est grenue et parfois planaire. Il est dépourvu d'enclaves et de pegmatites.

L'étude microscopique de ce granite montre deux types de cristaux:

- des grands cristaux et des petits cristaux de recristallisation aux contours bien réguliers. La roche est composée de quartz, de plagioclase, de feldspaths alcalins et de biotite. Le plagioclase se présente en gros cristaux subautomorphes à contours irréguliers. On le trouve en inclusions dans certains cristaux de feldspaths alcalins. Certains cristaux présentent des exsolutions ou bourgeons de quartz donnant une texture myrmékitique.

FIG 16 ESQUISSE GEOLOGIQUE
du secteur d'étude

(KOMBISSRI - MANGA)



- . les feldspaths alcalins sont en cristaux xénomorphes;
- . la biotite est sous forme de baguettes avec des dépôts d'oxyde de fer sur les clivages de certains cristaux;
- . le quartz se présente sous forme de grands cristaux xénomorphes à extinction roulante;
- . l'apatite en petits cristaux automorphes;
- . les cristaux d'épidote sont craquelés et se montrent le plus souvent en contact avec la biotite.

2.1.3 - Le granite porphyroïde

On rencontre ce type de granite à l'Ouest de Nobéré et ensuite entre Nobéré et Pô. C'est un granite calco-alcalin parfois monzonitique à biotite plus rarement à amphiboles où l'on observe de nombreuses enclaves et des pegmatites.

2.1.4 - Granites à deux micas

Ils sont rares dans la zone. Quand ils existent, ils présentent un débit en écailles. Ce sont des granites à biotite et à muscovite de teinte claire et à grains moyens. La roche est homogène, équante avec peu de pegmatite et parcourue par endroits de quelques filons aplitiques et quelques rares enclaves basiques. Ils sont postérieurs aux migmatites qui subsistent en enclaves. L'exemple type est celui de Kougbaga à l'Ouest du forage c'est un granite à feldspath rose qui affleure à côté d'une migmatite d'orientation N 100 et traversé par un filon de pegmatite N 20. Plus à l'Ouest de cet affleurement à environ 500 m, ce granite contient des enclaves de migmatites et de pegmatites, ce qui est une preuve que migmatites et pegmatites sont antébirrimiennes. A. SAVADOGO a observé le même phénomène dans le bassin de la Sissili (à l'Ouest de notre secteur) et pense qu'il s'agit d'une injection dans les migmatites d'un magma riche en potassium qui digère ou emballe les migmatites.

L'étude microscopique de ce granite montre une texture microgrenue composée de quartz, de biotite, de muscovite et de feldspath.

Le quartz représente 40 à 50 % des minéraux et se présente sous forme de cristaux xénomorphes, aux contours nets montrant une extinction roulante.

Les feldspaths (20 à 40 %) sont sous forme de cristaux xénomorphes envahis sporadiquement de fibres de séricite.

Le mica (5 à 10 %) est tantôt incolore (muscovite), tantôt brun foncé (biotite) et se présente sous forme de baguettes. L'ensemble étant orienté parallèlement suivant les grands axes. Il présente un clivage déformé par endroits en "S". Au vu de cette étude, la roche se présente comme un microgranite métamorphisé ou un granitogneiss pour certains géologues.

2.2 - Les migmatites

Elles occupent par rapport aux granites, des surfaces relativement importantes. Les plus vastes affleurements se situent au Sud et au Nord de Manga. Des plages apparaissent aussi autour de Rakaye, c'est-à-dire à l'Ouest de Kombissiri. Comme souligné plus haut, il existe deux types de migmatites: les

les migmatites hétérogènes et les migmatites homogènes très voisines des granites.

2.2.1 - Les migmatites hétérogènes

Les types les plus largement représentés sont les épibolites et les diadysites, alors que les agmatites sont extrêmement rares. Dans les premières, le matériau leucocrate s'est différencié parallèlement à la schistosité. Dans les secondes, l'apport dessine un réseau veiné. Dans les deux cas, la trame et le matériel leucocrate sont nettement distincts. Ces deux types de migmatites coexistent généralement dans un même affleurement.

Une structure rubanée fine caractérise la trame elle-même recoupée par les veines quartzo-feldspathiques. L'apport consiste donc partout en matériel quartz-feldspathique, qui se présente soit en filons concordants ou discordants en masses plus ou moins bien délimitées.

La composition des filons est pratiquement toujours granitique, plus rarement purement quartzeuse. Les pegmatites particulièrement abondantes dans la zone accompagnent des masses ou des veines de grains plus fins (aplitiques ou saccharoïdes). Elles sont parfois grenatifères. C'est le cas des pegmatites de Tigré et de Sinikiéré, au Nord-Est du secteur d'étude.

2.2.3 - Les migmatites homogènes à biotite

Elles apparaissent au sein des granites ou des migmatites hétérogènes dont elles sont d'ailleurs une variante. Les manifestations plutoniques ultimes se traduisent par la mise en place de roches filoniennes: pegmatites intrusives à l'intérieur des roches précédentes avec une puissance allant de quelques millimètres à quelques mètres, généralement concordantes avec la schistosité des roches encaissantes.

2.3 - Séries particulières

Il existe une variété de migmatite que L.F. BONNARD a appelé série particulière.

C'est en fait une série de migmatite hétérogène à trame de mica-schiste bien visible le long de deux vallées entre Bindé et Manga. Elle est bordée à l'Est par une bande de schistes métamorphiques. Là, une alternance plus ou moins régulière de pegmatites, filons granitiques, de gneiss et micaschistes devenant rares vers l'Ouest forme des épibolites et des diadysites. Pegmatites, granites et gneiss sont à biotite. Les micaschistes sont avec ou sans muscovite. Les migmatites de Nobéré affleurent sur quelques kilomètres carrés autour de cette localité. Elles sont concordantes avec la bande de schistes métamorphiques de Basgana-Parouré et passent progressivement à l'Ouest au granite porphyroïde. Se rattachent aux formations de Basgana, les séries amphiboliques des régions proches injectées de quartz filonien. Au Sud de Lilgomdé le long de la route Manga-Lilgomdé, se dresse un massif rocheux se présentant comme une granodiorite de grain moyen équant orienté E-NE.

L'étude microscopique de cette roche montre:

- du quartz xénomorphe à extinction roulante;
- le plagioclase se présente en cristaux subautomorphes à xénomorphes présentant des macles poly-synthétiques. Certains cristaux montrent un zonage concentrique. Les cristaux sont envahis de petits cristaux xénomorphes d'épidote. Le plagioclase se transforme le plus souvent en épidote ou en séricite associés à des impuretés;
- les feldspaths alcalins sont rarement maclés.

La biotite est sous forme de cristaux bruns à verts foncés avec des clivages fins et réguliers. Certains cristaux englobent de petits cristaux de feldspath.

2.3.1 - La série de Timboué

La série de Timboué se situe entre Toécé et le Bazéga. Elle se compose d'un important massif de granodiorite comparable à celui décrit précédemment, qui est injecté de nombreux filons de leucogranite et de pegmatite à Biotite. Cette granodiorite de grain moyen à amphibole et biotite est tantôt équant, tantôt orientée Nord-Est. Cette roche doit son caractère migmatique à la disposition locale anarchique des minéraux sombres et d'une irrégularité dans la répartition des plages sombres et claires. Les petites enclaves ellipsoïdes y sont fréquentes.

On peut ranger dans cette série le massif de Nangouma situé plus à l'Ouest. C'est une migmatite à trame granodioritique.

2.3.2 - Les séries métamorphiques

Les formations composant ces séries se groupent en bandes localisées au centre du secteur d'étude en une sorte de faisceaux allongés sud-ouest nord-ouest. Parmi elles, celle de Basgana est la plus grande s'étendant au Sud de la piste Nobéré-Manga. Elle est composée principalement d'ensembles schisteux comportant des micaschistes et par moment des amphibolites.

2.3.3 - La série de Lilgomdè (Kaïbo)

Cette série est bien représentée à l'Ouest du village et fait place au Sud-Ouest à des lentilles de dimensions plus réduites. Elle est aussi composée principalement d'ensembles schisteux. La bande principale est faite de micaschistes (notamment à Toeyko) et de schistes sériciteux, ainsi que d'un niveau de schistes ardoisiens noirs, fins et tendres alternant par endroits avec de petites assises gréseuses parfois grenatifères.

2.4 - Les amphibolites

Elles sont fréquentes au Sud de Nobéré ainsi qu'au Nord-Ouest où elles sont suffisamment importantes pour être isolées. Les lentilles de Manga et de Balogo sont faites de mêmes roches dont la schistosité est toujours bien marquée. Il faut noter que les roches de la zone d'étude sont généralement

affectées d'un métamorphisme schiste vert. Les roches contenant de la hornblende et quelques fois de la biotite peuvent être interprétées comme résultant du métamorphisme de contact, car les hornblendites rencontrées ne constituent pas en général des grands massifs, mais souvent de petits affleurements isolés au sein des granites ou des migmatites. La hornblendite située près du forage de Gago (Nord de Manga) se présente sous forme d'un filon de direction N 150.

2.5 - Les schistes graphiteux

Les schistes graphiteux sont vraisemblablement d'origine sédimentaire et très peu métamorphiques, mais ils sont pourtant le plus souvent associés à des roches volcaniques. Pour DUCCELLIER, la présence du graphite dans la zone est due plutôt à des émanations volcaniques qu'au métamorphisme.

2.6 - Ages des différentes formations

Depuis les travaux de J. SAGATZKY, il est admis que les séries métamorphiques du Burkina-Faso méridional sont d'âge birrimiens. Les formations anté-birrimiennes sont éburnéennes et peut-être libériennes. Mais il faut comme nous l'avons souligné plus haut, attendre les résultats des derniers calculs isochroniques pour pouvoir se prononcer sur le dernier cas. Pour ce qui est des formations éburnéennes, les unes sont syn-tectoniques, les autres post-tectoniques comme les granites à deux micas.

Notons enfin que P. TEMPIER (1986) a distingué deux cycles dans l'Eburnéen et il semble que le domaine éburnéen soit plus ancien sur le domaine mossi de la dorsale que le domaine Baoulé en Côte d'Ivoire. Il propose donc l'appellation burkinien au domaine Mossi.

2.7 - Ressources minérales

Bien qu'aucune minéralisation intéressante n'ait été signalée dans la zone aussi bien par les prélèvements géochimiques, la géophysique aéroportée par la prospection alluvionnaire, il convient de signaler la présence de stibine à Boulmona, de la malachite rencontrée dans le forage négatif au bas des collines de Songo et des traces ça et là de graphite (dans les schistes), de pyrite et enfin de la tourmaline.

Les minéraux les plus fréquemment rencontrés sont la magnétite, le grenat almandin associé aux zones métamorphiques.

2.8 - Les formations d'altération

Le mode d'altération et les caractères de la couverture altérée dépendent-ils de la nature de la roche mère pour que l'on puisse prévoir à partir de celle-ci les caractéristiques de la frange altérée aquifère ? Nous disons oui dans les grandes lignes, mais c'est une démarche qui est incapable de rendre compte des particularités locales du terrain. C'est pourquoi une carte géologique à quelque échelle que ce soit ne peut généralement pas servir de carte hydrogéologique. Des études locales de détail sont donc indispensables, car il n'y a aucune relation entre la topographie et la présence de zones

d'altération: celles-ci peuvent se situer aussi bien dans les bas-fonds que sur les hauteurs.

2.8.1 - Les cuirasses latéritiques

La cuirasse ferrugineuse est le terme supérieur de l'altération latéritique. Elle se trouve sur les plateaux. On distingue les cuirasses fossiles et les cuirasses actuelles. Les premières se rencontrent sur les hauteurs où elles couronnent des buttes témoins. Elles sont de la fin du Tertiaire. Puis la reprise de l'érosion a entraîné une nouvelle pénéplanation du pays provoquant la formation d'une cuirasse au Quaternaire qui se poursuit jusqu'à nos jours. Elle atteint parfois des épaisseurs considérables comme dans la région de Tiébélé, précisément à Taniania. Nous y reviendrons dans le processus d'altération.

2.8.2 - Altération des schistes birrimiens

Le Birrimien se présente essentiellement sous forme de schistes dans notre région. Le stade ultime de l'altération est une argile kaolinique, d'épaisseur variable. La zone de transition entre la roche-mère et la zone d'altération est souvent fissurée, mais les fissures sont fréquemment remplies d'argiles.

2.8.3 - L'altération des granito-gneiss

Le terme ultime de la décomposition de la roche originelle est une argile bariolée dont la couleur varie du blanc au rouge lie-de-vin.

2.8.4 - L'altération des migmatites

A cause peut-être de l'altérabilité des filons de pegmatite qui les recoupent, l'épaisseur de l'argile est plus importante ici et l'on ne remarque pas le profil type de l'altération des granito-gneiss (Sarana, Béré, Douré de Doulogou). C'est ce qui explique les éboulements fréquents dans les puits traditionnels foncés dans ces zones et la nécessité des tubages provisoires en foration.

2.9 - Processus d'altération et produits d'altération

2.9.1 - Processus d'altération

Les conditions d'altération des roches dont dépend l'existence des nappes occupent une place primordiale dans l'étude hydrogéologique des pays à substratum cristallin et métamorphique. L'altération de ces roches est fonction de plusieurs critères.

2.9.2 - La composition minéralogique des roches

Il est connu que les roches basiques précambriennes riches en chaux s'altèrent plus facilement que les roches éruptives plus récentes. D'une manière générale, l'altération d'une roche est fonction de sa richesse en minéraux silicatés sensibles à l'eau.

2.9.3 - La texture et structure de la roche

Les roches à gros grains sont plus sensibles à l'altération; de même les roches hétérogènes le sont plus que les roches homogènes. Ainsi, les granites migmatitiques et granites porphyroïdes sont plus altérables qu'un granite homogène. C'est le cas du Nord-Ouest du secteur où nous avons rencontré de grandes épaisseurs d'altérites au cours de l'exécution des forages.

2.9.4 - Le climat

En zone tropicale bien arrosée, le même granite donnera une plus grande couche d'arène qu'en zone moins arrosée. Ainsi, les granites migmatitiques des régions de Fada et de Bogandé situées à l'Est et au Nord de notre terrain n'échappent pas à cette règle et connaissent une altération moins profonde (les épaisseurs d'altérites dépassent rarement 15 m).

2.9.5 - Les produits d'altération

D'une manière générale, le schéma du processus d'altération selon les conditions évoquées plus haut est le suivant:

1. Il se produit une hydrolyse poussée des minéraux d'où rupture des éléments silicatés.

2. Mise en solution de la silice, individualisation des hydroxydes. Une partie de la silice mise en solution est transportée par l'eau. Le reliquat abouti aux argiles de néoformation par recristallisation.

Bien que les mécanismes généraux de l'altération des roches cristallines soient connus, nous signalons néanmoins le fait que cette altération est souvent suivie d'un phénomène de cuirassement dont nous avons évoqué la présence dans notre secteur.

Ainsi le phénomène de ferritisation aboutissant au cuirassement des horizons superficiels est caractérisé par une élimination sélective des éléments libérés par hydrolyse. C'est cette élimination qui aboutit à un enrichissement des niveaux supérieurs en oxydes de fer ou d'aluminium. Lorsque l'hydroxyde de fer se situe sous le niveau hydrostatique, il s'immobilise pour former la cuirasse soit superficielle, soit noyée s'il se trouve dans la zone de battement de la nappe et donner ainsi une cuirasse dite "noyée" dont nous soulignons l'importance en hydrogéologie.

J. BIZE avait écrit que la majorité des cuirasses était la trace de la zone de battement d'une nappe et de ce fait, le relief reconstitué à partir des témoins cuirassés représentait une certaine paléo-PIEZOMETRIE

De ce processus général d'altération, nous avons un profil type en place qui est de haut en bas :

- une cuirasse ferrugineuse souvent alvéolaire de 0 à 4 m;
- une argile blanchâtre, latéritique 4 à 5 m d'épaisseur (ces argiles comportent souvent des cannicules qui leur confèrent une certaine perméabilité);
- une arène argileuse fluente;
- une arène grenue qui est fonction de la nature pétrographique de la roche mère;
- la zone fissurée;
- la roche saine

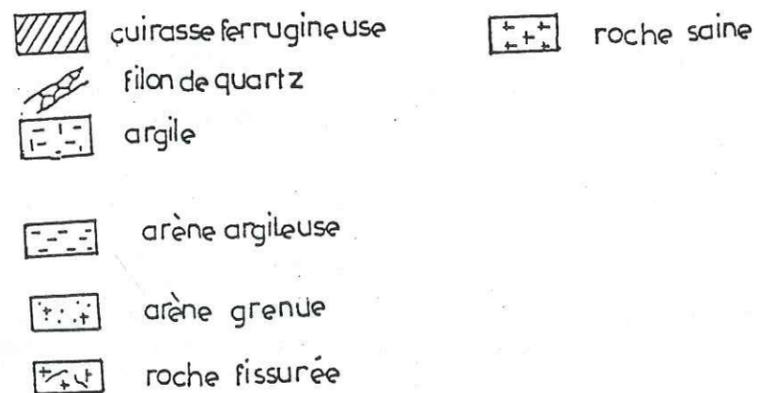
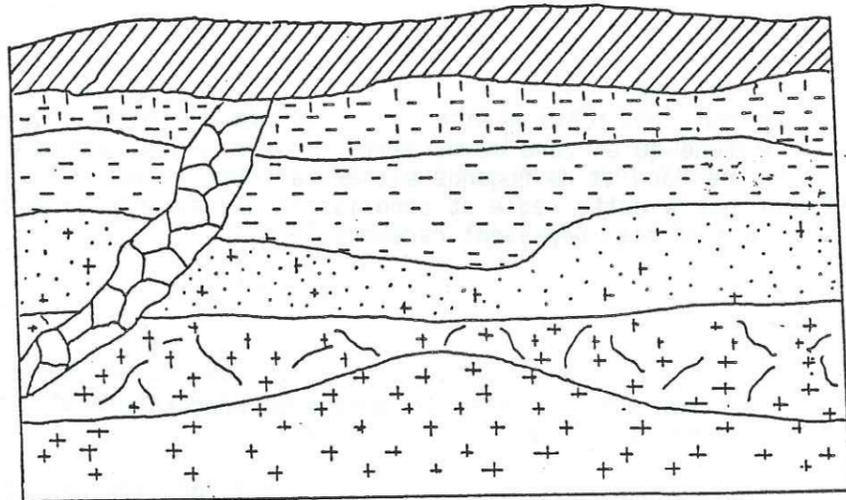


Figure 17 - Profil des terrains du secteur

2.9.6 - Capacité aquifère des altérites

A l'état sain, les roches cristallines et métamorphiques sont imperméables et hydrogéologiquement stériles. Elles ne peuvent contenir de l'eau que lorsqu'elles sont altérées ou fissurées avec toutefois des comportements différents vis-à-vis de l'eau.

Les granites à grains fins donnent une arène plus ou moins argileuse en altération tandis que les granites à gros grain parcourus par des filons de pegmatite ou de quartz aboutissent par le même phénomène à une arène grenue.

Le profil d'altération des roches birrimiennes est uniforme et argileux.

Quant aux roches basiques, leur altération est analogue à celle des granites et l'absence d'argile kaolinique qui colmaterait les fissures du substratum est compensée par un ensemble sablo-argileux (montmorillonite).

De ces remarques nous pouvons retenir que :

1/ Les débits fournis par les différents horizons d'altérites (même si nous ne les captions pas toujours) sont conditionnés en majorité par la nature pétrographique de la roche mère.

2/ Dans les formations argileuses de faible transmissivité, l'eau s'écoule lentement et difficilement. Ces formations ne retiennent de l'eau que lorsque l'épaisseur importante se trouve sous le niveau hydrostatique. Par contre dans les arènes granitiques peu argileuses de transmissivité plus forte, l'écoulement devient facile mais malheureusement les quantités d'eau sont peu importantes à moins que ces arènes ne soient parcourues par des filons de quartz ou de pegmatite eux-mêmes altérés.

Cependant, l'extension de ces altérites en question est limitée dans l'espace. Sur notre terrain d'étude c'est seulement le long des discontinuités tectoniques que nous avons des possibilités hydrauliques énormes. C'est d'ailleurs les problèmes que posent la localisation de ces failles et les moyens traditionnels de fonçage rudimentaire qui font que beaucoup de nos régions ont connu et connaissent encore des difficultés en eau.

De nos jours pour détecter ces discontinuités, on peut employer soit la photographie aérienne, soit les images satellites qui permettent de les matérialiser par les linéaments, soit encore par l'orientation du réseau hydrographique ou par la prospection électrique. Ce sont là des moyens onéreux et inaccessibles pour nos braves paysans sur lesquels nous reviendrons dans les pages suivantes.

La quasi totalité des ressources hydrauliques en pays cristallin se trouve dans la frange altérée (altérites et socle fissuré) à épaisseur variable. Toute étude hydrogéologique revient alors à détecter les zones d'altération profonde, bien qu'il n'existe pas une relation entre productivité des ouvrages et l'épaisseur d'altérites qu'ils traversent (voir Tableau 11)

Localités	Epaisseurs d'altérites (m)	Débits (m ³ /h)	Localités	Epaisseurs d'altérites (m)	Débits (m ³ /h)
PIGHRI	16	12	LOPOURI	10	20
TAMBOLO	3	1	GOGOGO	10	16
KASSONGOBIÉ	26	0,8	DOUABIE	5	7,2
GOROBIE	21	3,6	TANDOGO	17,5	4,5
KOUYOU	24	18	MOULINIA	16	12
KOUBONGOU	32	13,5	NIOUA	10	7,2
BELERBIE	13	18	TANGNANIA	4	13,8
KASSIRI	19	4	SARANA	32	7,2
LOKALOA	21	1,7	SILIMBA	21	0,98
SINO	20	6	RAKAYE MOSSI	32	18
BAPANIA	10	4	SICINE	36	7,2
KABRIKABOGO	30	4	RABOGTENZA	7	36
BAERIE	17	2,04	SAMSAONGO	9	5
KANKOA	17	16	NABINKINSMA	18	7,2
MOUMA	19	1	GODIN	13	3
IDENIA	11	6	BOROGO	19	1,5
NAMAGANIA	13	1,4	TOGHIN	5	2
GOMIA	32	6	NABDOGO	16	2,4
BLORESSIAM	5	1,8	BINGLA	36	1,2
LONGO	12	12	LALLE	17	0,8
TANIEKA	8	0,9	SARE	33	2,3
YOUKA	16	18	WENTENGA	22	6
NARGUIAN	21	6	KOUIGOU	32	0,75
ZINCI	20	14	ZINGDEGUIN	22	5,1
TAMCE	6	6	BOUSSOUGOU	40	4
TANSSABLIGA	14	2,25	LAMZOUDO	25	12
POUSSI	34	2,5	BELLEGRE	24	12
DINDOURGOU	8	4,5	NAGOUMA	31	6
GUELWONGO	4	1,6	PIBSE	31	1,2
TOMABISSI	20	3,8	BISSIGA	42	2,2
GONRE (1)	1,5	7,2	AOURE	40	18
TYPONI	4	2,4	BENOGONABIGA	22	2,25
GONRE (2)	17	0,7	BENGO SILMISSI	28	12

Tableau 11 - Epaisseurs d'altérites et débit des forages

2.9.6.1 - Particularité des filons de quartz et de pegmatite

Ils sont abondants sur le secteur d'étude. Malgré l'impossibilité de les cartographier nous les localisons soit en affleurement et surtout grâce aux profils de trainés électriques notamment dans le centre et le nord du secteur où ils soulignent les tracés de failles de direction générale NE-SO et souvent E-O.

Lorsqu'ils sont broyés, ils jouent un rôle hydrogéologique très important aussi bien au niveau des altérites qu'à celui de la frange fissurée où ils drainent les grandes quantités d'eau qui s'y trouvent.

C'est cela qui explique les grands débits enregistrés dans les forages de Sarogo, Sarana, Rabogtenga, Samsaongo etc.. et l'existence de forages productifs dans les schistes birrimiens bien connus par leur stérilité hydrogéologique élevée notamment dans notre secteur.

2.9.6.2 - Epaisseur des altérites

L'épaisseur d'altération n'est pas uniforme et ne dépend pas de la topographie. Elle dépend de l'importance de la fracturation. C'est ainsi qu'au Nord-Ouest de la zone bien que les affleurements soient plus étendus, l'épaisseur des altérites atteint 50 m alors qu'elle n'est que de 5 à 20 m au Centre et au Sud.

2.9.6.3 - Les alluvions sablo-gravillonnaires

Certes, nous ne captions pas ces nappes de surface, mais il convient quand même d'en parler à cause de leur importance dans l'alimentation des nappes profondes et des débits qu'elles assurent dans les puits à grand diamètre et puisards qui ne descendent pas plus profondément.

Les alluvions sablo-gravillonnaires sont récentes et se rencontrent essentiellement dans les confluent des cours d'eau où elles atteignent leur épaisseur maximum. Ces formations grossières peu argileuses, nées à partir de l'érosion se composent de haut en bas :

- sables fins peu argileux
- sables grossiers qu'accompagnent des graviers de quartz et latéritiques
- arènes argileuses ou sableuses

2.9.6.4 - Réseau hydrographique et géologie

Dans l'étude du réseau hydrographique de notre secteur, nous avons dit qu'il jouait un double rôle; en cartographie et en hydrogéologie. Nous rappelons que l'observation de la carte du réseau hydrographique montre deux parties. Une partie nord marquée par un réseau hydrographique lâche et une partie sud caractérisée par la densité élevée du réseau.

Ce constat nous a amené à faire une corrélation entre la nature pétrographique des roches et la densité du réseau.

En effet, le parcours géologique de la région montre que cette densité élevée dépend en premier lieu de la nature du bedrock. Au Nord-Est et au Sud, nous avons des schistes et des roches basiques et elle est forte. Elle est moins élevée dans les granito-gneiss du Nord et du Centre. Nous attachons donc cette différence à la nature même du recouvrement. Il existe une différence de perméabilité entre les altérites argileuses des schistes et les arènes granitiques plus propices à l'infiltration des eaux de pluie. Beaucoup d'auteurs avaient fait la même remarque dans leurs différentes études menées au voisinage de notre secteur (Sissili, Mogtédou, Koupéla).

Nous constatons avec eux que cette remarque peut et doit servir pendant les levés géologiques. Le réseau hydrographique peut permettre le dessin exact des contours géologiques notamment dans les sillons birrimiens. Nous pouvons donc conclure que la densité du réseau varie avec la nature pétrographique du substratum, et surtout avec la nature des altérites de recouvrement donc de leur perméabilité.

D'autre part selon BOURGUET L. et al., 1981, il existe une relation entre épaisseur d'altération et géométrie du réseau hydrographique.

Le tableau 12 montre effectivement que l'altération est profonde dans la zone à réseau lâche. Cette épaisseur d'altérites devient relativement faible lorsqu'on passe dans les régions à réseau dense: elle va de 30 m au Nord à 10 m au Sud.

Localités	Epaisseur d'altérites	Type de réseau
RAKAYE MOSSI	32	RESEAU HYDROGRAPHIQUE LACHE
SARANA	32	
DOURE	40	
LAMZOUDO	25	
SINCINE	36	
NABDOGO	16	
BOUSSOUGOU	40	
BINGLA	36	
BENOGO SILMISSI	28	
ZINGDOGUIN	22	
BELLEGRE	24	RESEAU HYDROGRAPHIQUE DENSE
GONRE	1,5	
TYPONI	4	
LOPOURI	10	
GOGOGO	10	
DONGO	4	
SONGO	2	
TJIRA	5	
GAGO	13	
DUBA	12	
TIGRE	3	
SINIKIERE	23	
TAYOKO	13	
KAIBO	8	

Tableau 12 : Relation entre réseau hydrographique et épaisseur d'altérites

TROISIEME PARTIE

ETUDE DE LA FRACTURATION

--

3.1 - LA PHOTO-INTERPRETATION

3.2 - MESURES SUR LES AFFLEUREMENTS

3.3 - CONDITION D'APPARITION DES FRACTURES

CHAPITRE III

ETUDE DE LA FRACTURATION

Sur le plan hydrogéologique, les roches cristallines présentent la caractéristique générale de roches à porosité interstitielle faible ou nulle. Elles n'offrent donc de possibilités aquifères que lorsqu'elles sont altérées ou fissurées.

La mise en évidence des fractures n'est pas toujours aisée. Elle peut se faire comme nous l'avons dit (hydrogéologie des roches fissurées, D.E.A., 1984, D. YAMEOGO) par plusieurs méthodes dont les plus utilisées en Afrique de l'Ouest sont les images satellites, les photographies aériennes et la géophysique.

C'est sur la base de ces photographies aériennes que nous avons tracé le réseau complexe de linéament du secteur d'étude (Fig.18).

Ces linéaments correspondent à des alignements végétatifs, morphostructuraux ou hydrographiques. Pour confirmer l'existence de ces fractures, nous associons la prospection géophysique, notamment les trainés électriques qui consistent à recouper perpendiculairement les fractures supposées.

Sur les affleurements, les mesures de directions des microfractures ont pu être faites même si malheureusement l'absence de carrière dans la zone ne nous a pas permis d'avoir une idée des pendages pourtant nécessaires dans l'appréciation des mouvements tectoniques qui se sont produits dans le secteur d'étude.

3.1 - LA PHOTOINTERPRETATION

Les photographies aériennes utilisées sont celles de 1978 IGHV à l'échelle de 1/50.000 qui ne couvrent que le Centre et le Nord du secteur d'étude.

Les relevés des linéaments reportés sur des rosaces et des histogrammes (pas de 10°) par région permettent de remarquer la variation dans l'espace des directions des fractures et leur extension.

C'est ainsi qu'à Bindé et à Gaoko, localités situées au Nord de Manga, dans les migmatites à pegmatites, nous constatons (Fig.19) une prédominance des linéaments de directions N 140 - N 150, avec une fréquence de 12,4 %. Viennent ensuite, par ordre de fréquences importantes, les directions N 40 - N 60 - N 80. Les failles de direction N 10 - N 30 - N 70 - N 120 - N 160 et N 170 ont une distribution fréquentielle inférieure à 6 %. Les directions N 100, N 110 et N 120 sont les moins fréquentes. Quant aux fractures d'azimut N 20, N 40 et Nord-Sud, elles sont inexistantes dans cette zone.

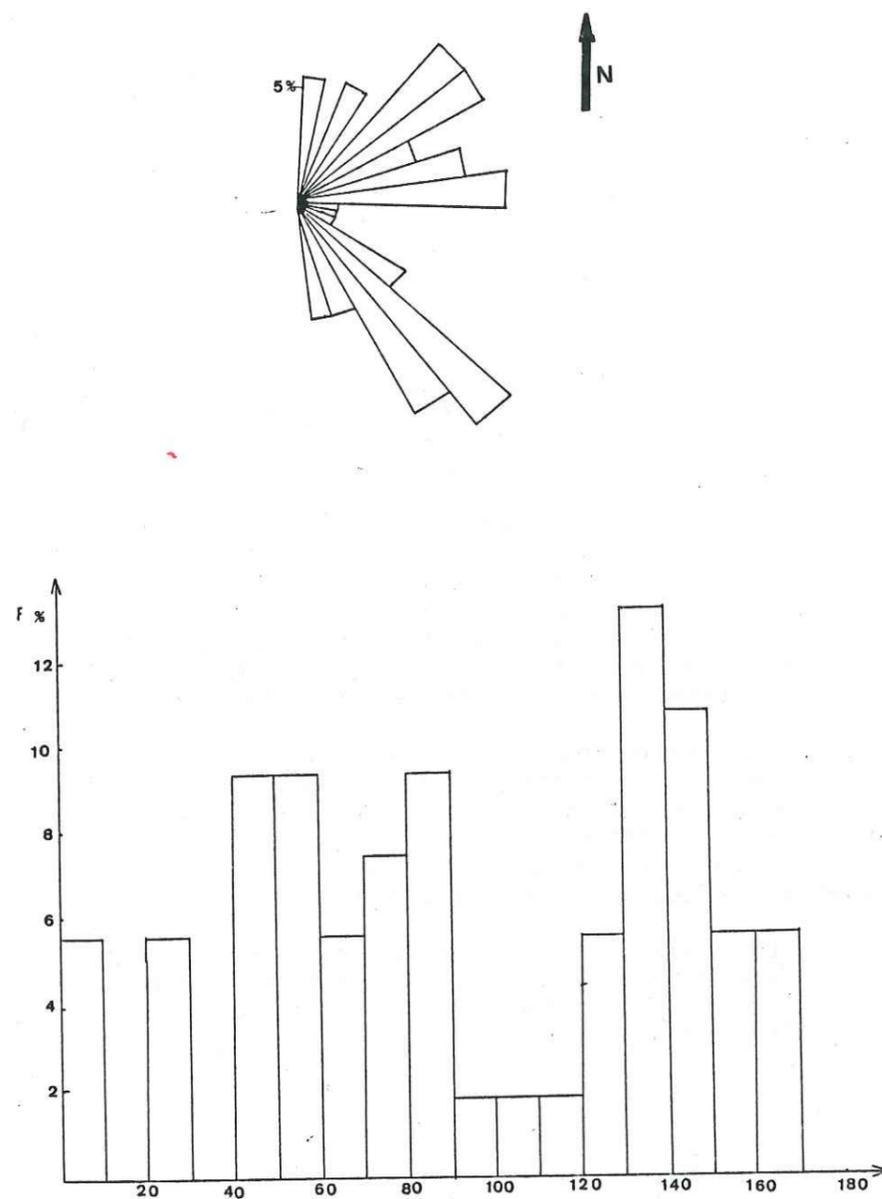
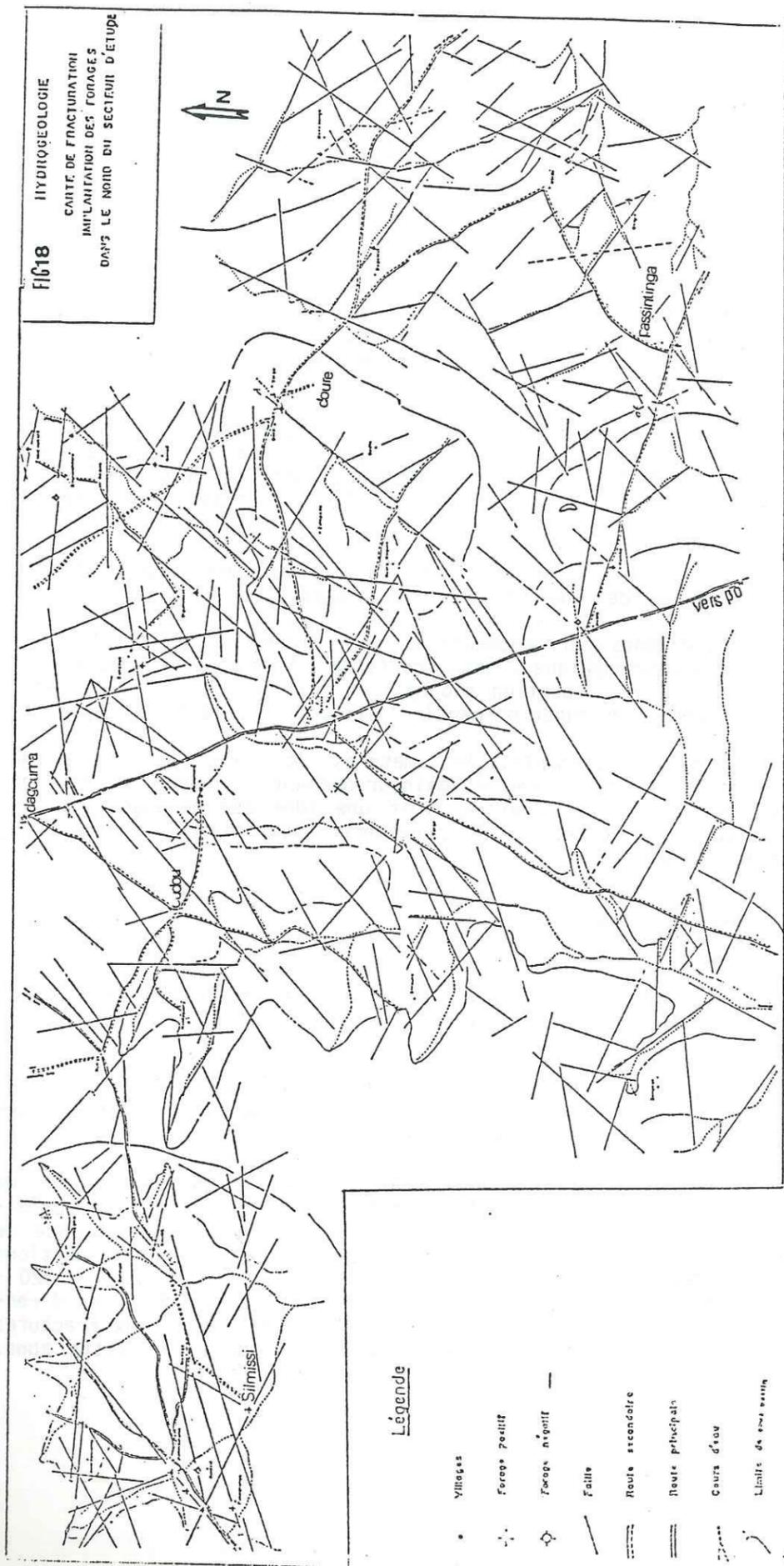


Figure 19: Distribution fréquentielle des directions de linéaments dans le secteur de Bindé Gaoko

- Secteur de Toudou-Zangogo

Ce secteur est situé à l'Ouest de Toécé. Les formations géologiques sont constituées de migmatites à pegmatites et de granites homogènes à grains fins. Les fractures relevées, à partir des photos aériennes et reportées sur les rosace et histogramme montrent des pics prononcés pour les directions N 60, N 90. Les fractures relativement fréquentes sont celles de directions N 40, N 70, N 110. Les directions nord-sud, N 10, N 20, N 30, N 50, N 80 et celles allant de N 120 à N 160 sont moins fréquentes.

L'on ne retrouve pas les failles de direction N 170 ou du moins elles n'apparaissent pas à cette échelle (Fig.20).

- Secteur de Béré (Fig.21)

Dans la région de Béré qui correspond au centre géographique du secteur d'étude, le socle est constitué de migmatites neutres et de formations isolées de pegmatites. La fréquence des fractures N 60 - N 70 - N 130 dépasse 14 %. On peut sur cette figure constater l'absence des fractures de direction N 20, N 50, N 110 et 180.

- Secteur de Lilgomdé

Le secteur de Lilgomdé est situé sur l'axe Kambo-Tigré, au niveau du contact entre les schistes birrimiens au Nord et les migmatites à biotite au Sud. A ce niveau, ce sont les linéaments de direction N 170, N 140 qui sont prédominants avec une fréquence de 12% (fig.22). On remarque sur cette figure qu'à part les fractures de directions N 80, N 100 et N 180 absentes, toutes les autres directions sont représentées dans un pourcentage allant de 2 à 8 %.

-Secteur de Boussougou-Nabinkisma

Ce secteur correspond au Nord-Ouest et à l'Ouest du secteur d'étude. Les roches de cette région sont essentiellement des migmatites à pegmatites, des migmatites neutres et des plages de dolérites et amphibolites. Elles sont intensément affectées par les fractures d'azimut N 110, N 70 et N 120, avec une fréquence comprise entre 10 et 12% de l'ensemble des fractures.

Les directions N 140, N 130, N 30, N 50 dépassent 6% dans la distribution fréquentielle. Comme dans les localités précédentes, certaines fractures s'éclipsent. C'est notamment le cas des fractures de directions N 150, N 170 et N 180. (fig. 23).

3.1.1 - Extension des fractures

L'un des critères utilisés pour le choix des sites des forages dans le socle cristallin repose sur la profondeur des fractures elle-même liée à leur extension. Malheureusement, sur la figure 24, on constate que les fractures plus longues que 10 km sont rares. On les rencontre dans les secteurs de Béré et de Boussougou où elles affectent les migmatites à pegmatites avec une direction N 60 à N 70 (fig. 25).

Néanmoins, on peut remarquer sur ces histogrammes que la majorité des fractures a une extension comprise entre 2 et 8 km et qu'elles sont fréquentes dans les directions N 50-N 60, N 80-N 70, N 120-N 130, N 20-N 30.

Les fractures de direction N 160 à N 180 ont une extension très faible de l'ordre de 0,4 % en longueurs cumulées de l'ensemble des fractures.

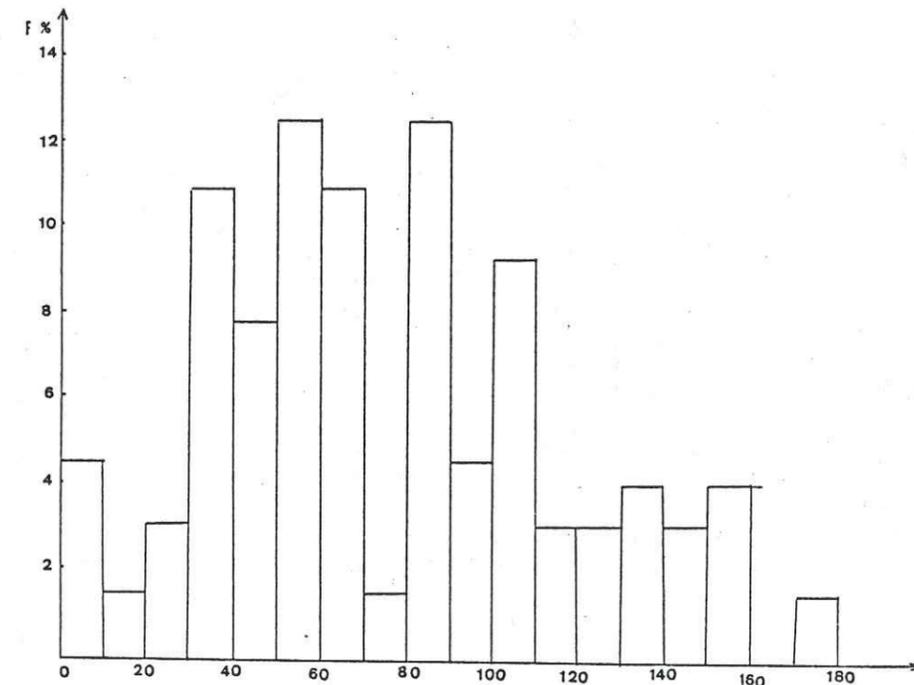
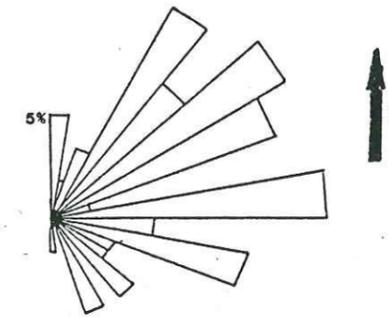


Figure 20: Distribution fréquentielle des directions de linéaments dans le secteur de Toudou Zangogo

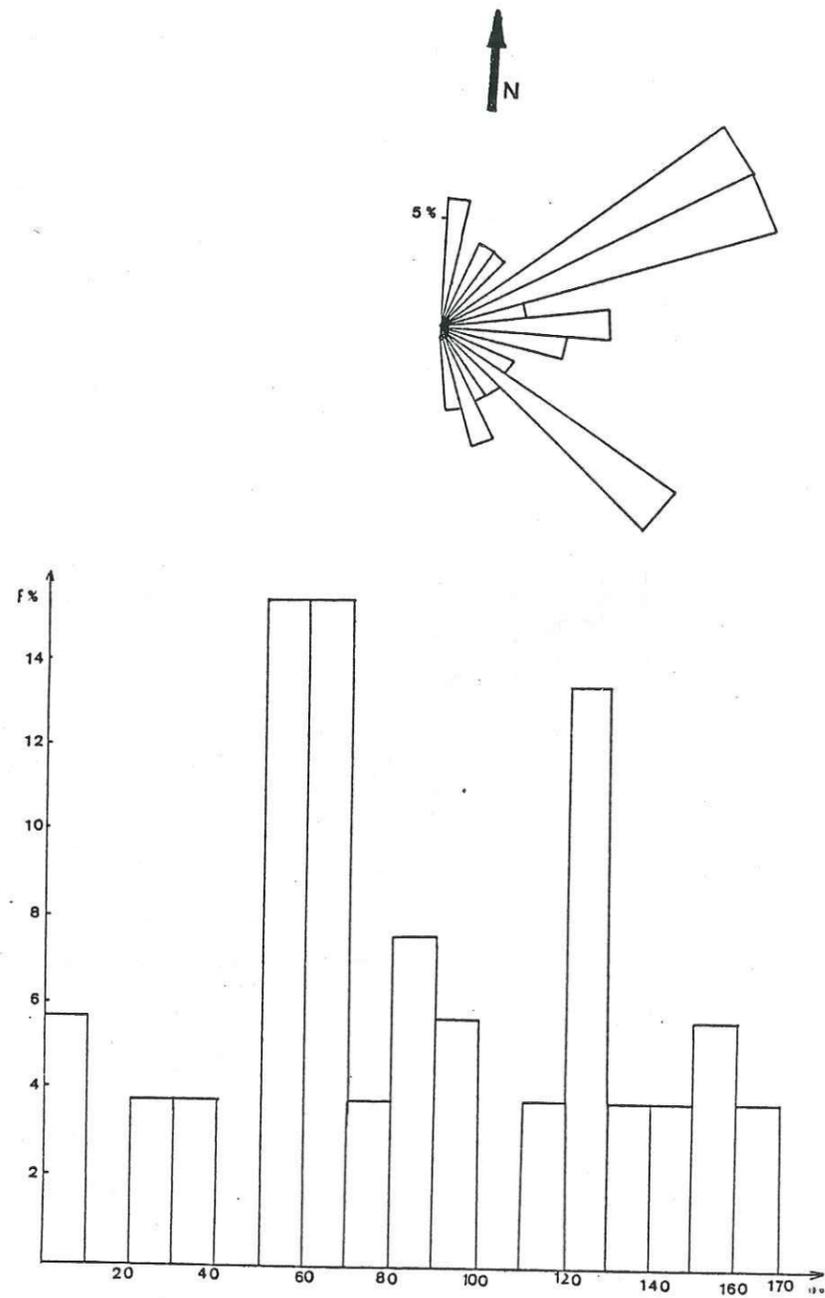


Figure 21: Distribution fréquentielle des directions de linéaments dans le secteur de Béré

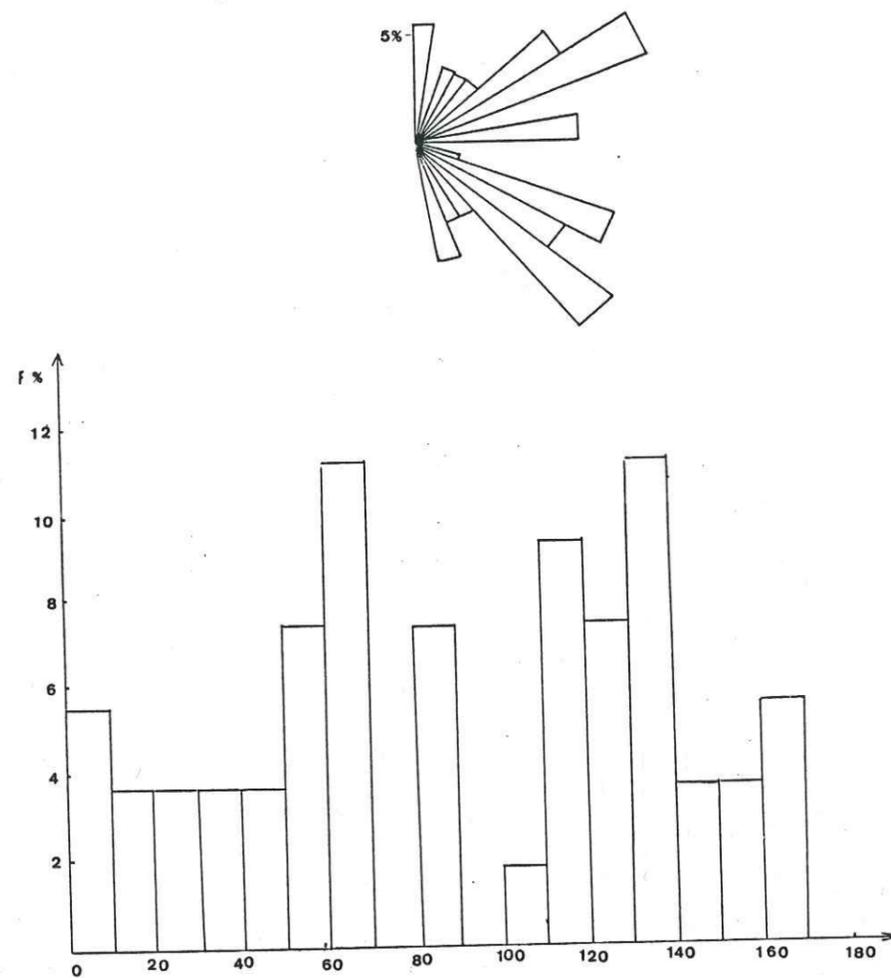


Figure 22: Distribution fréquentielle des directions de linéaments dans le secteur de Lilgomdé

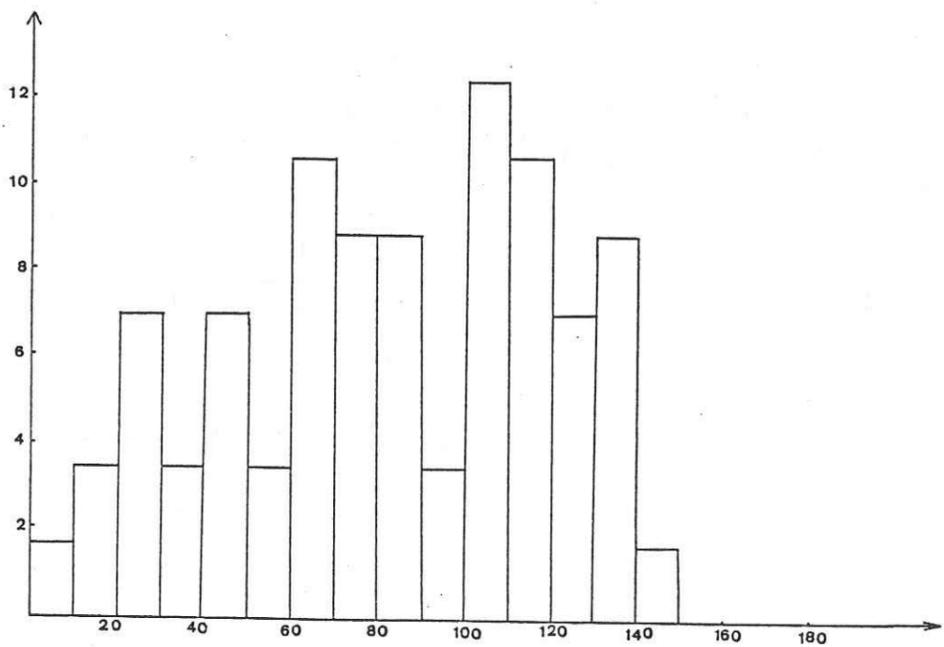
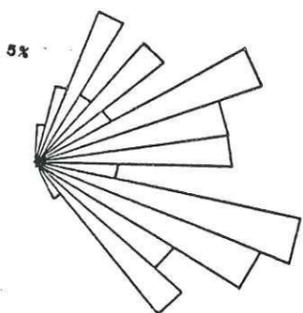


Figure 23: Distribution fréquentielle des directions de linéaments dans le secteur de Boussougou-Nabinkisma

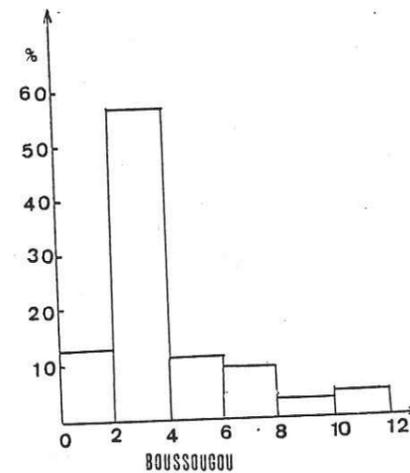
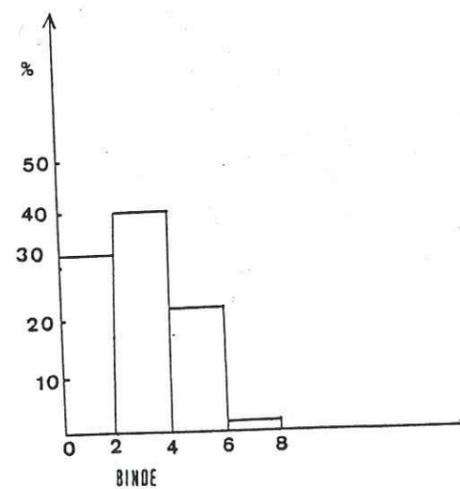
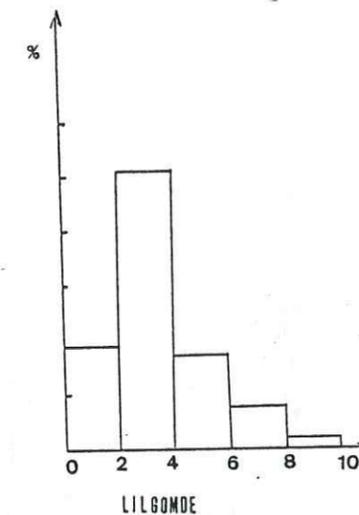
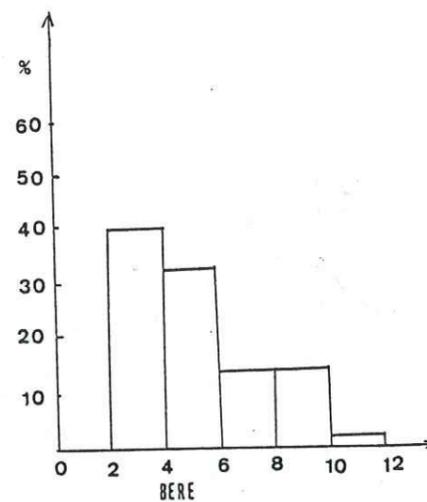


Figure 24: Distribution fréquentielle des longueurs de linéaments dans les différents secteurs

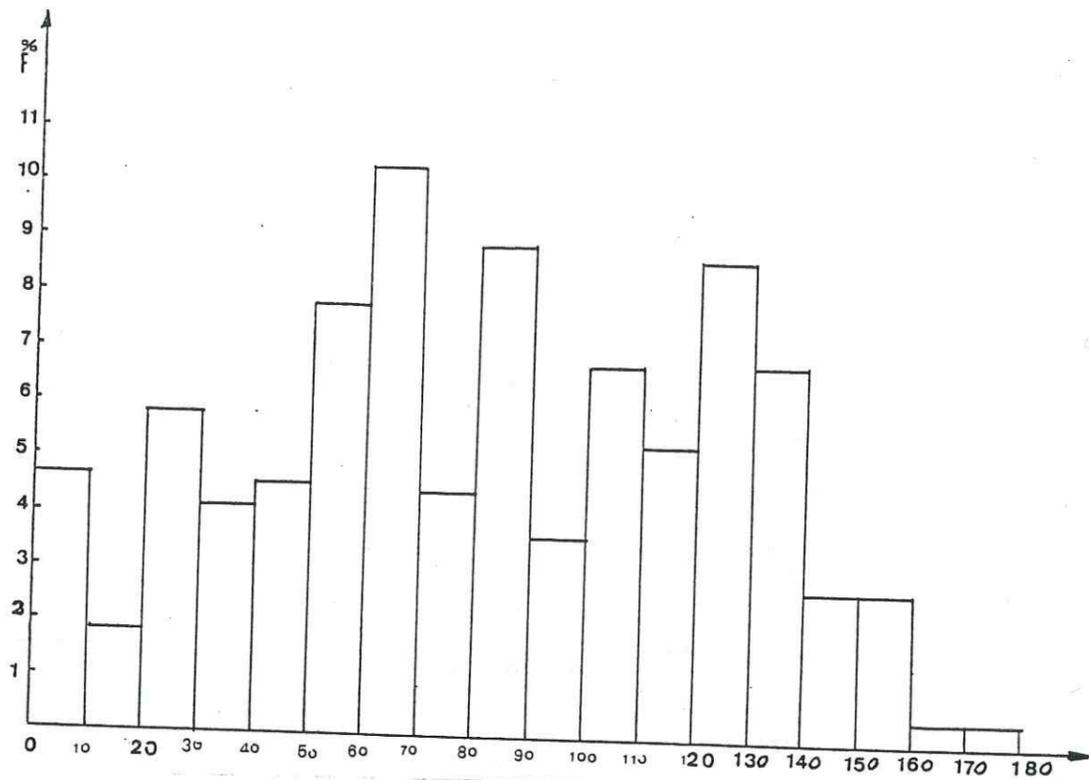


Figure 25 : Répartition fréquentielle des longueurs de linéaments par classe de direction

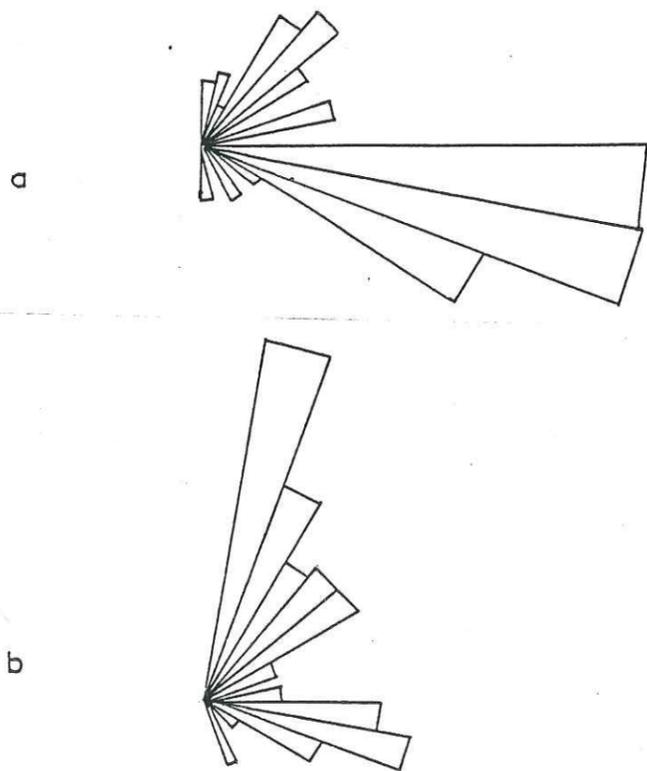


Figure 26: Distribution fréquentielle des directions de fracture dans le secteur étudié

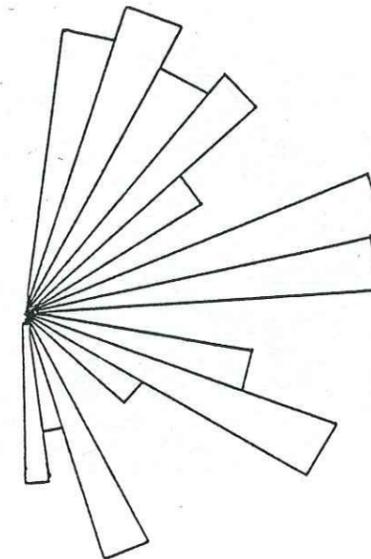


Fig.27 - distribution des directions de filons de quartz

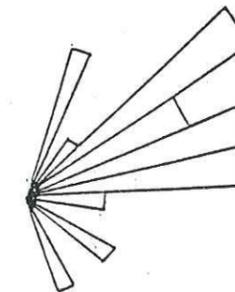


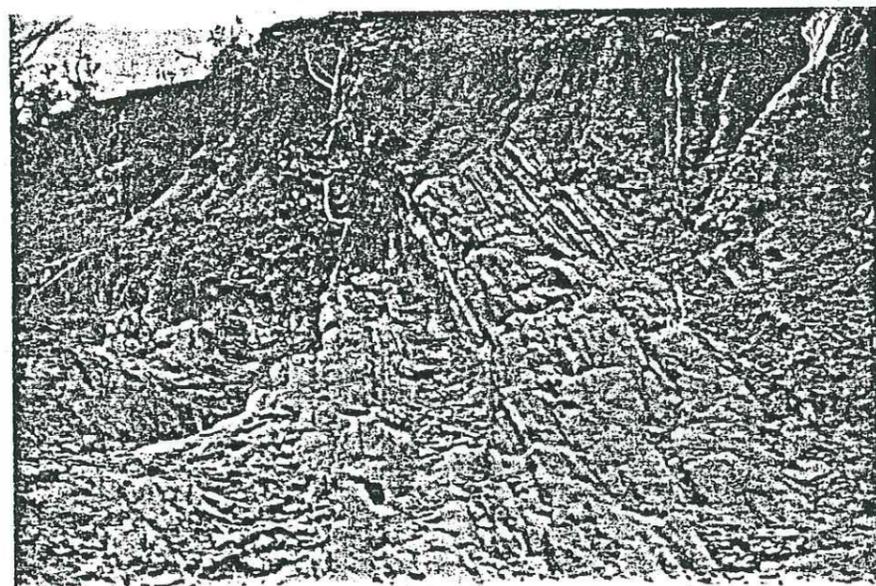
Fig. 28 - distribution des directions de foliation

10 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: plalour@ujf-grenoble.fr

3.2 - MESURES SUR LES AFFLEUREMENTS

La rareté des affleurements ne permet pas de couvrir toute la zone d'étude comme en photographie aérienne. Néanmoins, nous avons pu mesurer les directions des microfractures, des filons de quartz et de la foliation sur les formations géologiques offrant cette possibilité (comme dans le cas présenté sur la photo ci-dessous) et susceptibles de nous permettre une interprétation de la tectonique régionale.



3.2.1 - Les microfractures

Les rosaces de la figure 26 représentent la distribution fréquentielle des directions des microfractures à l'affleurement.

Au centre du secteur d'étude (fig. 26a), constitué de migmatites et de granites, les directions sud-ouest sont dominantes avec une absence de directions N 70, N 90 et N 140.

Sur la figure 26b, c'est-à-dire au Nord, toujours dans les migmatites, ce sont les azimuts N 10-N 20 qui sont fréquents, suivis des directions est-ouest. Seule la direction N 130 n'apparaît pas.

3.2.2 - Les filons de quartz

Ils sont relativement abondants dans le secteur d'étude selon des directions aussi variées que fréquentes. Leur distribution spatiale est semblable à celle des grands linéaments. Seuls les filons de quartz de direction N 60, N 100 et N 140 ne figurent pas sur la rosace de la figure 27.

3.2.3 - La foliation

Elle correspond sur le terrain aux structures des migmatites et des granito-gneiss, à l'alignement des enclaves sur les affleurements, à la schistosité des séries métamorphiques (photo précédente) et enfin à l'orientation des phénoblastes.

La figure 28 est une rosace de la distribution fréquentielle des directions mesurées à l'affleurement où l'on observe une prédominance des directions N 50, N 20 et N 70-N 80.

3.2.4 - Conclusion sur les différents diagrammes FIG 28A

De tous les diagrammes (en rosaces), que ce soient ceux issus des clichés aériens ou des mesures sur les affleurements, on peut faire les observations suivantes:

- Au niveau des rosaces de linéaments, aucune ne se superpose à l'autre. Ceci est dû dans un premier temps à la dissemblance du matériel géologique que ces fractures affectent et dans un second temps à leur genèse qui n'est certainement pas la même. Il en est de même pour les rosaces des microfissures, des filons de quartz et de la foliation qui diffèrent entre elles et des autres.

Cependant, la distribution spatiale vaste des filons de quartz semblable à celle des linéaments peut être un argument qui milite en faveur de leur mise en place suivant les discontinuités ouvertes créées lors des principales phases tectoniques.

3.3 - CONDITIONS D'APPARITION DES FRACTURES

Selon ANDERSON (1963), RAMSEY (1967) et SOULA (1973), lorsqu'un système triaxial de contraintes principales T1, T2, T3 s'exerce sur un matériel cassant, il apparaît des fentes de tension ou diaclases I qui sont des discontinuités parallèles à la direction de la contrainte principale T1 et perpendiculaires à la contrainte principale minimale T3. Ces diaclases peuvent rester ouvertes ou se remplir par des filons de natures diverses (quartz par exemple).

Dans ces deux cas, elles jouent un rôle dans la circulation de l'eau (fig. 29a).

1/ Cas des fractures III et IV

Les fissures de cisaillement obliques des compartiments séparés par les fentes de tension liées à la contrainte principale T1 subissent des déplacements dextres ou sénestres.

La contrainte principale T1 devient bissectrice de l'angle du dièdre formé par les deux plans obliques. Cet angle vaut théoriquement 90° mais à cause des angles de friction de 30° qui introduisent les forces de frottement, il est ramené à 60°.

T3, la contrainte principale minimale est alors bissectrice du dièdre obtu de 120°.

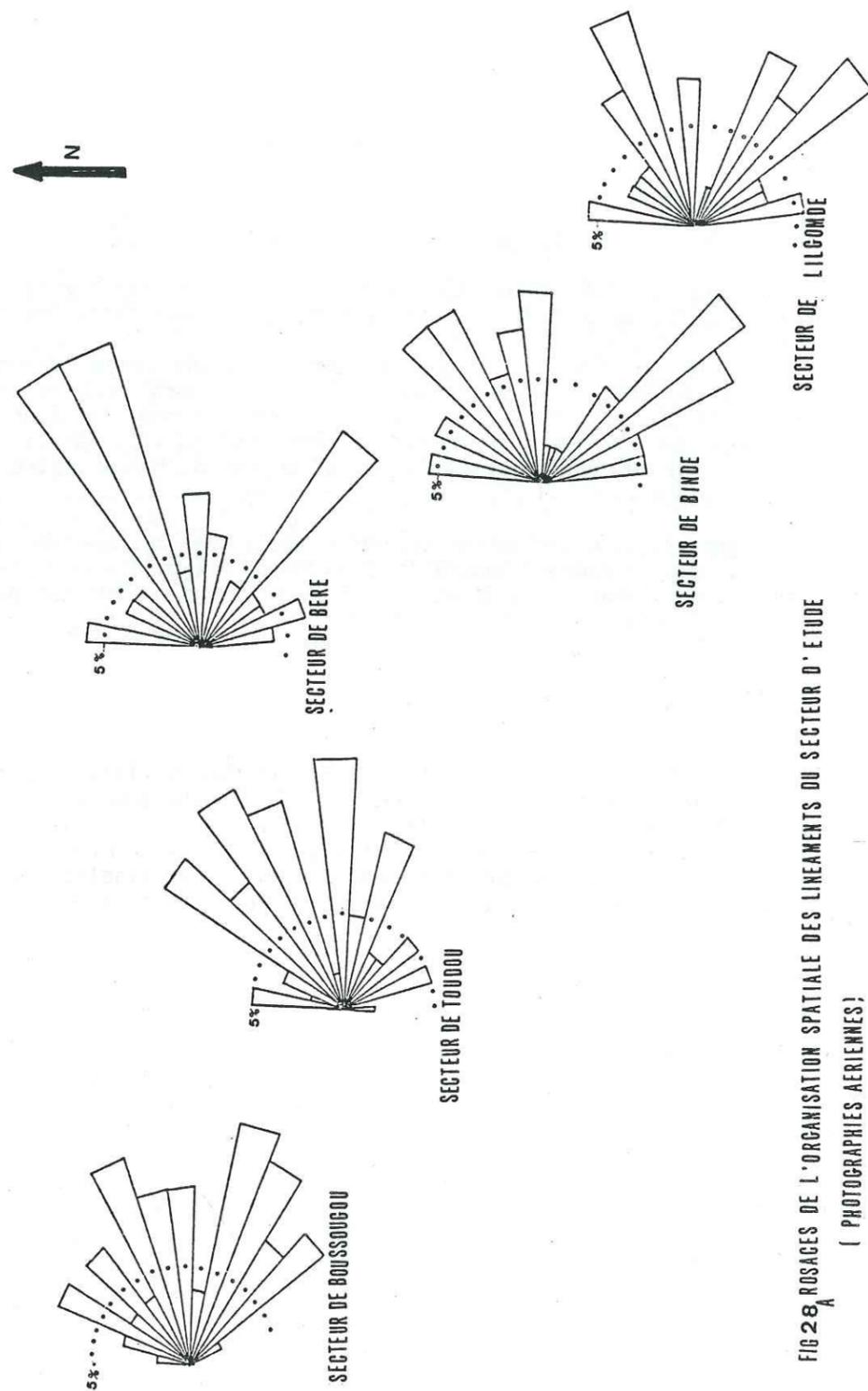


FIG 28. ROSACES DE L'ORGANISATION SPATIALE DES LINEAMENTS DU SECTEUR D'ETUDE
(PHOTOGRAPHIES AERIENNES)

T2 est parallèle à l'intersection des deux plans. Les joints obliques à T1 sont fermés.

Dans le cas où le cisaillement apparaît sous forme de shearzone (fig.29b), deux types de plans se disposent le long de cette zone.

- les fentes de tension en échelon ou fieldens polten qui font un angle de 30° avec la zone compte-tenu de l'angle de friction de 15° . Elles sont ouvertes.

- les cisaillements de Riedel qui se manifestent par deux jeux
 - . un jeu R faisant un angle de 15° avec la zone;
 - . un jeu R' faisant un angle de 70 à 80° avec la zone.

2/ Cas des joints du Groupe II

Ils sont perpendiculaires à la direction de la contrainte maximale T1. Appelés souvent fentes de tension, ils s'ouvrent lors des plissements ou des déformations intenses du rocher.

3.3.1 - Etude des données de terrain (foliation)

Les directions N 50 sont plus fréquentes au Nord-Est du secteur d'étude où elles marquent l'orientation générale des schistes et des granites migmatitiques. Cependant à Sinikiéré, on note près d'un massif granitique des schistes d'orientation est-ouest et N 70.

Au Nord de Manga, c'est-à-dire au centre de notre terrain d'étude, bien que les directions N 50 subsistent dans le granite orienté de Simbri, il apparaît des schistes birrimiens d'orientation N 20-N 60. Cette schistosité se retrouve plus au Nord dans les formations de la même série à Kone Kongo situé au Nord de Kaïbo. A l'extrême Nord du secteur d'étude dans la région de Kombissiri, ce sont les directions N 70 et N 80 qui sont les plus fréquentes.

On rencontre notamment la direction N 70 à Toéyoko où elle souligne l'orientation des micaschistes à grenat, puis à Guidssi à l'Ouest de Kombissiri où elle correspond à l'orientation des phénocristaux des granito-gneiss.

La seule direction isolée est celle de N 150 qu'on ne trouve qu'à Gafo (un quartier nord de Manga). Cette direction est celle d'un sillon étroit d'amphibolite (hornblendite) liée à un filon de quartz de même direction. Il existe donc trois directions prépondérantes auxquelles s'ajoute une quatrième bien rare.

Ces directions diversifiées de la foliation impliquent qu'il y a eu au moins quatre phases tectoniques dans la région où la dernière semble être liée à la direction N 150. D'autre part, la direction N 20 est celle des schistes birrimiens. Le granite de Simbri qui l'intrude est certainement postérieur à la phase tectonique birrimienne. Nous représentons dans le tableau 13 la chronologie des phases tectoniques et les fractures qui leur sont liées.

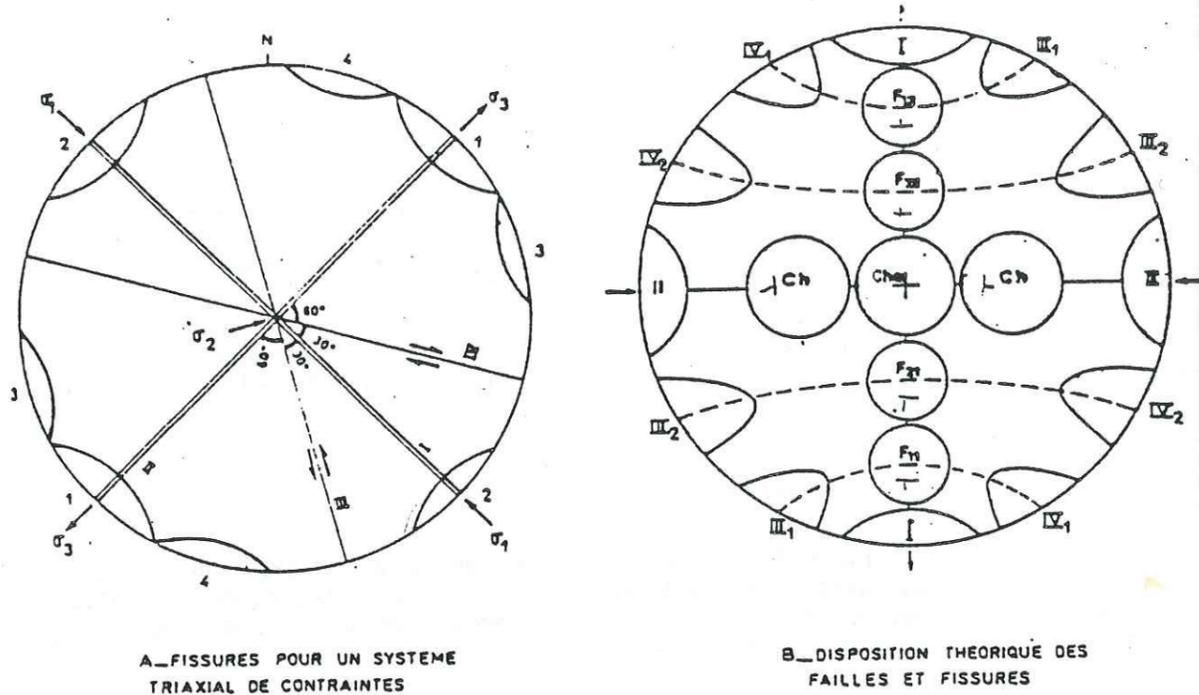
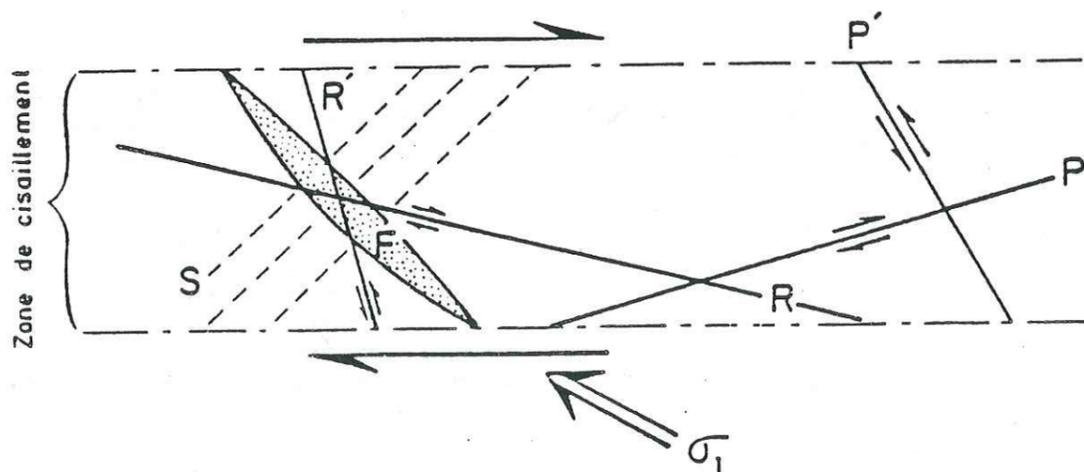


FIG 29 A

STRUCTURES PLANAIRES D'UNE ZONE DE CISAILLEMENT

($\psi = 30^\circ$)



- F lentes de tension en échelon
- R et R' cisaillement de Riedel
- P cisaillement synthétique
- P' cisaillement antithétique
- S schistosité

FIG 29B

Phases tectoniques	Schistosité et Foliation	Fente de tension	Fissure de cisaillement
1	20	110	80-140
2	50	140	110-170
3	70	160	130-190
4	150	60	90-30

Tableau 13: Chronologie des phases tectoniques

3.3.2 - Comportement hydraulique des différentes fractures

En nous référant aux conditions d'apparition des fractures on remarque qu'avec les différentes phases qui se sont succédées, les fractures de direction N 20, N 50, N 70 et N 150 ont joué en joints fermés, alors que les fractures de direction N 10, N 30, N 60, N 110, N 130, N 160 et N 170 sont des fractures ouvertes capables de jouer un rôle hydraulique très important.

3.3.3 - Résultats obtenus

Le tableau 14 représente les directions de faille sur lesquelles nous avons implanté les forages au Nord-Ouest du secteur d'étude. Les résultats obtenus démontrent la fiabilité de notre conclusion sur le comportement hydraulique des différentes fractures.

3.3.4 - Conclusion sur l'étude de la fracturation

L'étude de la fracturation menée à l'échelle des photographies aériennes et des observations de terrain nous a permis d'appréhender l'organisation fracturale de notre secteur d'étude.

Les diagrammes en rosaces tirés de la carte de fracturation nous ont permis de suivre la répartition en directions et en fréquence dans l'espace des linéaments repérés sur les photographies aériennes. Mais les structures linéaires relevées sur les clichés aériens doivent être considérés avec prudence. Sur notre secteur d'étude, le socle est constitué, rappelons le, aussi bien de roches métamorphiques (schistes, migmatites, orthogneiss, mylonites) que plutoniques (granites intrusifs parfois orientés) indifféremment traversées par les formations filoniennes.

On conçoit alors aisément que la seule exploitation des photographies aériennes ne puisse permettre de dissocier les différentes structures planaires qui affectent ces formations et par conséquent se substituer aux autres analyses de terrain. C'est pourquoi les microfractures et les filons de quartz ont été eux aussi rangés dans des diagrammes de fréquences de façon à percevoir leur organisation et leur superposition par rapport aux linéaments observés sur les photographies aériennes.

Localité	Direction des failles	Profondeur (m)	Débits (m ³ /h)
RAKAYE MOSSI	N 120	56	18
PAROURE	N 165	Pas foré	-
SARANA	N 60	44	7,2
TAMPOUY	N 110	44	4,5
ZINGDEGUIN	N 130	44	7,2
BOUSSOUGOU	N 105	53	6
LAMZOUDO	N 130	50	18
LOGDIN	N 150	47	très faible
TOEBANAGA	N 100	41	2
BALONGUIN	N 110	41	1
NABINKISMA	N 170	41,80	7,2
SAMSAONGO	N 135	48,6	9
RABOGTENGA	N 90	40,5	36
SINCINE	N 100	50	7,2
SILIMBA	N 170	44	0,9
GOUDRI	N 175	70	0,2
SORETUILI	N 160	56	6
BAKOGO	N 170	48	1,2
BAKIEKMA	N 170	56	2
KOMBUBWADE	N 140	50	0,2
KOUIGRISINCE	N 0	53	0,4

Tableau 14: Productivité des ouvrages en fonction des directions des linéaments

Puis enfin l'analyse de la foliation en rendant compte de la succession de plusieurs phases dans la région ont été utile pour la détermination des fractures capables de jouer un rôle hydraulique. C'est pourquoi nous disons qu'aucune étude hydrogéologique ne peut se faire aisément dans les pays à socle cristallin, sans une connaissance préalable de la tectonique dont l'analyse permet toujours de réduire les risques d'échec des forages au minimum.

QUATRIEME PARTIE

HYDROGEOLOGIE

METHODES D'IMPLANTATION DES OUVRAGES DE CAPTAGE
ET LES DIFFERENTS TYPES DE NAPPE

--

- 4.1 - LES METHODES DIRECTES
- 4.2 - LES METHODES INDIRECTES
- 4.3 - LES DIFFERENTS TYPES DE NAPPES
- 4.4 - FACTEURS DE PRODUCTIVITE DES NAPPES PROFONDES
- 4.5 - EXECUTION ET EQUIPEMENT TECHNIQUE DES OUVRAGES
- 4.6 - ETUDE PIEZOMETRIQUE

CHAPITRE IV

METHODES D'IMPLANTATION DES OUVRAGES DE CAPTAGE
ET LES DIFFERENTS TYPES DE NAPPE

--

4 - METHODES D'IMPLANTATION DES OUVRAGES

Notre secteur d'étude comporte deux domaines géologiques:

- Un domaine à dominante granito-migmatitique qui est le plus étendu. Il est caractérisé par une potentialité hydraulique assez faible qui peut toutefois être améliorée en exploitant judicieusement toutes les données de terrain.

- Un domaine volcano-sédimentaire caractérisé par sa frange d'altération souvent épaisse, mais malheureusement argileuse, et par son hétérogénéité lithologique marquée par les filonnets de quartz qui la parcourent en agissant comme des drains. De ce fait, grâce à l'acquisition de la porosité de fracture ces formations peuvent avoir des réserves d'eau intéressantes.

De toute façon la finalité de toute étude hydrogéologique est de permettre d'aller chercher l'eau où elle se trouve. Pour y parvenir, des méthodes non pas juxtaposées, mais complémentaires sont nécessaires à l'hydrogéologue praticien. C'est notamment la photogéologie, la géologie, la géomorphologie et la géophysique.

4.1 - Les méthodes directes

4.1.1 - La photogéologie

La photo-interprétation a pris une importance considérable en hydrogéologie du socle ouest-africain depuis l'orientation systématique de la recherche d'eau souterraine vers la localisation des fractures pour y implanter les forages.

La photographie aérienne constitue le document le plus précieux. Elle complète efficacement les cartes topographiques et géologiques ou les remplace dans certains cas. C'est une méthode rapide et peu coûteuse pour tracer une esquisse structurale, voire géologique, mais surtout pour repérer les fractures dont la productivité dépend généralement de leur taille, de leur ouverture liée à leur orientation. C'est ce que nous avons vu dans l'étude de la fracturation.

Elle peut donner une idée sur l'épaisseur moyenne probable des altérites et permettre l'implantation des forages sur les noeuds des fractures ou sur les fractures longues que l'on sait productives dans beaucoup de cas. La figure 30 est tirée de la carte de fracturation au 1/50.000e du secteur d'étude et illustre l'implantation photogéologique des forages de Nabinkisma, Samsaongo et Raboytenga, villages situés tous à l'Ouest de notre terrain d'étude.

D'autre part, selon plusieurs auteurs ayant travaillé sur le socle cristallin du Burkina Faso, les failles kilométriques sont profondes et souvent aquifères si elles traversent des marigots et des rivières.

C'est en fait sur ces critères que nous nous sommes basées pour implanter certains forages aux croisements des fractures et d'autres sur les failles simples, mais longues.

Ainsi donc, le linéament est-ouest de cette figure 22 sur lequel s'alignent les trois forages est en fait un filon de pegmatite. Sur le terrain il est matérialisé par un alignement de baobabs dans le village de Samsaongo. Cet alignement s'estompe au niveau de la rivière de Nabinkisma qui coule dans une direction nord-sud et dont les bords connaissent un élargissement dans l'axe de l'alignement d'arbres. Nous avons donc supposé que cette anomalie traverse la rivière. L'implantation photogéologique suivie d'un sondage électrique a confirmé l'hypothèse puisque le forage exécuté au point du sondage électrique a rencontré le filon à 32 m de profondeur et donné un débit de 7,2 mètres cubes / heure.

C'est au vu de ce résultat que les forages de Samsaongo et le forage F2 de Guissi furent implantés sur les épontes de ce filon et ont donné un débit de 18 m³/h chacun.

Quant au forage de Rabogtenga, il a été positionné sur une faille longue de 7 kilomètres environ qui a l'avantage de traverser deux cours d'eau. C'est ce forage qui est d'ailleurs le plus productif de la zone avec un débit de 36 m³/h pour une profondeur de 40 m.

4.1.2 - La géologie

Dans la région à socle cristallin et cristallophyllien, les meilleurs aquifères correspondent aux zones dans lesquelles la tranche d'altération a une épaisseur assez importante tout en étant constituée de matériaux aussi grossiers que possible. La recherche d'eau dans ces types de terrain consiste à mettre en évidence ces facteurs favorables en vue d'implanter les ouvrages.

Très souvent toute la recherche est axée sur le couple fracture-altération. C'est pour atteindre ces objectifs que l'hydrogéologue fait appel à la méthode d'investigation indirecte, de reconnaissances structurales et géologiques.

Les observations géologiques en nous aidant à connaître la nature pétrographique des formations, leurs déformations et les contacts anormaux sur le terrain constituent une méthode par excellence non négligeable dans le choix des sites. Ne nous a-t-elle pas guidé dans l'implantation du forage productif de Lilgomdé (Kaïbo) sur le contact schistes-migmatites ?

En effet, après plusieurs kilomètres de trainés électriques sans résultats, nous avons remarqué un alignement de gros arbres (baobabs) au Nord de la localité. Ce contact entre les schistes du Nord et les migmatites de la partie sud (Fig 31) est souligné par l'alignement d'arbres d'orientation N 60 qui est probablement celle du contact.

L'implantation géologique du forage dans l'axe de cet alignement fut confirmée par un profil électrique suivi d'un sondage électrique.

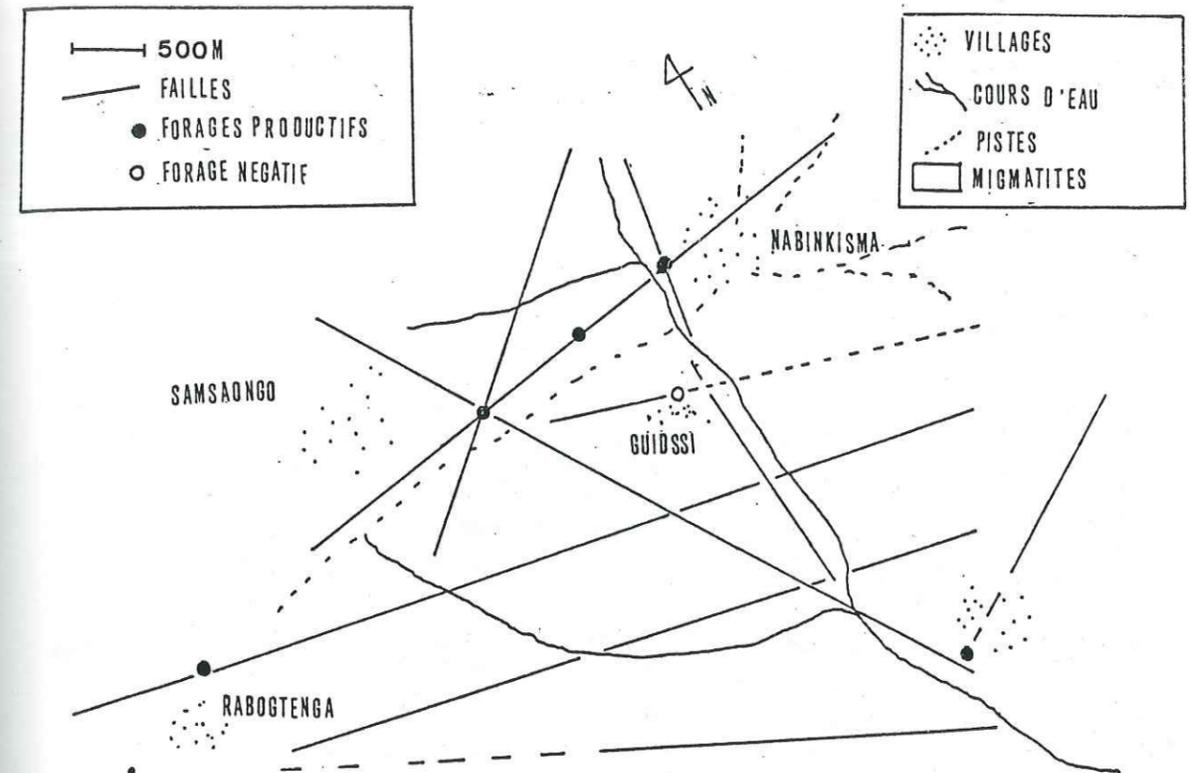


FIG 30 IMPLANTATIONS PHOTOGÉOLOGIQUES À L'OUEST DU SECTEUR

Cette région est caractérisée par les migmatites à pegmatites qui sont des formations hydrogéologiquement intéressantes si elles sont fracturées.

Selon ENGALENG, 1975, l'implantation des forages sur les noeuds des fractures présente deux avantages:

. Celui de rencontrer une importante couche d'altération, et enfin celui d'avoir une chance sur deux de rencontrer une fracture aquifère.

En effet, les zones fracturées s'accompagnent toujours de couloirs d'altération qui deviennent latéralement et verticalement plus importants au niveau des intersections des fractures.

Et comme nous le verrons dans le prochain chapitre, même s'il n'existe pas toujours une corrélation positive entre l'épaisseur des altérites et la productivité des ouvrages, un strict minimum est nécessaire pour le stockage des eaux souterraines.

L'exécution du forage fut difficile en raison de la forte épaisseur d'altérites argileuses. Mais le cortège filonien recoupé en profondeur et dont le développement est lié au contact est à l'origine du débit de 12 m³/h que nous avons eu à 37 m de profondeur.

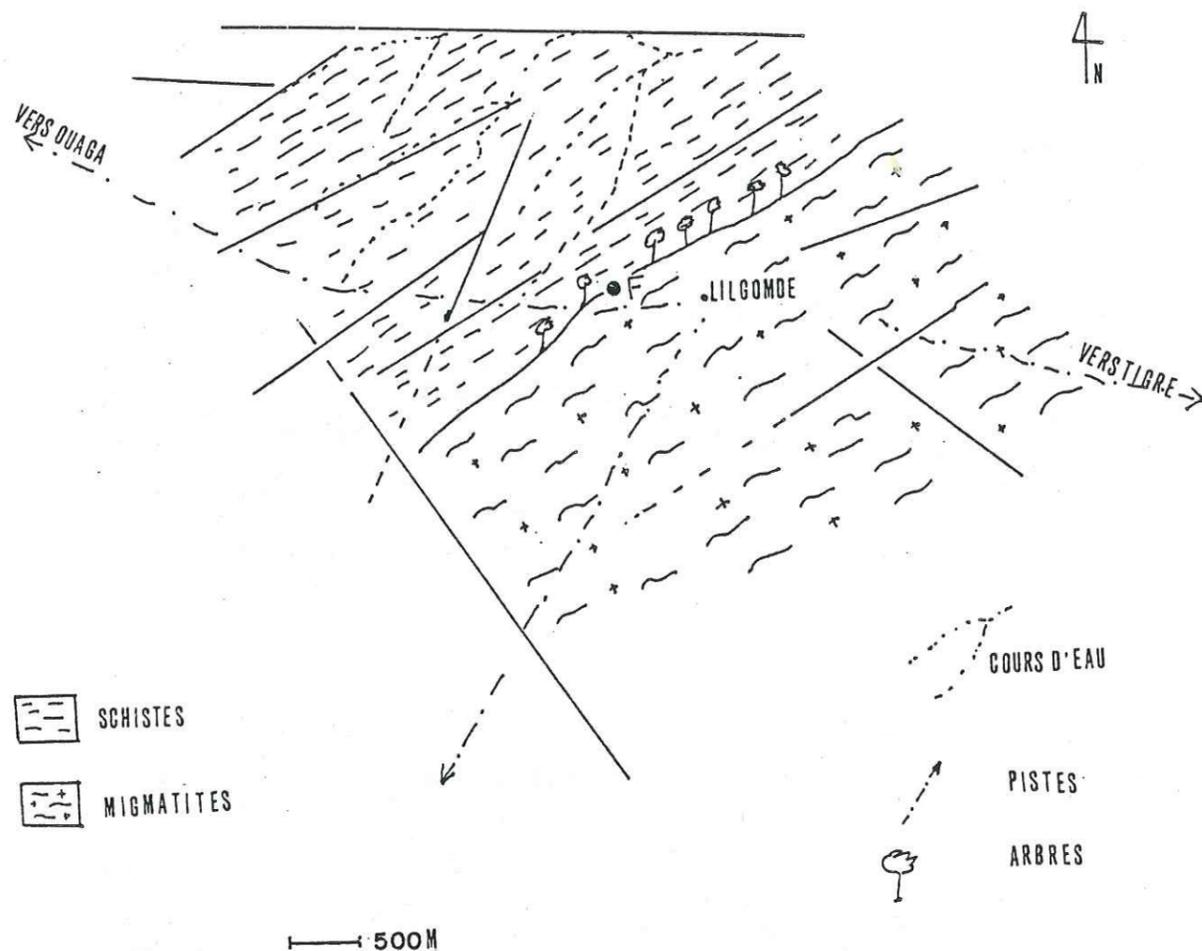


FIG 31 IMPLANTATION GEOLOGIQUE DU FORAGE DE LILGOMDE

4.1.3 - La géomorphologie

Le paysage le plus caractéristique des régions du socle du Burkina-Faso est un modèle ondulé avec des plateaux à relief peu accusé dans les granito-gneiss, mais plus accusé dans les terrains birrimiens que coiffe la cuirasse latéritique. Cette cuirasse est le plus souvent entaillée par le

réseau hydrographique permettant la distinction sur le plan topographique, des marigots et des bas-fonds qui constituent dans la majorité des cas les points visés par les hydrogéologues dans le cadre de leur prospection en hydraulique villageoise.

4.1.4 - Les indices biologiques

L'importance de la fracturation dans le mode de gisement des eaux souterraines n'est plus à démontrer. Mais la localisation des failles par les seules observations géologiques n'est pas évidente surtout dans notre cas où la rareté des affleurements et la planéité du relief rendent souvent difficile le repérage des linéaments par simple observation pétrographique. A.N. SAVADOGO avait fait remarquer en 1984 que les indices biologiques (termitières et végétaux hydrophiles) pouvaient être très utiles dans la recherche d'eau en pays cristallin. Il démontre par la même voie que cette méthode permet de résoudre deux problèmes sur le terrain:

- . celui de la localisation approximative des fractures repérées sur les photos aériennes afin d'orienter convenablement les profils de trainés électriques;

- . et ensuite celui de combler le hiatus entre la dimension des failles repérables en photographie aérienne et celles visibles sur affleurement.

4.1.4.1 - Les termitières épiquées

Parmi les genres que l'auteur décrit, il en retient trois qui bien que possédant eux aussi des valeurs inégales en prospections hydrogéologiques sont les plus intéressants. Ce sont essentiellement:

- . les Cubitermes qui, vivant dans les zones à forte épaisseur de cuirasse latéritique sont à même de guider pour la localisation des cuirasses noyées;

- . les Bellicositermes et les Subhyalinusitermes dont les constructions fraîches et géantes en saison sèche sont un signe de présence d'eau en profondeur.

4.1.4.2 - Les végétaux hydrophiles

Ils ont toujours été pris en compte par les villageois dans l'implantation de leurs puits traditionnels. Le plus souvent les linéaments repérés sur les photos sont le fait d'arrangements végétaux parmi lesquels A.N. SAVADOGO cite: *Ficus gnapholocarpa*, *Diospyros nerpiliformis*, *Piliostigma reticula*, *Mitragynis inermis*, auxquels nous intégrons *Parkia-bigglobza* pour nous avoir donné des indications aboutissant à de bons résultats sur notre terrain d'étude: notamment à Douré, Dindourgou, Béré et dans plusieurs villages situés en dehors de notre zone et où nous avons travaillé dans le cadre du projet KFW/ONPF. A chaque fois, les forages implantés au pied de cet arbre (s'il est feuillu) assurent de très bons débits ou tout au moins ne sont jamais secs.

4.2 - Les méthodes indirectes

4.2.1 - La prospection géophysique

La porosité du socle reste très faible en l'absence du phénomène d'altération (nous ne le disons jamais assez), elle même liée à la fracturation.

Les ressources en eau du pays cristallin se localisent alors dans la frange altérée et fissurée. Bien que le réseau de fracturation soit le plus souvent dense, l'extension latérale et verticale des altérites qui leur sont liées est très limitée.

L'utilité de la prospection géophysique intervient donc dans la recherche des limites des zones aquifères même profondes puisque depuis l'avènement du marteau fond de trou, nous sommes en mesure d'aller la chercher à de grandes profondeurs.

Il existe à cet effet plusieurs méthodes géophysiques. Mais avant d'évoquer ici ces différentes méthodes, il convient de rappeler l'histoire de la prospection géophysique au Burkina-Faso.

L'utilisation de la prospection géophysique dans les investigations hydrogéologiques date de 1957 dans la région du Burkina occidental. Puis à partir de 1960, des missions de prospection géophysique notamment de la Compagnie Générale de Géophysique (C.G.G.) menées pour le compte du Service de l'hydraulique et de l'équipement rural à travers le socle cristallin du pays, devaient démontrer l'utilité de cette science dans la recherche d'eau.

Aujourd'hui de nombreux services d'état comme l'O.N.P.F. (Office National des Puits et Forages), le B.U.M.I.G.E.B. (Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina) et des Sociétés privées comme I.W.A.C.O., auxquels il convient d'ajouter les missions ponctuelles d'Ingénieurs conseils (I.G.I.P. et D.I.W.I.) sont tous dotés de brigades de géophysique dans le cadre de leurs interventions à travers tout le pays.

Nous profitons de ces lignes pour remercier la société D.I.W.I. et son Chef de mission M. J.C. CEUPENS qui a bien voulu nous associer aux travaux de prospection géophysique en nous plaçant à la tête d'une équipe à laquelle nous adressons aussi nos remerciements.

4.2.1.1 - La méthode sismique

C'est une méthode qui utilise le champ élastique créé artificiellement soit par des chocs mécaniques, soit par une explosion. Son utilisation en hydrogéologie consiste à étudier la propagation des ondes réfractées en construisant des courbes temps/distance. Elle est bien indiquée pour la recherche de grands débits d'eau vu son application positive en Côte d'Ivoire, au Mali et au Togo dans ce domaine. Mais du fait de son coût élevé, il semble qu'elle ne peut pas être rentable en hydraulique villageoise. Pour cette raison, elle n'est utilisée que dans quelques cas assez précis ou dans des études à gros moyens financiers. Le principe est le suivant: on suppose au

au départ que la vitesse d'une couche profonde est supérieure à celle d'une autre plus superficielle de façon qu'il puisse y avoir une réfraction totale (la vitesse des couches géologiques augmente avec la profondeur). Les temps reportés sur les dromochroniques correspondent aux ondes atteignant les premières les récepteurs (géophones). On peut ainsi définir la profondeur du substratum, l'épaisseur des altérites saturées d'eau et les altérites sèches.

4.2.1.2 - Les méthodes électromagnétiques

Ces méthodes reposent sur les phénomènes d'induction et se prêtent bien à la détection des corps conducteurs étroits verticaux (G.J. PALACKY et al., 1981). Elles sont utilisées en prospection minière et peuvent s'appliquer à la recherche des eaux souterraines dans le socle cristallin en permettant la mise en évidence des fractures et des filons de natures diverses. Mais très souvent la présence de la couche superficielle d'altération, conductrice rend difficile son interprétation.

Le principe des méthodes repose sur le fait que lorsqu'on soumet un corps électriquement conducteur à un champ magnétique primaire (H_p), ce corps est parcouru par un courant induit qui engendre à son tour un champ magnétique secondaire (H_s) qui, en s'ajoutant au champ primaire donne un champ résultant (H_r) différent, permettant de caractériser et de localiser le conducteur (ASTIER, 1971).

En considérant un plan contenant H_p et H_s , on peut décomposer chacun de ces champs en deux composantes spatiales suivant des coordonnées rectangulaires X et Z, on obtient ainsi Re et Im qui sont les composantes réelle et imaginaire du champ résultant (Fig.32).

Selon M.K. SEGUIN, 1971, on peut diviser les méthodes électromagnétiques en deux groupes:

- . les méthodes selon lesquelles la source du champ primaire est fixe, tandis que le récepteur est mobile;
- . les méthodes dans lesquelles émetteur et récepteur sont mobiles.

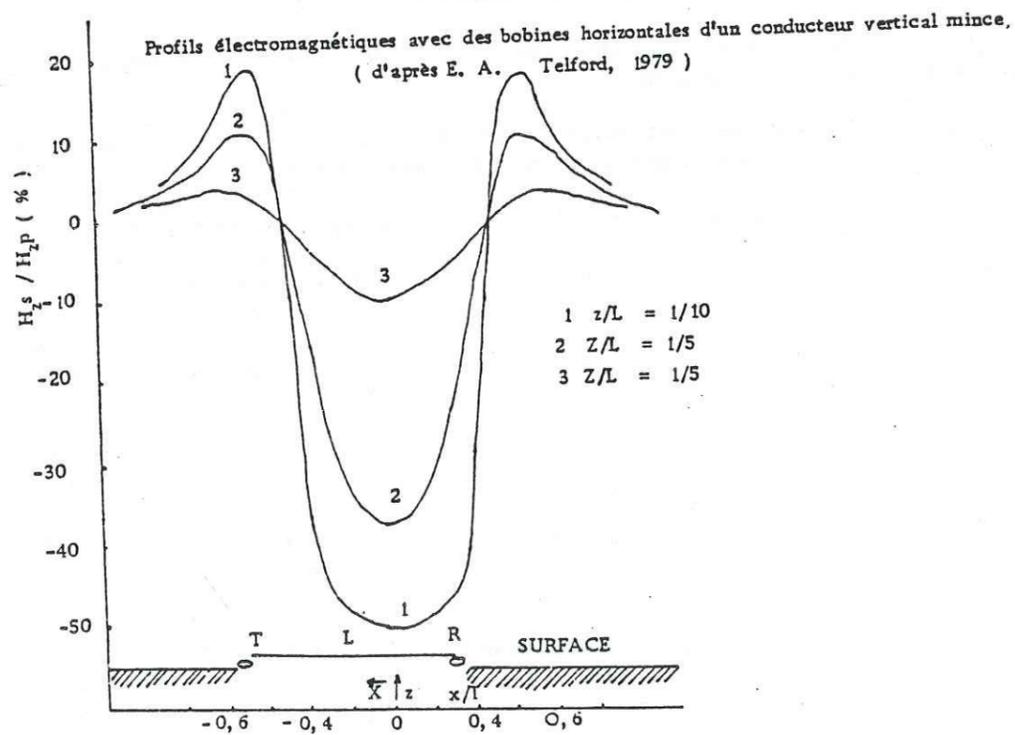
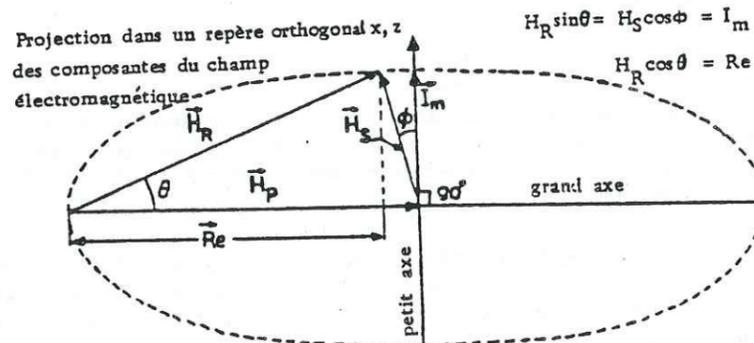
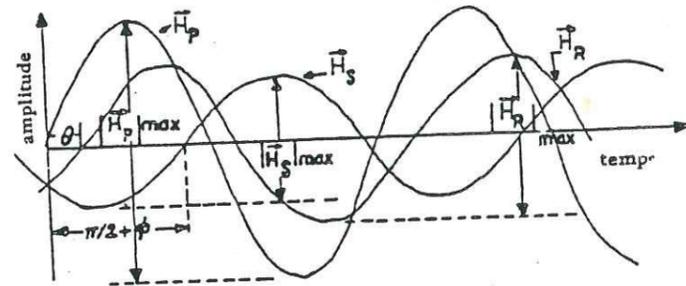
Les appareils utilisés pour les études expérimentales au Burkina-Faso correspondent à ces méthodes. Ce sont:

- Le magnétomètre EM 16 pour prospection électromagnétique V.L.F. (very low frequency). Ces appareils utilisent les champs électromagnétiques de basses fréquences conçus pour la navigation maritime et aérienne et sont émis, soit par les Etats-Unis, soit par la France. Du fait de l'orientation des stations recevables, il semble que les structures les mieux détectables sont celles orientées N 45 et N 105, ce qui présente un inconvénient de la prospection en U.L.F. et du magnétomètre EM 16, dont la profondeur d'investigation dépend de la résistivité du sous-sol. Par exemple, pour une résistivité de 200 ohm.m du sous-sol, la profondeur d'investigation est de 60 m au Burkina-Faso.

Il y a aussi le magnétomètre APEX.MAX.MINII qui est un couple émetteur-récepteur mobile manipulable avec des fréquences opérationnelles de 222, 444, 888, 1777 et 3555 HZ. La, la profondeur d'investigation du dispositif varie en fonction de:

FIG.32 : PROSPECTION ELECTROMAGNETIQUE. SCHEMAS DE PRINCIPE ET PROFILS OBTENUS AVEC BOBINES HORIZONTALES

Propagation dans le temps et l'espace des champs électromagnétiques



. la distance émetteur-récepteur. Elle est de 0,30 à 1 fois cette distance;

. de la résistivité des terrains: plus cette résistivité est basse plus la profondeur d'investigation est grande;

. des fréquences du champ électromagnétique émises: plus ces fréquences sont basses, plus la profondeur d'investigation est grande, l'inconvénient ici tient du fait que lorsque les fréquences baissent, l'amplitude des variations du champ électromagnétique décroît rendant aussi difficile la détection des anomalies en basses fréquences qui sont pourtant les plus pénétrants.

L'expérience a montré qu'il existe une coïncidence sur le plan pratique entre les anomalies électriques et celles électromagnétiques. En superposant donc un profil électromagnétique à un profil électrique, il est possible comme l'indique la figure 33 de faire de bonnes implantations de forages.

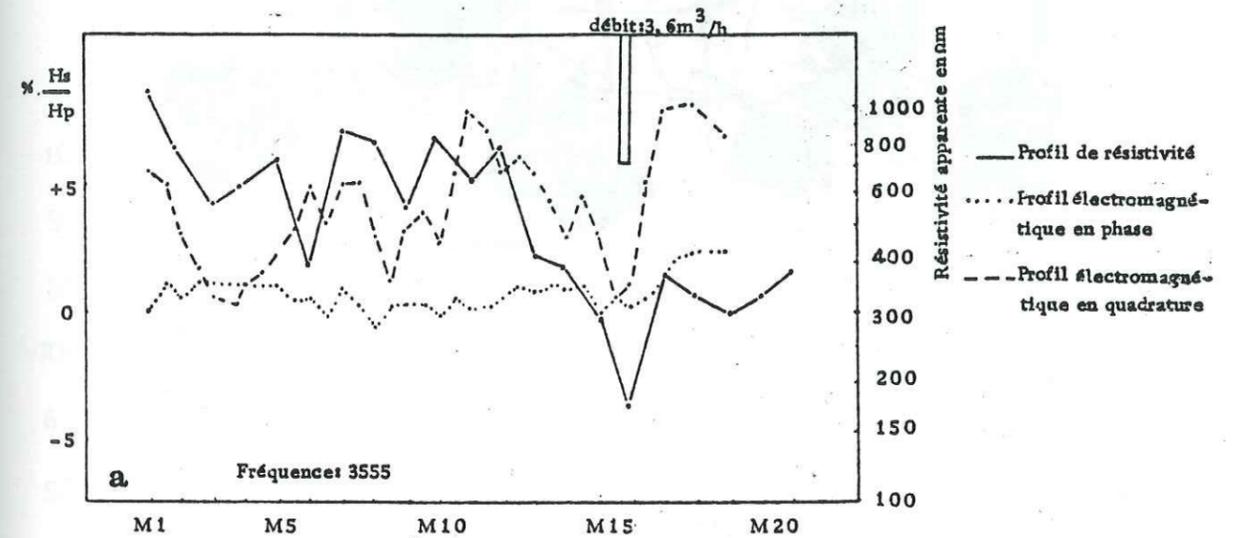


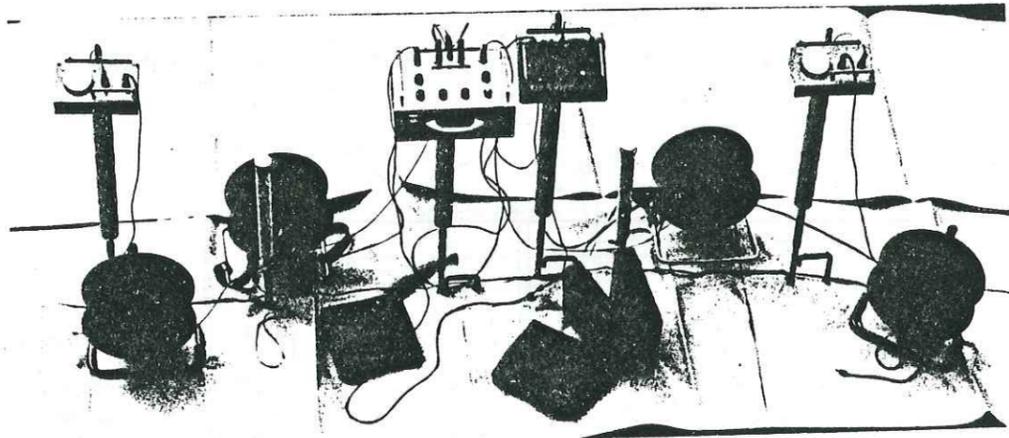
Figure 33 : Comparaison entre profil de résistivités et profil électromagnétique Camp militaire de Goughin (Ouagadougou Ouest) - site sur granite migmatitique

IN A. N. SAVADOGO

4.2.1.3 - La prospection électrique

Elle est la plus couramment mise en oeuvre en raison de sa légèreté et de son coût relativement bas. Nous avons utilisé le résistivimètre de terrain PR.1-AM-COPRERO mis au point par l'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne. La profondeur d'investigation de cet appareil peut atteindre 2000 m pour une longueur de ligne AB maximale.

LE RESISTIVIMETRE DE TERRAIN PR.1-AM COPERO ET SES ACCESSOIRES



Le principe de mesure est le suivant. Un courant continu I pénètre le sol par les électrodes d'émission A et B. Ce courant produit un champ électrique qui est mesuré par les électrodes M et N.

Dans les cas favorables, on peut ainsi par des méthodes d'interprétation simple déduire le nombre, l'épaisseur, la résistivité électrique des différentes couches qui constituent le sous-sol.

Dans le cas des sondages électriques, cette méthode utilise le dispositif de type SCHUMBERGER et consiste à éloigner par pas successifs, les deux électrodes A et B par rapport au centre géométrique O, le calcul de la résistivité apparente relative à une distance OA se fait par la formule:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad \text{avec} \quad K = \frac{\pi AM \cdot AN}{MN}$$

S'il s'agit des trainés électriques, c'est l'ensemble du dispositif qui est déplacé tout en gardant les distances qui séparent les quatre électrodes constantes.

4.2.1.4 - Résultats obtenus par la méthode électrique

a/ Les trainés électriques

Nous avons dit plus haut que la profondeur d'investigation croît avec l'écartement de la ligne AB. Le principe du profil électrique est basé sur ce phénomène. On choisit donc une valeur de AB assez grande pour permettre l'injection du courant jusqu'au bed-rock, ou tout au moins la frange fissurée. Généralement la ligne AB est choisie en fonction des observations faites sur les forages déjà existants dans la zone à prospecter.

En déplaçant cette ligne perpendiculairement à l'anomalie supposée, l'on peut suivre les variations latérales des altérites et le modèle du bed-rock. C'est pourquoi la méthode est utilisée pour localiser avec précision, les failles repérées sur photographies aériennes, les filons aveugles et les zones de contact des différentes formations. En somme cette méthode permet de circonscrire les faciès pétrographiques.

La figure 34 est celle d'un profil nord-sud perpendiculaire à un filon dont on supposait l'existence et qui est traversé par une rivière d'orientation N 360°.

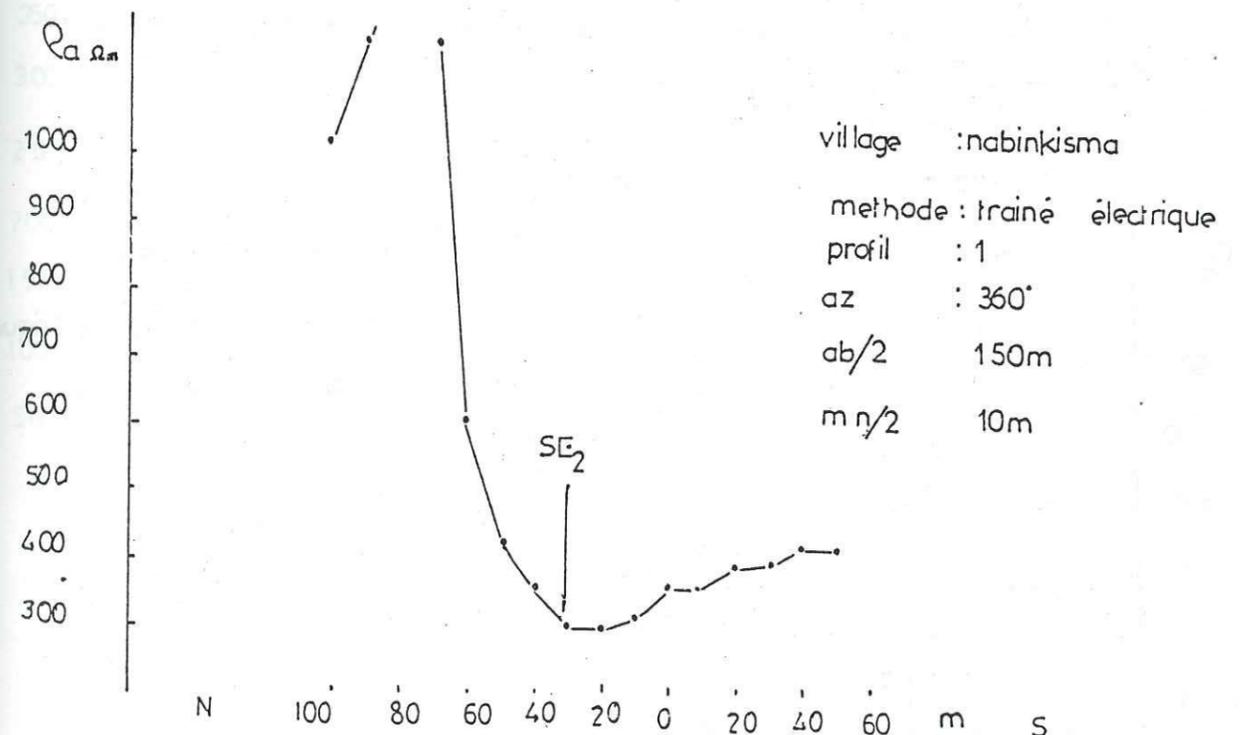


Figure 34

Le forage implanté au point de sondage électrique () indiqué sur la courbe de profil a effectivement rencontré le filon de pegmatite juste après l'altération. C'est ce qui nous a permis d'implanter sur ce filon les forages de Samsaongo et de Guidssi dont nous parlions dans le chapitre 4.1.

Sur cette figure la partie nord de la courbe de profil présente un pic à plus de 1000 Ωm . avec une extension latérale de près de 50 m. qui correspond probablement au filon de pegmatite. La partie sud présente l'allure générale des courbes de résistivités des terrains granitiques (300 à 600 Ωm). Le sondage électrique est exécuté au point le plus bas de la courbe. L'objectif de la géophysique est de localiser justement les zones à basses résistivités susceptibles d'être aquifères. C'est ce qui explique l'implantation de tous nos forages en ces points bas.

La figure 35 est un profil électrique N 350° perpendiculaire au contact schistes-migmatites dont nous avons parlé dans le chapitre 4.1.2. Le profil exécuté à ce niveau montre deux parties:

- . une partie gauche à basses résistivités apparentes qui caractérise les schistes;
- . une partie droite avec des résistivités de 700 Ωm qui caractérise les migmatites. Nous remarquons ici que le point de sondage électrique a été déplacé du point 0 à 70 m N, légèrement dans les schistes. Le forage bien que s'ébouyant en raison de l'épaisse formation argileuse fut quand même productif (12 m³/h), grâce certainement au réseau filonien développé en profondeur.

L'allure de cette courbe permet de dire que le contact schistes-migmatites est subvertical à Lilgomdé.

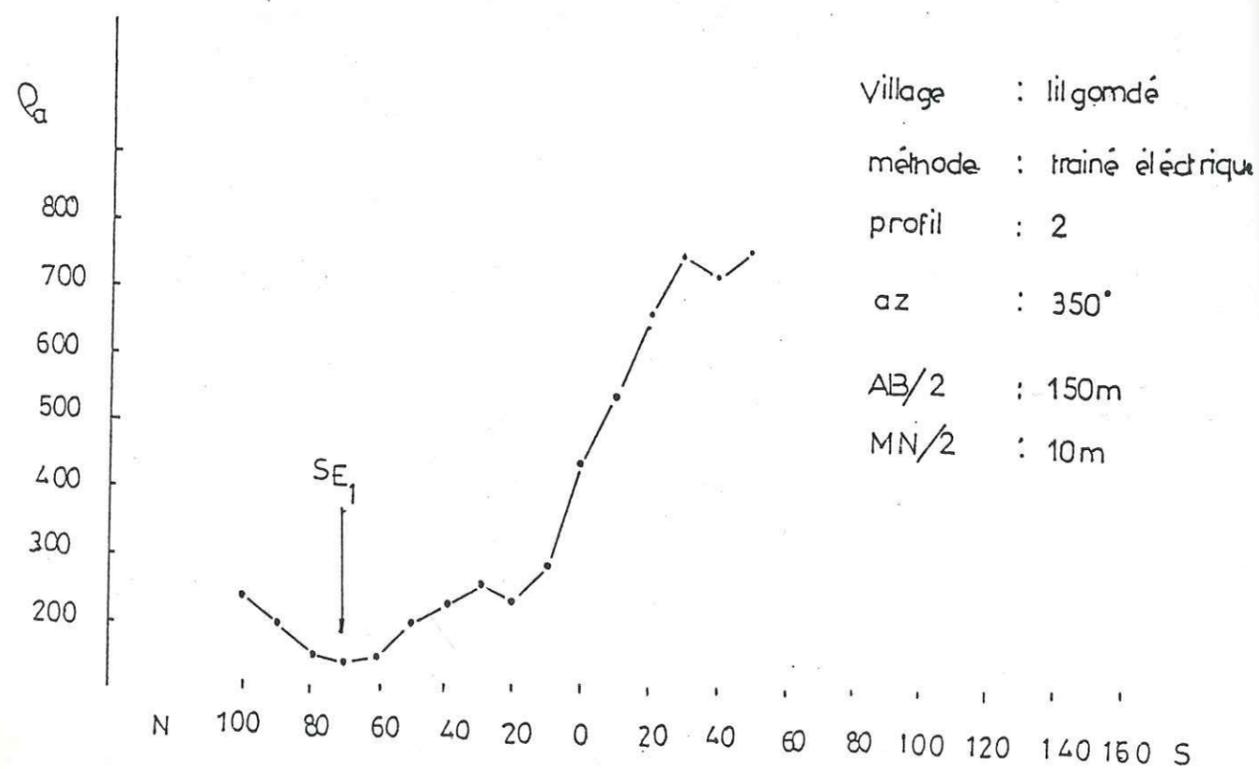


Figure 35

La figure 36 représente la courbe du profil électrique N 30° avec une ligne AB/2 = 150 m pour MN/2 = 10 m exécuté à Rakaye Mossi à travers les migmatites et les roches vertes dont les limites se caractérisent au milieu de la courbe par les résistivités inférieures à 50 Ωm . Toutes ces trainées électriques qui ont présenté de belles anomalies, c'est-à-dire des valeurs basses de résistivités par rapport à l'ensemble des mesures sont suivies de sondages électriques puisque pour une bonne prospection électrique ces deux techniques doivent toujours être associées.

Sur cette courbe nous faisons remarquer que le point de sondage électrique SE1 n'est pas situé au point le plus bas, mais en bout de pente ceci pour éviter les fortes épaisseurs d'altérites comme à Lilgomdé.



Figure 36

Néanmoins le forage exécuté en ce point bien que contesté au départ a donné un débit de 18 m³/h avec 18 m d'altération pour une profondeur totale de 56 m. J. BERGER et al. ont trouvé qu'en Côte d'Ivoire, ce sont les ouvrages implantés à mi-pente qui sont plus productifs que ceux implantés dans les axes les plus profonds où l'altération est la plus argileuse, du fait de la concentration vers les points bas des altérites argileuses lessivées à partir des crêtes. Si nous prenons en compte ces résultats, et les mêmes observations faites dans les sillons éburnéens du Burkina-Faso, on peut conclure que les méthodes d'implantation géophysique des ouvrages doivent viser les mi-pentes des courbes de profils électriques plutôt que les axes conducteurs.

L'une des difficultés majeures en prospection géophysique est la localisation avec précision du point d'intersection des fractures. Dans notre cas, la ligne de trainé AB est de 300 mètres - MN = 20 mètres avec des pas de mesures de 10 mètres. Les sondages électriques sont systématiquement réalisés sur les valeurs basses des résistivités qui ne sont pas forcément les points d'intersection des axes d'anomalie pourtant bien productifs dans beaucoup de cas. La localisation des points d'intersection des failles est difficile, car lorsque le profil de trainé électrique recoupe les zones broyées, c'est le plus souvent l'intersection de la faille avec le profil qui est connue avec précision et non la direction de l'axe conducteur qui se détermine plus aisément par interprétation des cartes de résistivités apparentes. Malheureusement, le programme bien circonscrit du projet pour lequel nous travaillons ne nous a pas permis de faire de telles cartes. Pour localiser avec précision le point d'intersection des failles, il est alors nécessaire de réduire le pas de mesures en trainé électrique jusqu'à une valeur minimale inférieure à 10 m, puis de réaliser des sondages pluridirectionnels sur ce dernier point.

b/ Les sondages électriques

Les courbes de sondages électriques obtenues compte-tenu du contexte géologique sont généralement des courbes à trois terrains marquées par un fond de bateau.

Généralement, les intervalles de variation des résistivités sont:

- . cuirasse latéritique: 200 Ω m à plus de 1000 Ω m;
- . arènes : 50 à 150 Ω m
- . altérites argileuses: 10 - 50 Ω m
- . roches fissurées : 100 - 300 Ω m
- . substratum sain : résistivité infinie

La formation conductrice est constituée par les arènes ou par les altérites argileuses.

- La branche descendante

Elle correspond souvent à la carapace latérique compactée qui est le premier résistant et qui constitue un écran au passage du courant lors des mesures. Pour le franchir, et c'est généralement le cas des autres terrains arides, il est nécessaire d'arroser les électrodes, les enfoncer au maximum tout en augmentant le voltage du courant entre les électrodes A et B. La carapace résistante se traduit par une translation verticale du graphe entraînant ainsi l'impossibilité d'apprécier la résistivité des arènes. Sur la figure 37 du sondage électrique de Rakaye Mossi où la résistivité baisse de la cuirasse latéritique (690 Ω m) aux arènes et roche fissurée 34 Ω m, l'on avait cru à une épaisseur d'altérites argileuses d'au moins 50 m comme l'indique la courbe sur laquelle d'ailleurs rien ne permettait de distinguer une couche d'arène ou de roche fissurée. Or en réalité l'on n'a traversé que 25 m d'altérites argileuses avant d'atteindre la roche verte fissurée sur une épaisseur de 27 m. Le forage a une profondeur totale de 56 m pour un débit de 18 m³/heure.

- Le fond de bateau

C'est la partie de la courbe qui marque les arènes argileuses et les arènes grenues conductrices. Très souvent, elle marque aussi la roche fissurée sans transition, surtout lorsque cette dernière n'est pas épaisse. La figure 38 est une courbe de sondage électrique réalisée dans les pegmatites broyées de Lamzoudo. Ici la frange fissurée et les arènes grenues ont les mêmes résistivités de l'ordre de 50 à 60 Ω m, ce qui rend difficile la détermination de la limite entre les deux faciès. Sur le terrain, pendant la foration, il n'y avait que 12 m d'arènes grenues sur les 40 m de profondeur. Ce forage a eu un débit de 18 m³/h pour une venue d'eau à 25 mètres.

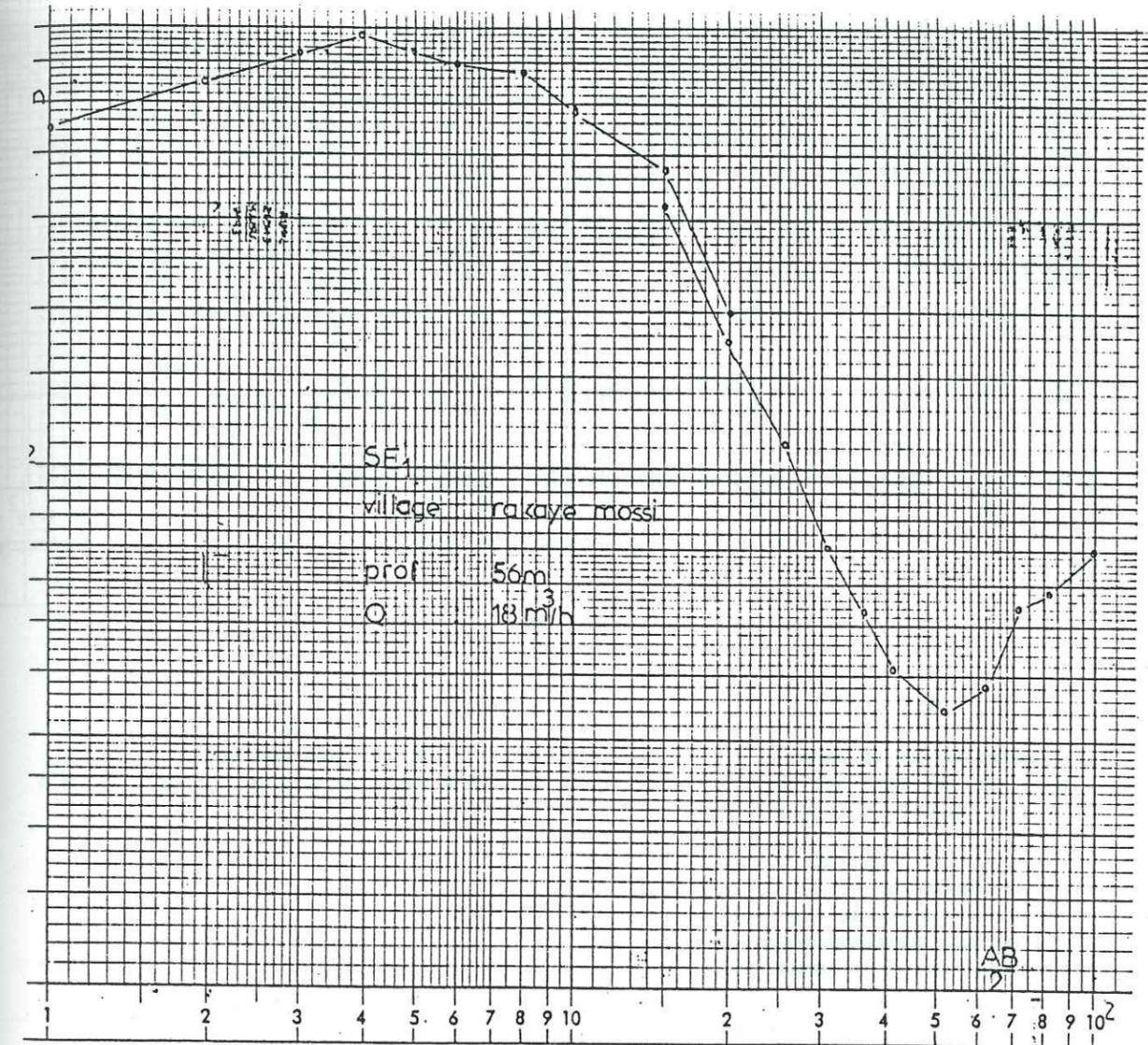


Figure 37

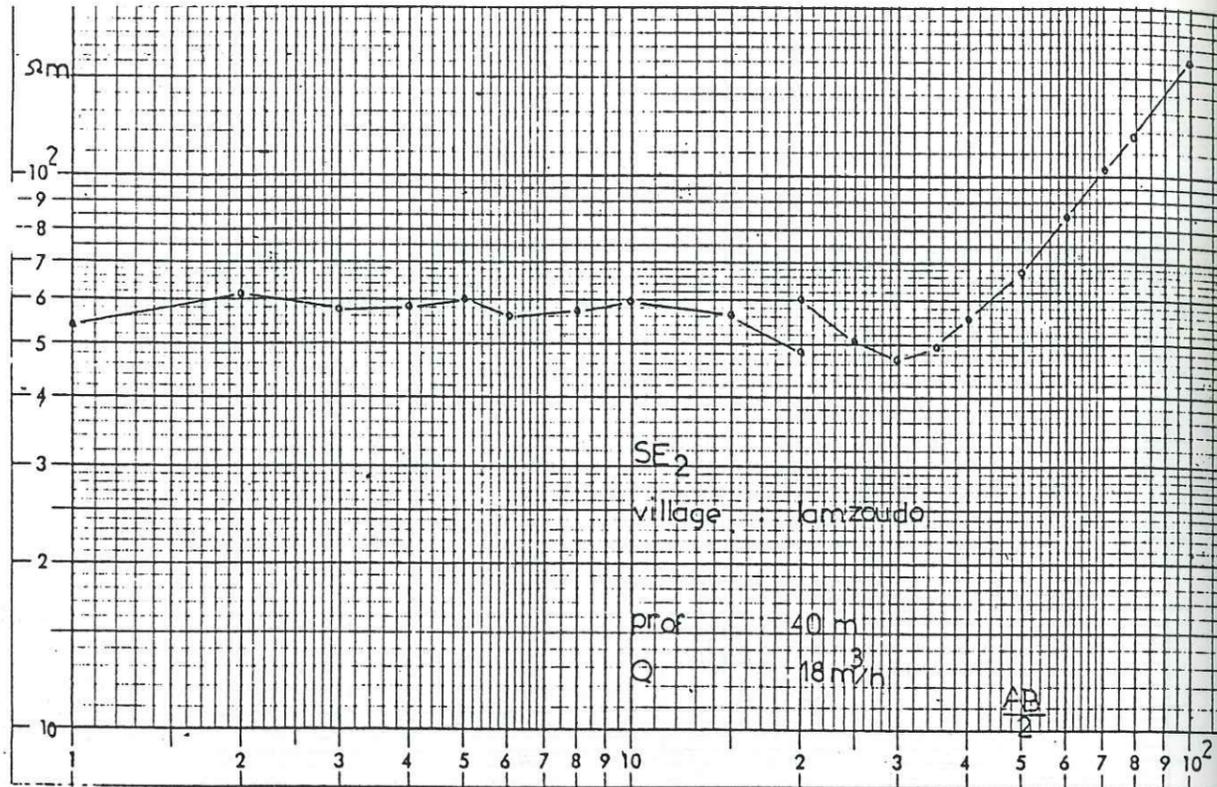


Figure 38.

La branche montante

C'est à son niveau que se situe le deuxième et dernier résistant qui se traduit par une remontée à 45° au niveau du substratum sain. Cette partie de la courbe marque aussi la frange fissurée qui se manifeste par une remontée lente de la branche. Plus elle est étalée, plus le substratum est profond et plus la présence d'aquifère est probable.

La figure 39 représente la courbe de sondage électrique à Sarana dans les migmatites et pegmatites - l'épaisseur d'argile bariolée est de 20 mètres. De 20 m. jusqu'à 44 m., c'est-à-dire jusqu'à la fin de la foration, nous n'avons pas quitté la zone fissurée composée essentiellement de migmatites à pegmatites. De telles conditions se rencontrent surtout au niveau des mégafractures où la caractéristique principale est l'épaisseur considérable de la zone broyée.

Les paliers de la branche ascendante

Sur la branche montante de certains sondages, on note des petits paliers qui ont un rôle très important en sondage électrique. Ils traduisent le plus souvent des venues d'eau liées soit à une zone fracturée, soit à des filonnets de quartz ou d'aplite, soit même à des roches basiques. C'est pourquoi, l'on doit toujours tenir compte de ces anomalies pour l'arrêt définitif de la foration, surtout si le débit obtenu jusqu'alors demeure insuffisant ou même nul.

Sur la courbe de la figure 40, on remarque un palier sur la branche montante entre 25 et 35 mètres. La venue d'eau à 32 mètres est probablement liée à ce palier qui n'était en fait que le filon de pegmatite broyée du forage de Nabinkisma dont l'épaisseur totale d'altérites argileuses était de 8 mètres. Le substratum sain commence à 50 mètres qui est aussi le fond de notre forage.

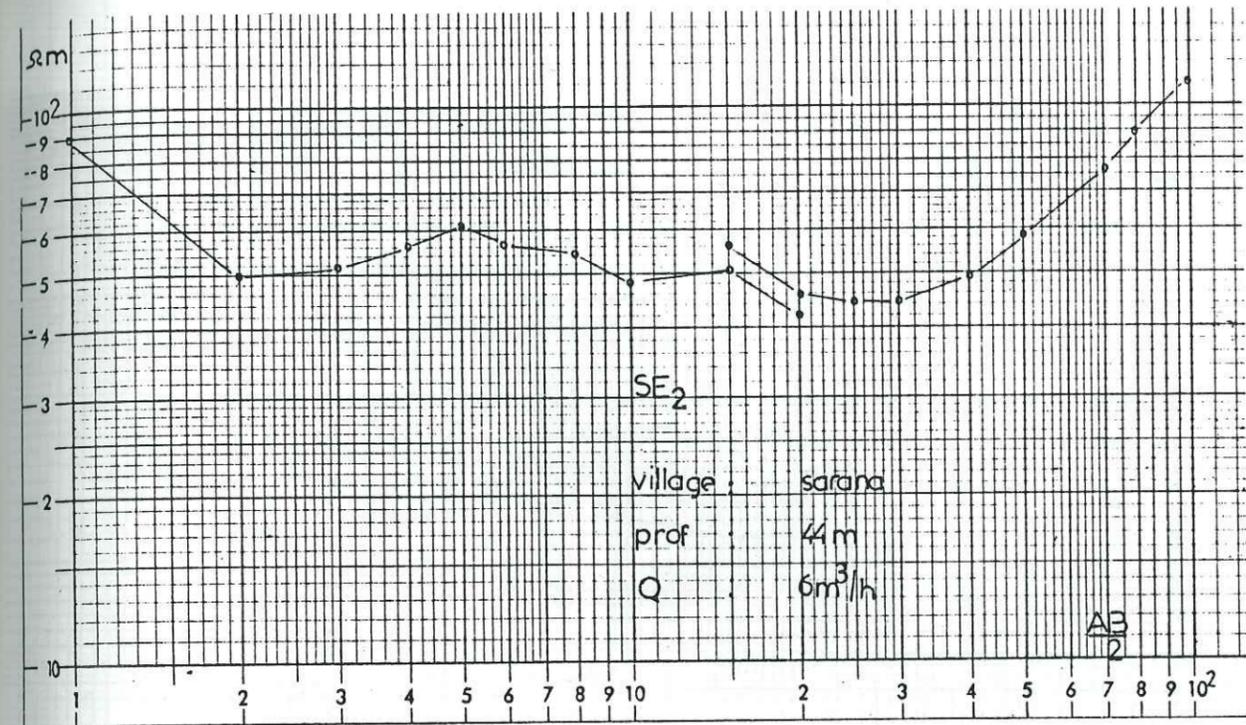


Figure 39.

Plusieurs cas analogues ont été rencontrés et les résultats obtenus obligent à la prise en considération de ces anomalies.

L'embrayage

Au cours des sondages électriques, on constate très souvent lorsque OA augmente, que V devient rapidement très petit et difficile à mesurer. Il faut alors débrayer, c'est-à-dire augmenter la distance MN en replaçant les électrodes plus loin. Cette manipulation se traduit au niveau de la courbe de sondage par deux types de saut:

.Le saut négatif

Le saut négatif de l'embrayage est réalisé lorsque quittant les arènes des zones bordières de la faille, on tombe sur la frange encore argileuse surmontant la couche fracturée. La figure 41 est la courbe de sondage électrique du village de Sinciné réalisé sur les migmatites à pegmatites. L'embrayage réalisé à 15 et 20 m a montré un saut négatif de la courbe. Ce qui nous a permis de mettre en garde le foreur bien que les valeurs des résistivités apparentes ne soient pas aussi basses, sur une éventuelle grande épaisseur d'arène fluante. Ce fut le cas puisque la foration, qui a duré deux jours, avec même un risque d'abandon, a traversé 35 mètres d'arène argileuse par rotary et à la boue.

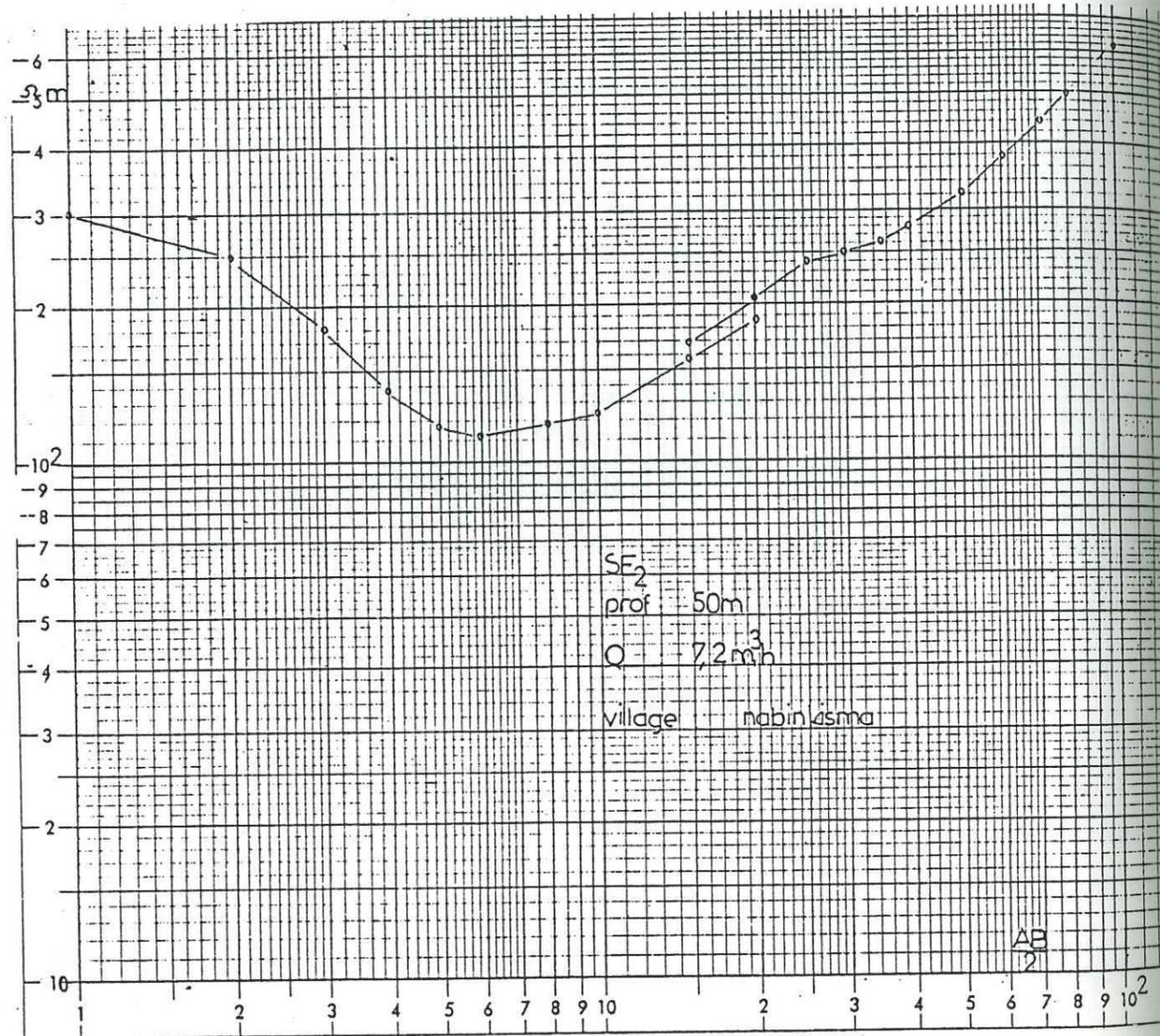


FIG 40

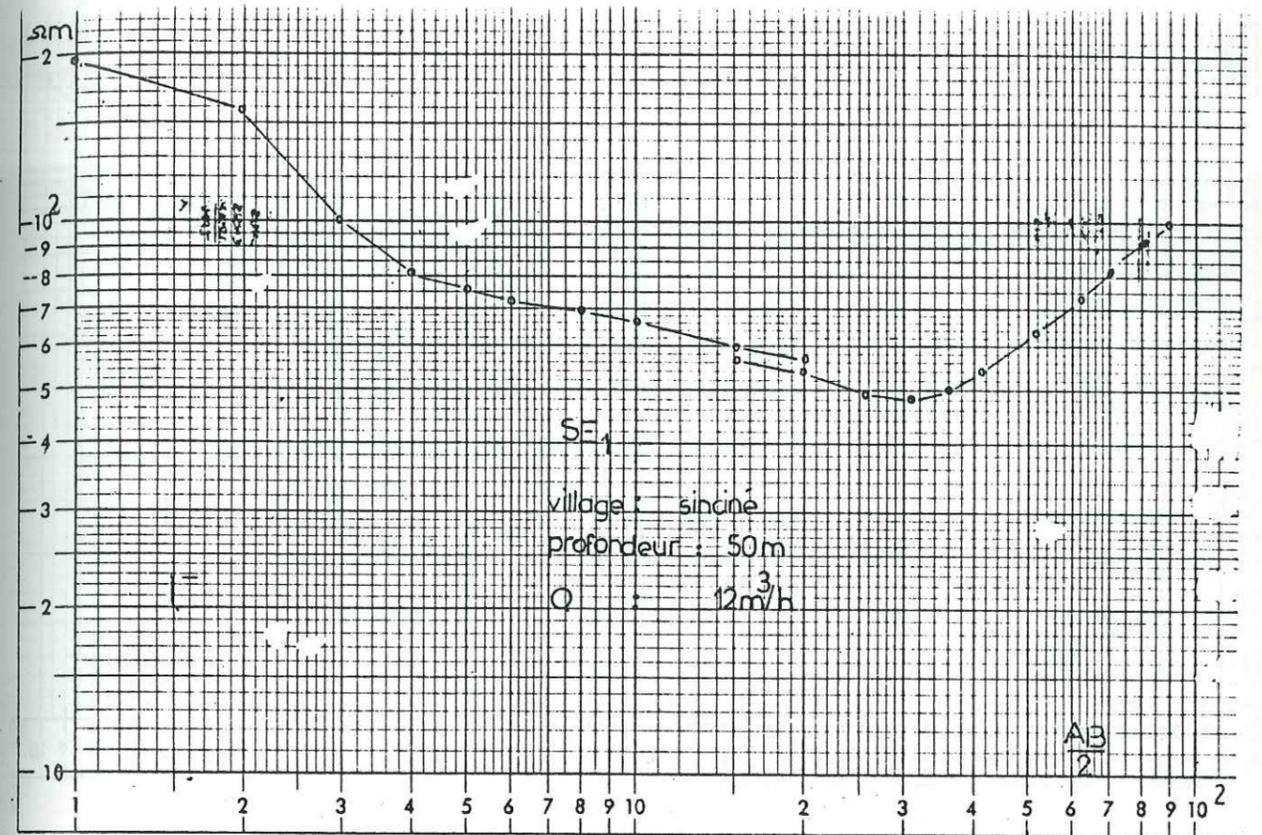


Figure 41

. Le saut positif

Le saut positif se produit lorsque l'épaisseur des altérites argileuses et humides est faible et qu'au changement de longueur MN, on intéresse la frange fissurée du bed-rock. La figure 42 représente la courbe de sondage électrique du forage de Rabogtenga. La décroissance des valeurs des résistivités apparentes de 150 Ωm à 46 Ωm , nous laissait croire à une épaisseur d'altérites d'au moins 25 m. A la foration, nous n'avons rencontré que 12 m d'arènes argileuses. Nous remarquons que le saut à l'embrayage de la courbe est positif.

Il arrive aussi des cas où à l'embrayage, il n'y a aucun saut de la courbe, c'est-à-dire que l'on obtient une courbe continue dont l'interprétation par les méthodes classiques reflète les réalités du terrain.

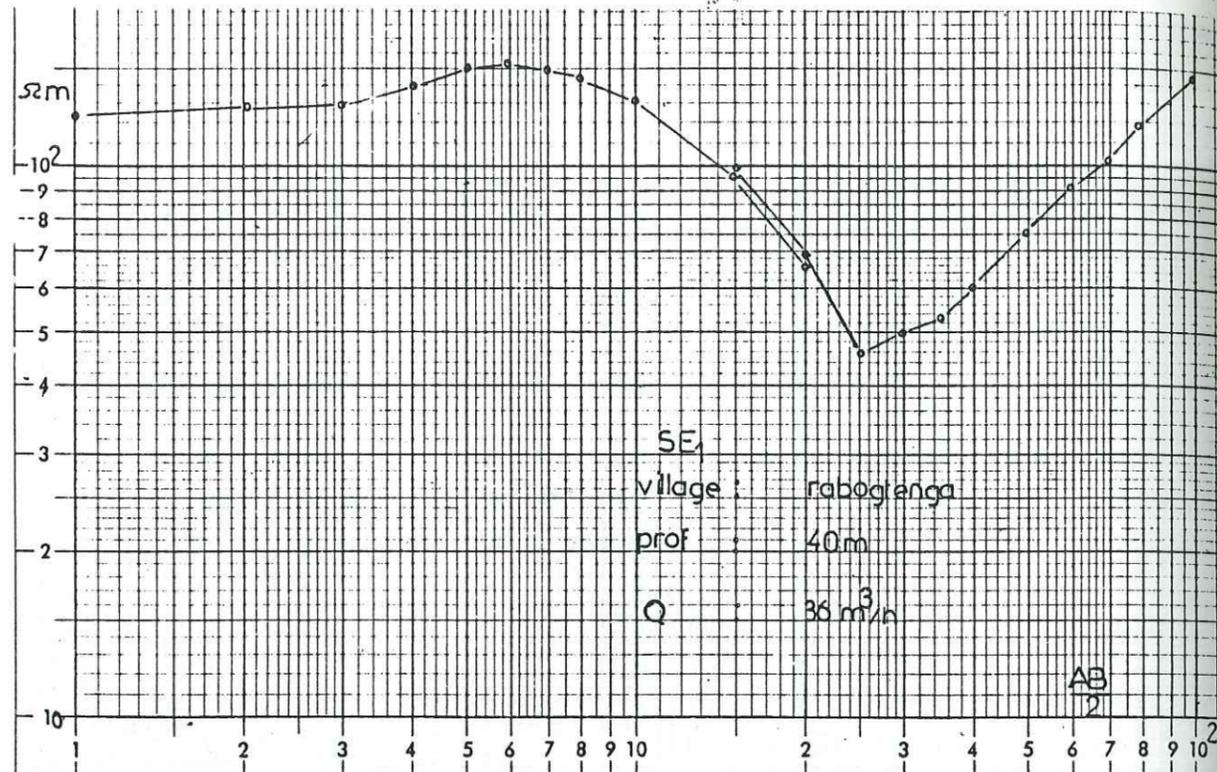


Figure 42

L'intérêt de réaliser l'embrayage entre 15 et 20 mètres de ligne AB/2 réside dans le fait qu'elle permet d'estimer l'épaisseur de l'altération. Ce cas est vrai pour les terrains dont l'épaisseur d'altération ne dépasse pas 40 mètres. Mais certaines régions, comme celle de la Volta noire à Diébougou connaissent des altérations supérieures à 80 mètres. Il est alors nécessaire de réaliser l'embrayage entre 50 et 60 mètres. C'est donc dire que les conditions d'embrayage ne se réalisent pas au hasard, mais en tenant compte du contexte géologique où l'on se trouve. Un autre avantage de réaliser l'embrayage est celui de s'assurer de la conformité des mesures de résistivités. Si les mesures sont correctes les deux bouts de la courbe, au niveau de l'embrayage doivent rester parallèles. Dans le cas contraire, les résultats nécessitent une vérification par la reprise des mesures.

c/ Relation entre courbe de sondage et nature de terrain

L'allure de la courbe de sondage est fonction de la nature du terrain sondé. Dans les schistes et dans les roches vertes, la forte humidité et la forte minéralisation des altérites abaissent les résistivités apparentes (10 à 30 Ωm), alors que dans les terrains granitiques la courbe est plus haute (100 à 150 Ωm environ).

La courbe de la figure 43 est celle d'un sondage électrique réalisée à Parouré, dans la partie sud schisteuse de notre secteur d'étude. On constate sur cette courbe les basses résistivités apparentes de 12 Ωm . L'épaisseur d'altérites n'est pas forte. Elle est de l'ordre de 8 à 10 mètres. La frange fissurée, elle semble peu épaisse puisque la courbe amorce sa pente de 45° à moins de 20 mètres de profondeur. Cette observation nous a fait renoncer à la foration de ce site.

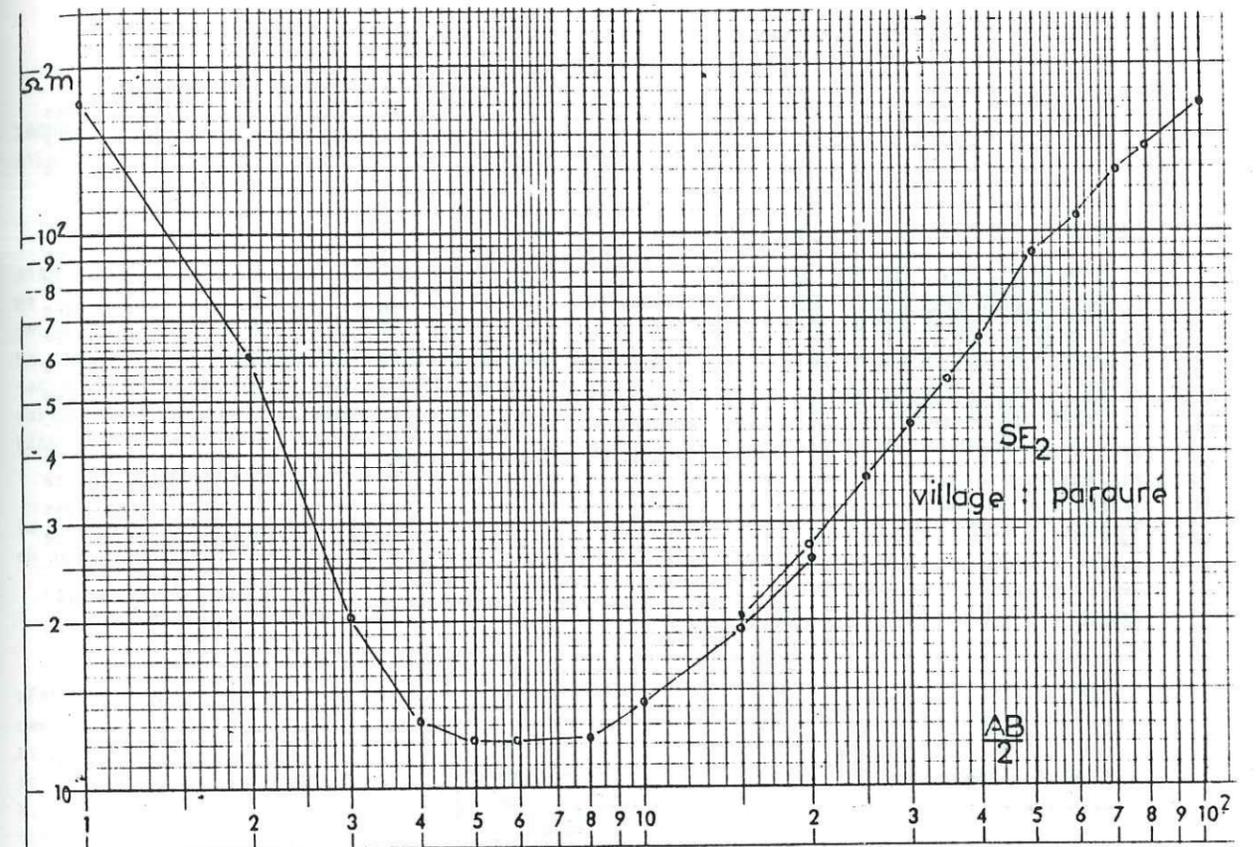


Figure 43

d/ Relation entre l'allure des courbes de sondages électriques et les débits des forages

Nous sommes souvent très embarrassés, comme a su le dire A.N. SAVADOGO, lorsqu'après une implantation géophysique d'un forage dans un village, l'on vient nous demander si ce forage aura la même productivité que celui du village voisin (qui a un très bon débit). En fait, il n'y a pas de corrélation possible entre l'allure des courbes géophysiques et les débits des forages. Les forages implantés à partir de courbes de même allure peuvent donner des débits très différents. L'exemple type de ce constat est donné par les forages de Lamzoudo, près de Kombissiri et celui de Sarana à l'Ouest de cette localité (Fig. 38 et 39).

Les deux courbes sont presque identiques, mais les forages donnent des débits différents et pire, on pourrait penser à un débit plus intéressant pour la courbe de Sarana par le fait de la remontée trainante de la branche ascendante.

La productivité des forages est plutôt liée au contexte géologique. Celui de Lamzoudo, qui atteint 18 mètres cubes/heures est implanté sur des pegmatites broyées, tandis que l'autre avec ses 6 mètres cubes/heures se situe sur les granito-gneiss. Nous reviendrons sur ce phénomène dans un chapitre particulier.

e/ Interprétation des courbes de sondages électriques

Les sondages électriques ne sont pas destinés uniquement à localiser les zones aquifères. Tout en l'étant, ils doivent permettre la détermination des épaisseurs des terrains traversés. Le calcul des épaisseurs ne peut se faire de façon précise en l'absence de données de sondages d'étalonnage. Néanmoins l'interprétation des courbes de sondages électriques par diverses méthodes peut permettre d'avoir une idée des épaisseurs des terrains surmontant le bed-rock. Pour notre part, nous avons procédé au dépouillement de nos courbes de sondage par les abaques trois terrains de la Compagnie Générale de Géophysique, et dans certains cas par la méthode des asymptotes de KELLER et de FRISCHKNECHT, 1966. Cette méthode utilise le fait que lorsque la couche inférieure a une très grande résistivité (c'est le cas de nos terrains), la courbe caractéristique d'un bi-couche devient une droite pour les grandes distances entre électrodes. Sur papier bilogarithmique une telle droite fait un angle de 45° avec l'axe des abscisses. Les abaques ne sont plus nécessaires ici. Après avoir tracé la courbe expérimentale sur du papier bilogarithmique, il suffit de disposer d'une règle et d'une équerre à 45° pour déterminer les résistivités vraies des terrains et leur épaisseur. On place horizontalement une règle de telle sorte que son bord suive la droite moyenne sur la partie gauche de la courbe (fond de bateau). Son intersection avec l'axe des ρ_a donne la résistivité vraie ρ_1 . Ensuite, on fait glisser l'hypothénuse d'une équerre à 45° de manière à définir la meilleure droite moyenne pour la partie droite de la courbe (branche montante). On lit l'épaisseur de la couche comme l'abscisse de l'intersection de la règle et l'hypothénuse de l'équerre. La figure 44 illustre ce procédé.

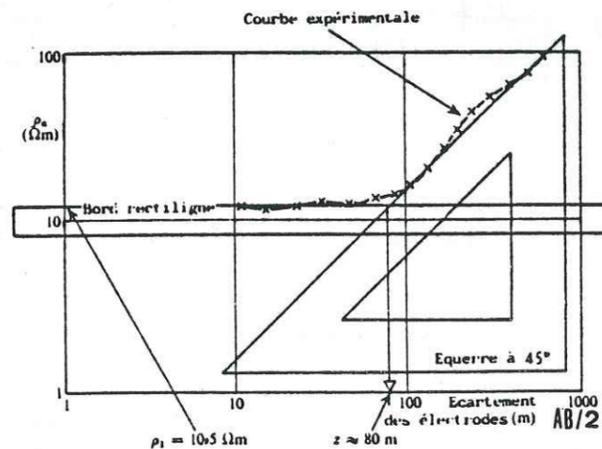


Fig 44 — Evaluation de ρ_1 et de z à l'aide de l'asymptote à 45° (d'après Keller et Frischknecht, 1966).

f/ Le dispositif électrique pluridirectionnel

La conception de ce dispositif est relativement récente. Selon M. BRION et J.C. LACHAUD, 1982, s'il est associé à une carte de potentiels, il présente l'avantage certain d'indiquer la direction d'anisotropie du terrain correspondant souvent à une fracture.

Son application bien qu'au stade primaire en Afrique de l'Ouest dans l'hydraulique villageoise peut être difficile par son coût élevé. La méthode consiste à effectuer en une même station plusieurs sondages électriques dans des directions différentes et à porter sur un diagramme la valeur de la résistivité apparente obtenue pour chaque direction et pour une même longueur de ligne AB. Cette méthode met en évidence la ou les directions prédominantes de la fissuration. En général, les diagrammes présentent une direction d'allongement alors que les cartes de fracturation permettent de distinguer plusieurs familles de fractures. La direction de résistivités maximale correspond à la direction préférentielle des écoulements selon GRILLOT, BRION, GUERIN, LESQUER, 1975.

Ce type de sondage permet de suivre l'évolution en profondeur de la géométrie de la fracture. Certaines fractures n'étant plus fonctionnelles ou au contraire se développent plus en profondeur.

Les différents types de sondage pluridirectionnel

Un sondage pluridirectionnel peut être réalisé suivant les dispositifs SCHLUMBERGER, WENNER ou carré. D'après une étude comparée menée par le C.I.E.H., il semble que le dispositif carré soit le mieux indiqué par le fait qu'il présente le plus grand coefficient d'allongement et que les diagrammes ont une représentativité plus fiable du phénomène avec des déformations moins importantes que les autres dispositifs. Dans le dispositif carré, les électrodes A, B, M, N, sont disposées au sommet d'un carré. On fait ensuite subir à l'ensemble du dispositif une rotation de 90° . Pour des raisons de symétrie et de réciprocité, il n'est pas nécessaire de faire tourner le système de 180° . On dispose ensuite AB sur une diagonale; on recommence une deuxième série de trois mesures en disposant le système à 45° du carré initial. Le diagramme obtenu a une forme ovale et son allongement indique la direction de la fissuration. (Fig 45).

Le calcul de la résistivité apparente se fait par la formule de W.M. TELFORD et L.P. GELDART

$$\rho_a = -4 \pi n^3 l \Delta V / I$$

l = distance entre les dipôles - n = facteur de l , qui est ici égale à 1 - d'où

$$\rho_a = -4 \pi l \cdot \Delta V / I$$

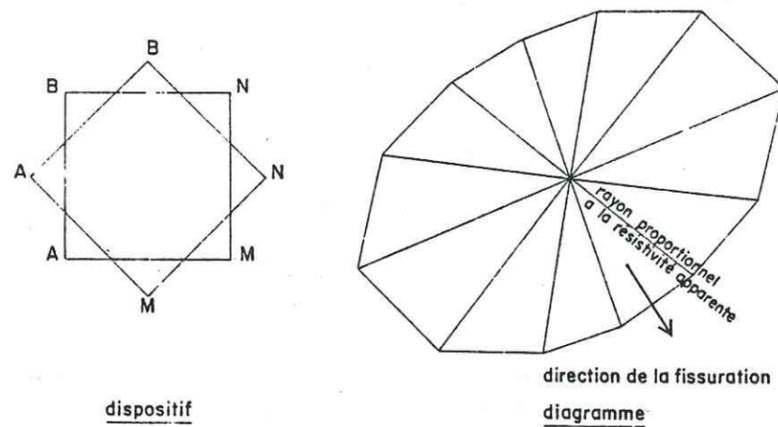
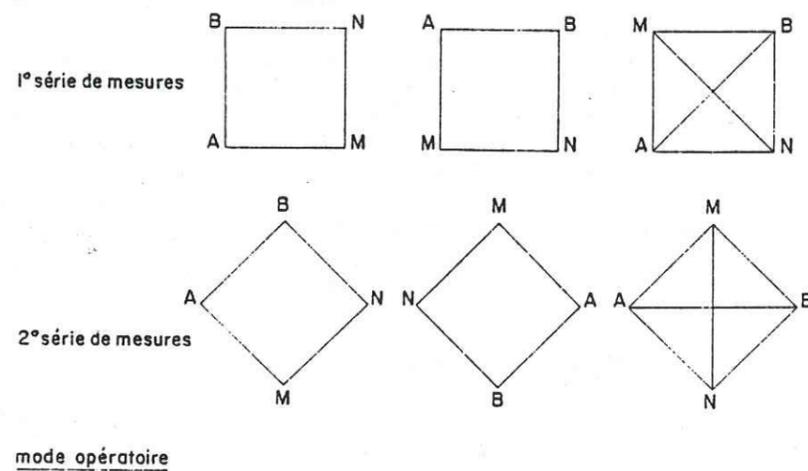


fig.45 - dispositif carré pluridirectionnel (d'après Melle Brion 1976)



Conclusion

Les critères d'implantation des ouvrages que nous avons évoqués sont ceux que nous avons pu appréhender au cours de nos investigations. Il en reste certainement d'autres qui pourront être découverts grâce à une collaboration perpétuelle entre les uns et les autres. Au vu de nos résultats, il apparaît clairement que les facteurs essentiels à prendre en compte sont l'ouverture des fractures, la densité du réseau fissuré, l'intersection des fractures principales. La photointerprétation, l'analyse géomorphologique et structurale apportent déjà 50% des informations pour leur mise en évidence. Néanmoins, dans le souci d'atteindre des résultats meilleurs, il est nécessaire de les compléter par les investigations géophysiques aptes à déterminer avec plus de précision les zones favorables aux implantations. C'est par le biais de l'utilisation coordonnée de ces méthodes que nous arriverons à résoudre le problème d'eau dans les régions du socle.

4.3 - Les différents types de nappes

En milieu cristallin d'Afrique de l'Ouest, on peut distinguer selon les régions deux ou trois types de réservoirs aux caractéristiques physiques et hydrogéologiques différentes. Généralement, les réserves d'eau sont emmagasinées dans la partie supérieure altérée, mais peuvent être drainées préférentiellement par les fissures et fractures sous-jacentes, ouvertes parfois sur de grandes profondeurs. Dans certains cas, assez fréquents sur notre secteur d'étude, la circulation d'eau souterraine se fait plutôt latéralement par des filons de quartz ou de pegmatite donnant ainsi naissance à des nappes semi-captives.

4.3.1 - Les réservoirs supérieurs

Ils correspondent en milieu granito-gneissique et migmatitique de haut en bas, aux nappes:

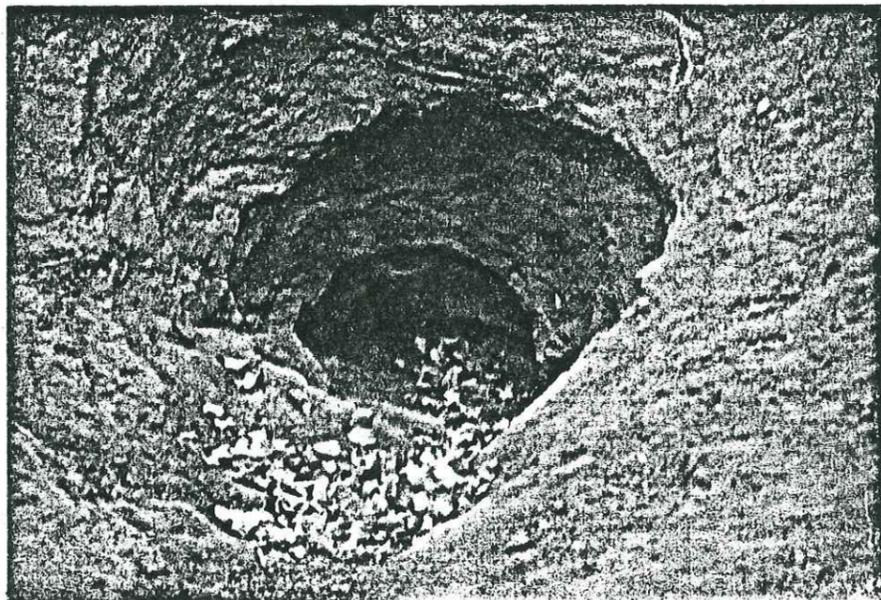
- . d'alluvions
- . de cuirasse noyée
- . d'arène

4.3.1.1 - Les nappes d'alluvions

Nous avons dit en parlant de la topographie du pays et de notre secteur d'étude en particulier, que le relief était plat et légèrement incliné vers le sud. Cette géométrie va se traduire au niveau des lits vifs des marigots et des rivières par un épais comblement d'alluvions argilo-sableuses. Ces épaisseurs peuvent atteindre par endroits 10 à 15 m et constituent de ce fait des aquifères appréciables bien que d'extension réduite.

Dès fin Novembre ou fin Décembre, les puits traditionnels creusés dans les altérites argileuses des villages tarissent obligeant ainsi les habitants à entreprendre l'exploitation de puisards creusés dans ces alluvions. Les puisards ne sont que des petits trous dont le diamètre ne dépasse pas un mètre et à parois non bûsées dans ces formations très bouillantes. La durée de vie d'un puisard excède rarement un mois. Le trou comblé est abandonné et remplacé par une autre juste à proximité. En pleine saison sèche, c'est-à-dire en Mars-Avril, face aux phénomènes évapotranspiratoires élevés, le niveau piézométrique baisse considérablement entraînant l'abandon définitif de ces ouvrages.

La photo ci-dessous est celle d'un puisard abandonné en Mars sur le lit de la rivière de Bindé par les habitants.



L'alimentation de ces nappes d'alluvions se fait directement par drainage de la nappe d'arène au cas où celle-ci serait perchée par rapport à elles ou bien dans le cas plus général, par infiltration des précipitations efficaces.

C'est le cas à Bindé où les bordures de la rivière constituées par du granite en pleine altération alimentent, par percolation, la nappe d'alluvions située plus bas. La figure 46 illustre ce phénomène.

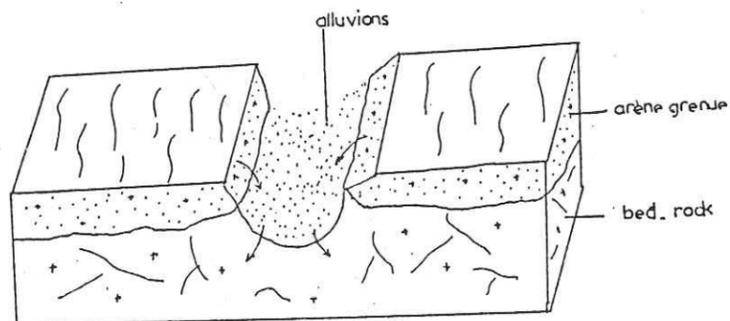


FIG 46 ALIMENTATION DE LA NAPPE D'ALLUVIONS A BINDE

4.3.1.2 - Les nappes de cuirasse noyée

Nous rappelons que la cuirasse latéritique est abondante dans notre secteur d'étude. Elle est décapée par endroits ou surmontée d'une terre peu argileuse, d'épaisseur variable.

GRAVOST en 1966 avait fait remarquer que les cuirasses atteignent 6 mètres d'épaisseur à Houndé à l'Ouest du pays où elles constituaient des réservoirs intéressants. Au Sud, par exemple à Léo, situé au Sud-Ouest de notre zone d'étude, des épaisseurs de 15 mètres sont rencontrées. Ces cuirasses jouent un rôle hydrogéologique important quand elles sont noyées, d'autant plus qu'elles constituent localement des zones d'infiltration. Elles deviennent perméables et poreuses lorsqu'elles sont scoriacées ou vacuolaires. Ce sont là des propriétés qui sont acquises, soit par démantèlement, soit par décompression, soit enfin par action des racines végétales qui contribuent à élargir les fissures au niveau surtout de la périphérie du plateau cuirassé. La position sous forme de falaise de cette cuirasse permet l'infiltration de l'eau qui a tendance à ruisseler à la surface des argiles imperméables sous-jacentes, formant ainsi un horizon aquifère à ce niveau, se manifestant par des suintements d'eau ou même des sources.

a/ La cuirasse noyée de Bingla

Bingla est un village situé à 12 km au Sud-Ouest de Kombissiri. Ce village bâti sur un plateau cuirassé et encadré par deux marigots, l'un au Nord et l'autre au Sud-Ouest connaît en saison sèche les mêmes problèmes d'eau que l'ensemble de la zone. Au Nord-Est, le plateau de cuirasse est décapé et fait suite à un affleurement granitique en cours d'altération. Vers le Sud-Ouest, il disparaît sous une couverture de terre cultivable qui s'étend jusqu'au marigot, dont le lit en cette saison sèche est occupée par les alluvions sableuses et peu argileuses (Fig.47), dans lesquelles on peut observer les puisards abandonnés par les villageois, près des manguiers ombrageux. C'est à ce niveau que se situe le point choisi pour le forage du village. Pendant la foration, après avoir traversé une mince couche de terre grisâtre (1,5 m), nous fûmes obligés d'utiliser le marteau fond de trou pour franchir une épaisse formation de cuirasse (5 m) à la base de laquelle une venue d'eau de 2 m³/h fut obtenue.

Au niveau de l'argile compacte et peu humide sous-jacente, puis des arènes grenues quartzieuses d'une épaisseur de 5 mètres, aucune venue d'eau n'est enregistrée. La dernière venue d'eau fut celle obtenue à 38 mètres et liée aux pegmatites broyées. Cela signifie que ce sont les seuls niveaux cuirassés et fissurés qui constituent les zones aquifères de ce forage dont le niveau statique de 2,8 m demeure au-dessus de la cuirasse. La bonne tenue des parois de cette dernière et la faible profondeur à laquelle se situe le toit de la nappe sont des conditions favorables à son exploitation par des puits de grand diamètre.

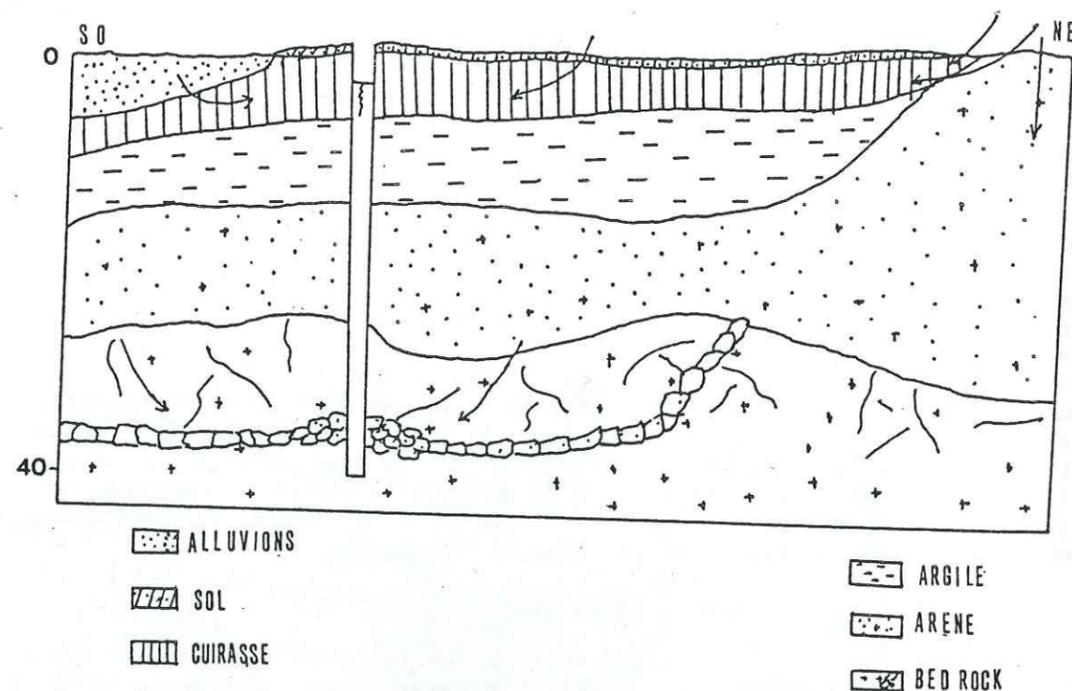


Figure 47: Cuirasse noyée de Bingla

4.3.2 - Les réservoirs inférieurs

Leur existence est étroitement liée au réseau de fractures dont nous avons vu l'importance en photogéologie quand elles sont surtout longues ou entrecroisées. C'est en effet à ce niveau que l'on rencontre les grandes épaisseurs d'altérites qu'indique souvent la prospection géophysique tout en mettant en évidence leur discontinuité. Aux hautes eaux, ces discontinuités disparaissent en favorisant l'intercommunication entre les zones aquifères et leur réalimentation per descensum et par des circulations horizontales à travers les arènes et le bed-rock fissuré.

A.N. SAVADOGO a montré en 1975 dans le ranch de Léo qui borde notre secteur d'étude à l'Ouest que l'absence du tritium dans les eaux s'accompagnait d'une baisse progressive et constante du niveau piézométrique. Ce phénomène évoque une alimentation complexe des nappes par rapport au cas général que nous connaissons. En effet, en 1984 la même région a connu selon l'auteur une pluviométrie excédentaire. Consécutivement, la teneur en tritium mesurée atteignait 6 UT. Il conclut que la nappe n'a pas une alimentation per descensum, mais plutôt par des circulations latérales d'eau arrivant des roches fissurées voisines. Ce fait traduit bien la discontinuité des zones aquifères dont nous parlions. En saison sèche, le niveau piézométrique étant bas, chaque zone aquifère fonctionne de manière indépendante et spécifique avec ses caractéristiques hydrogéologiques qui lui sont propres.

Un autre phénomène qu'il convient de souligner et qui rejoint selon nous, l'argument fondé sur la variation des teneurs en tritium est celui de la semi-captivité des nappes sous les argiles intermédiaires.

Très souvent nous traversons pendant la foration des niveaux supérieurs non saturés avant d'atteindre la nappe de la frange fissurée dont le niveau monte très vite. Ce cas a été observé à Konekongo et surtout à Diabatou dans la Gnagna, où après avoir traversé les altérites et entamé le fonçage de la roche verte fissurée au marteau fond de trou, à 49 mètres de profondeur la venue d'eau survient avec la poussière en une sorte de jet à un moment où l'on s'y attendait le moins.

On s'est rendu compte par les cuttings du forage qu'il s'agissait d'une venue d'eau liée à un filon de quartz comme dans le cas de la figure 40. A une telle profondeur, l'alimentation de la nappe ne peut s'expliquer que par un écoulement latéral favorisé par ce filon de quartz qui constitue un drain.

Ce type d'alimentation peut se faire aussi par des fractures kilométriques généralement profondes. Les venues d'eau des forages de Konekongo et de Toghin, respectivement à 70 et 75 m sous les niveaux imperméables peuvent être interprétées comme résultant d'un drainage latéral lointain par des failles profondes.

4.4 - Facteurs de productivité des nappes profondes

Au vu de ce que nous avons dit à propos des implantations des ouvrages de captage et par rapport à la répartition spatiale vaste des forages sur notre secteur d'étude, nous pouvons dégager les facteurs qui déterminent la productivité des ouvrages.

Nous citerons bien sûr en premier lieu les fractures dont le rôle hydraulique est étroitement lié à leur ouverture, leur orientation, leur longueur et la nature des formations géologiques qu'elles affectent.

Sur le plan géologique, les débits importants rencontrés dans les différents faciès pétrographiques permettent de hiérarchiser ces formations en fonction de leur productivité:

- . les filons de quartz et de pegmatite où nous avons enregistré les plus grands débits;
- . les migmatites hétérogènes et les granites porphyroïdes;
- . les roches basiques intrusives;
- . les amphibolites;
- . les schistes birrimiens (s'ils sont parcourus par des filons);
- . les granites homogènes à grains fins.

Le tableau 15 représente les profondeurs des venues d'eau et les formations géologiques auxquelles elles sont liées.

On se rend compte par ce tableau que 65% des venues d'eau proviennent des filons de quartz, de pegmatite ou d'aplite au niveau desquels on enregistre également les plus forts débits, sauf à Rakaye Mossi où un débit de 18 m³/h fut obtenu dans les roches vertes. Ces venues d'eau sont peu profondes au Sud (haut du tableau), tandis qu'au Centre et au Nord elles se situent entre 20 et 40 m exception faite de Konekongo et de Toghin où l'on a pu observer des venues d'eau au delà de 70 mètres.

Localités	Venues d'eau (m)	Géologie
DINDOURGOU	12	Granite/Pegmatite
TYPOMI	13	Granite rose
GONRE I	16	Roche volcanique
GONRE II	10,5	Tuffs
LAPOURI	10,5	Granite
GOGOGO	13	Amphibolites
BELLEGRE F2	26	Granite/Pegmatite
LAMZOUDOU F2	25	Pegmatite/Granite
KIENDBINGRE	28	Granite + Quartz
GUIDSSI	73	Pegmatite
DOURE F2	47	Pegmatite
KOUGBAGA	32	Granite/Pegmatite
ZAPTENGA	30	Granite/Quartz
SIMBRI	45	Micaschiste/Pegmatite
BAGAMSI	43,5	Granite
KONEKONGO	43	Granito-gneiss
BOULOUGUIN	17	Pegmatite
MANGA (mission)	25	Granite migmatitique
DOURE	24,5	Pegmatite + Granite
YOROGO	24,5	Granite/Quartz
BERE	19	Granite/Pegmatite
SIMBRI F2	19	Pegmatite
SIGNOQUIN	18	Micaschiste
SIDTENGA	32,5	Migmatites + Quartz
MANDIE	27,5	Schiste
GONSE	23,5	Granite/Aplite
KONDRIN	25	Migmatite + Filon quartz
NINI-NOBERE	30	Pegmatite
IMARGO	19-28	Micaschiste/Pegmatite
TONDAGA	25	Granite porphyroïde
BALONGUIN	41	Migmatites
BISSIGA	37,5	Granite
KARIGOU	30	Arène
WENTENGA	33,5	Granite
TOGHIN	72	Pegmatite/Aplite
BOROGO	25	Pegmatite
GODIN	32	Granite rose
NABINKISMA	32	Pegmatite
SAMSAONGO	31	Pegmatite
RABOBTENGA	32	Pegmatite/Amphibolite
SINCINE	25	Granito-Gneiss
RAKAYEMSSI	31	Roches vertes
SARANA	28	Granite pegmatite
BENOGO	35	Pegmatite
ZINGDEGUIN	32	Migmatite/Pegmatite
BOUSSOUGOU		Pegmatite

Venue d'eau moyenne = 30 mètres

Tableau 15 - Nature géologique des roches liée aux venues d'eau

4.4.1 - Productivité des forages en fonction de l'épaisseur d'altération

En 1967, R. BISCALDI a écrit que statistiquement il existe une relation positive entre l'épaisseur d'altération totale sur les roches granito-gneissique et la productivité des ouvrages. Il fait remarquer que sur les schistes, cette relation semble plutôt négative.

Des études analogues réalisées en Côte-d'Ivoire par BERGER et al. en 1981, au Burkina-Faso par SOURISSEAU en 1981 et au Togo par ASSOUMA en 1982 font apparaître une relative analogie entre l'épaisseur de réservoir d'altérites et la productivité des forages. Il semble que celle-ci augmente avec l'épaisseur pour toutes les roches cristallines et cristallophyliennes, sauf dans les schistes.

Nous avons pour notre part essayé de faire une corrélation entre les deux facteurs.

La figure 48 représente la variation des débits des forages de notre terrain d'étude avec l'épaisseur d'altération. On remarque que les points ne s'alignent pas suivant une droite comme dans le cas de deux phénomènes liés, mais forment un nuage entre 10 et 40 mètres de profondeur. Certains forages sont moins productifs malgré une grande épaisseur d'altérites. Ces observations permettent de dire que s'il n'y a pas une corrélation positive, il existe quand même une épaisseur minimale au dessous de laquelle la productivité baisse. Cela dépend d'ailleurs des régions puisqu'à Tiébélé, bien que l'altération ne soit pas profonde le taux de succès a atteint 80% dans les roches vertes et granites roses à amphibole.

4.4.2 - Statistiques sur les ouvrages de captage du secteur d'étude

4.4.2.1 - Les venues d'eau dans les roches fissurées

Les venues d'eau dans les roches fissurées dépendent de l'ouverture des fractures et très souvent comme nous l'avons vu du cortège filonien qui les parcourt. Comme l'intensité de la fracturation est fonction de la nature pétrographique et des contraintes tectoniques, nous enregistrons des venues d'eau variables dans l'espace.

- Ainsi à Tiébélé où les formations géologiques rencontrées sont essentiellement des roches vertes, des granites roses porphyroïdes et des amphibolites, 35 % des forages ont des venues d'eau comprises entre 10 et 15 mètres, figure 49. Elles passent à 30 % entre 20 et 25 mètres. Au delà de 25 m, les venues d'eau chutent à 5 %.

- A Manga, figure 50, les venues d'eau les plus fréquentes sont rencontrées entre 15 et 25 mètres. Puis au-delà de 25 mètres, elles retombent à 10 %. Celles situées au-delà de 35 mètres sont rares.

- A Kombissiri, figure 51, la situation n'est pas différente. On peut noter toutefois un pourcentage plus élevé des venues d'eau au-delà de 35 mètres. Dans tous les cas, la limite maximale d'espérance semble être de 45 m de profondeur.

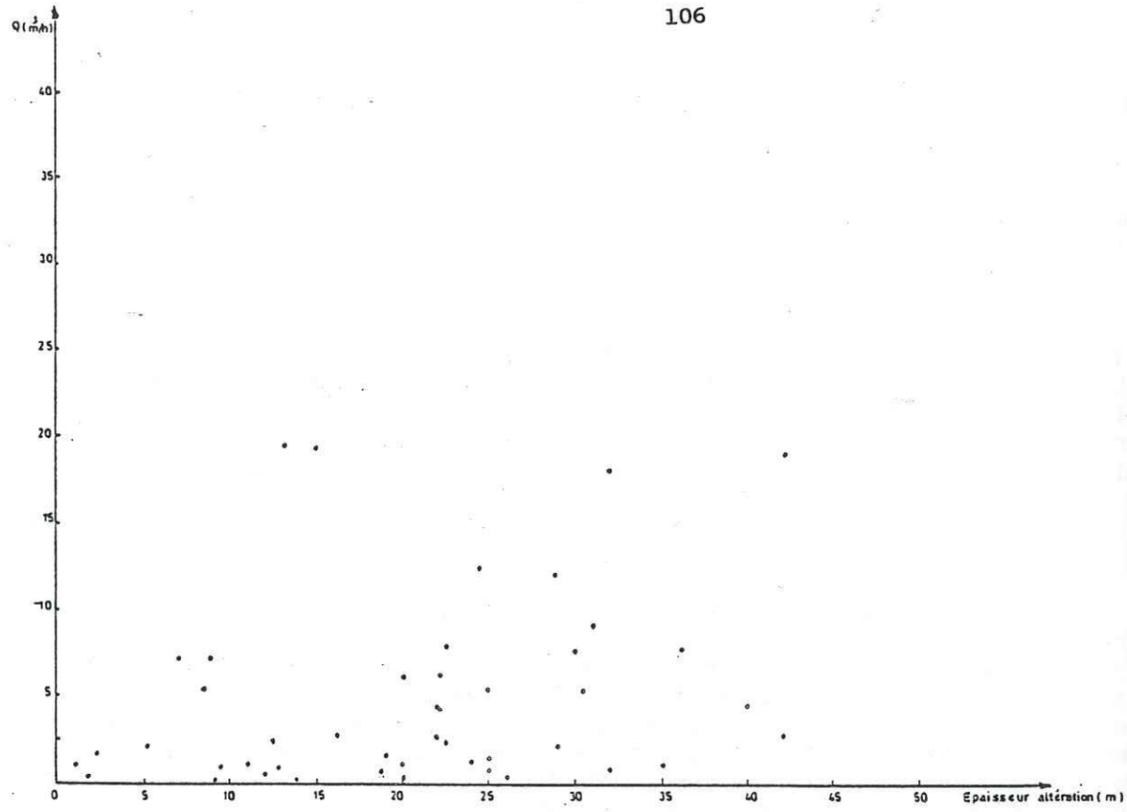


FIG48 RELATION ENTRE DEBITS ET EPAISSEUR D'ALTERATION

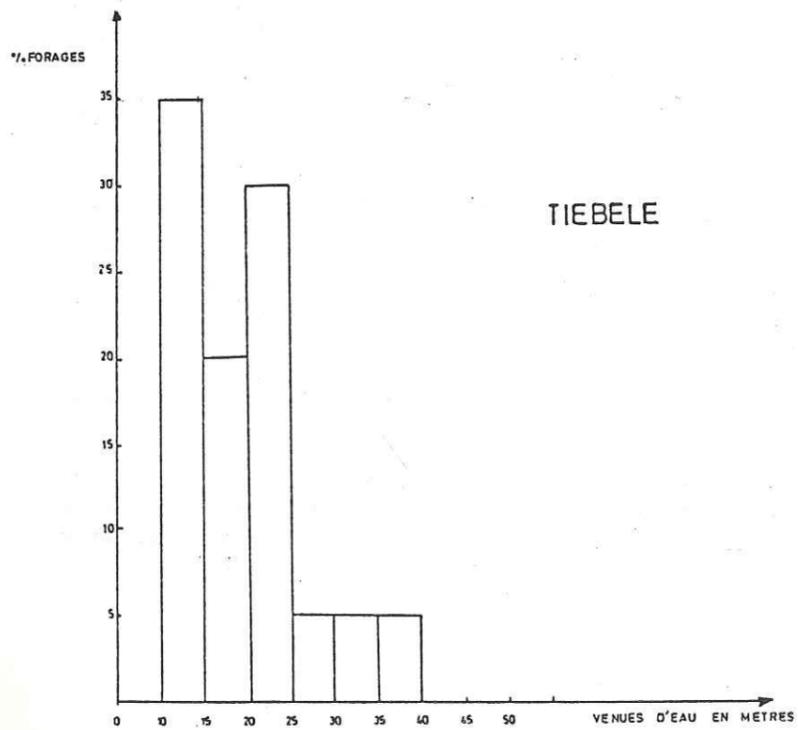


FIG49 FREQUENCE DES VENUES D'EAU

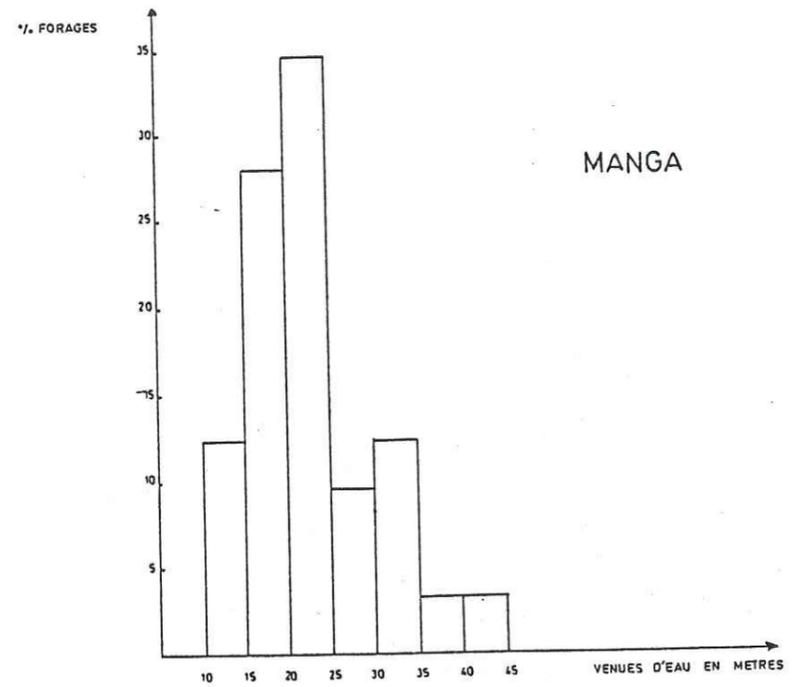


FIG50 FREQUENCE DES VENUES D'EAU

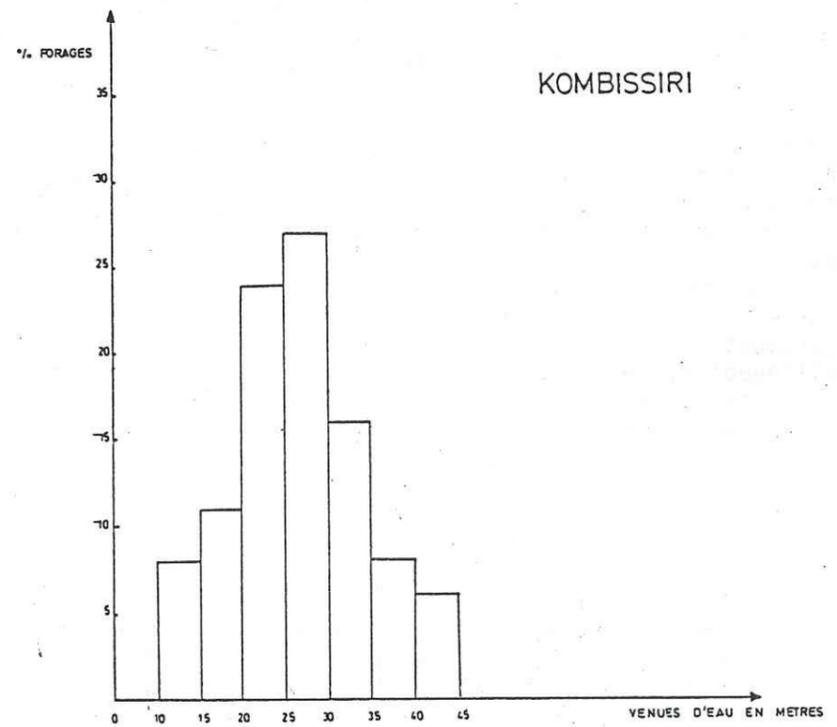


FIG51 FREQUENCE DES VENUES D'EAU

4.4.2.2 - Les débits des ouvrages de captage

- Les forages de Tiébélé (Fig.52 a)

Les débits les plus fréquemment rencontrés sont ceux compris entre 1 et 5 m³/h. Les débits inférieurs ou égaux à 1 m³/h et ceux compris entre 5 et 20 m³/h ont presque le même pourcentage de 15 %.

- Les forages de Manga (Fig.52.b)

A Manga, les débits de 1 à 5 m³/h atteignent 65 %. Viennent ensuite ceux compris entre 5 et 10 m³/h (18 %). Les débits supérieurs à 10 m³/h ne dépassent pas 5 %.

- Les forages de Kombissiri (Fig.53)

Dans cette région 35 % des forages productifs ont un débit compris entre 1 et 5 m³/h. Les débits supérieurs à 10 m³/h sont peu fréquents. C'est à Kombissiri qu'on enregistre les forages les plus productifs. Ils atteignent 5% pour les débits supérieurs à 20 m³/h.

4.4.3 - Profondeur maximale des ouvrages de captage

Dans l'état actuel de nos connaissances et en tenant compte de l'épaisseur d'altération, les puits de grand diamètre peuvent être implantés dans les altérites dont l'épaisseur ne dépasse pas en général 25 mètres.

En ce qui concerne les forages R. BICALDI avait conclu en 1967 qu'au delà de 50 ou de 60 mètres, les venues d'eau des forages baissent et il admet les profondeurs de 70 à 80 mètres dans les schistes en raison des fissures qui se referment en profondeur.

Beaucoup pensent et surtout les profanes, que le surcreusement peut garantir la productivité des ouvrages. Sur le plan statistique, nous avons essayé de voir dans les trois localités de notre secteur d'étude s'il y avait une corrélation acceptable entre les profondeurs des ouvrages et leur productivité (Fig.54, 55, 56). Sur ces figures, on peut s'apercevoir du contraire puisque tous les points se groupent entre 30 et 60 m. On peut toutefois noter des cas rares, notamment à Manga et à Kombissiri où des forages profonds de 80 mètres sont productifs avec d'ailleurs de faibles débits. De toute façon en Hydraulique villageoise, les moyens d'exhaure sont des pompes manuelles (ABI ou Volonta) dont la capacité maximale est de 0,6 m³/h à 50 m de profondeur; on comprend alors qu'un ouvrage très profond ne peut être profitable pour les villageois.

CONCLUSION

Les formations géologiques sont découpées par des réseaux de fractures majeures. Ce sont des fractures souvent profondes, subverticales, jalonnées par des zones broyées, susceptibles d'intéresser des bandes de terrains larges de quelques mètres. Elles sont dans les cas fréquents, le siège de circulations d'eaux souterraines.

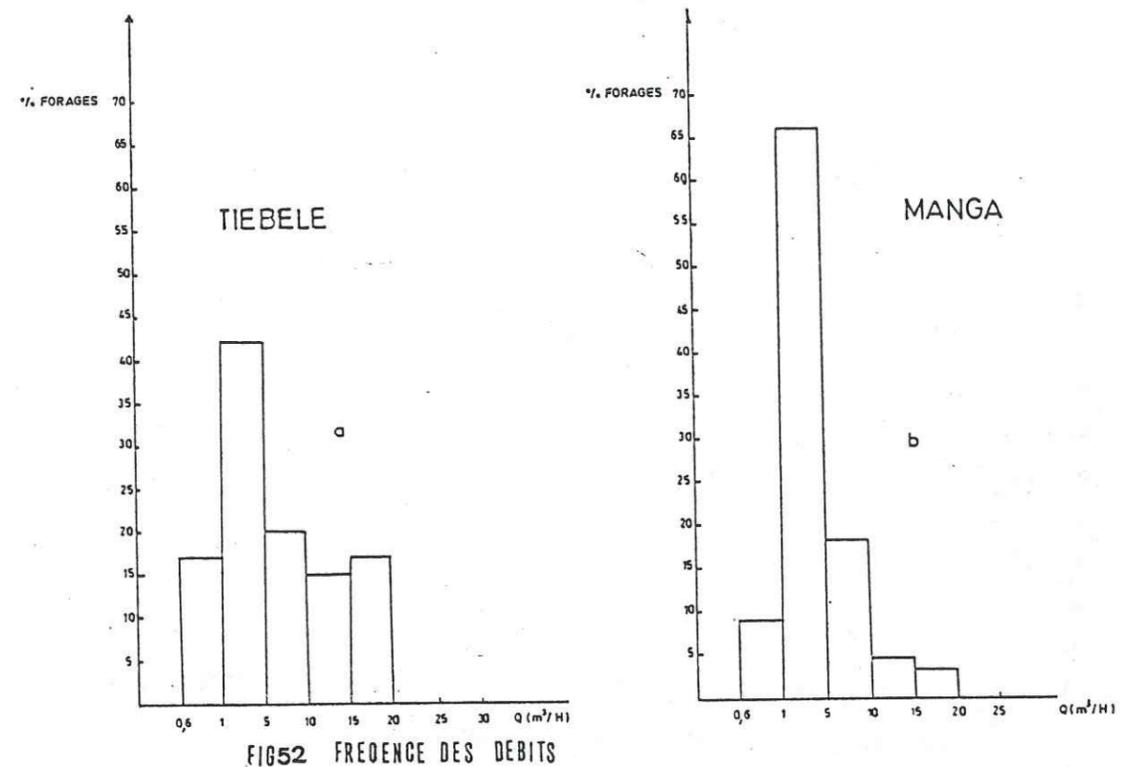


FIG 52 FREQUENCE DES DEBITS

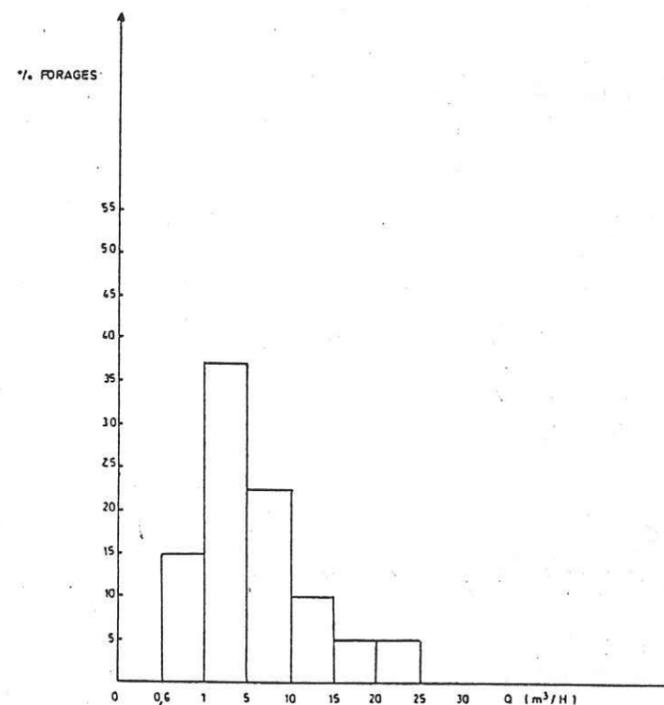


FIG 53 FREQUENCE DES DEBITS

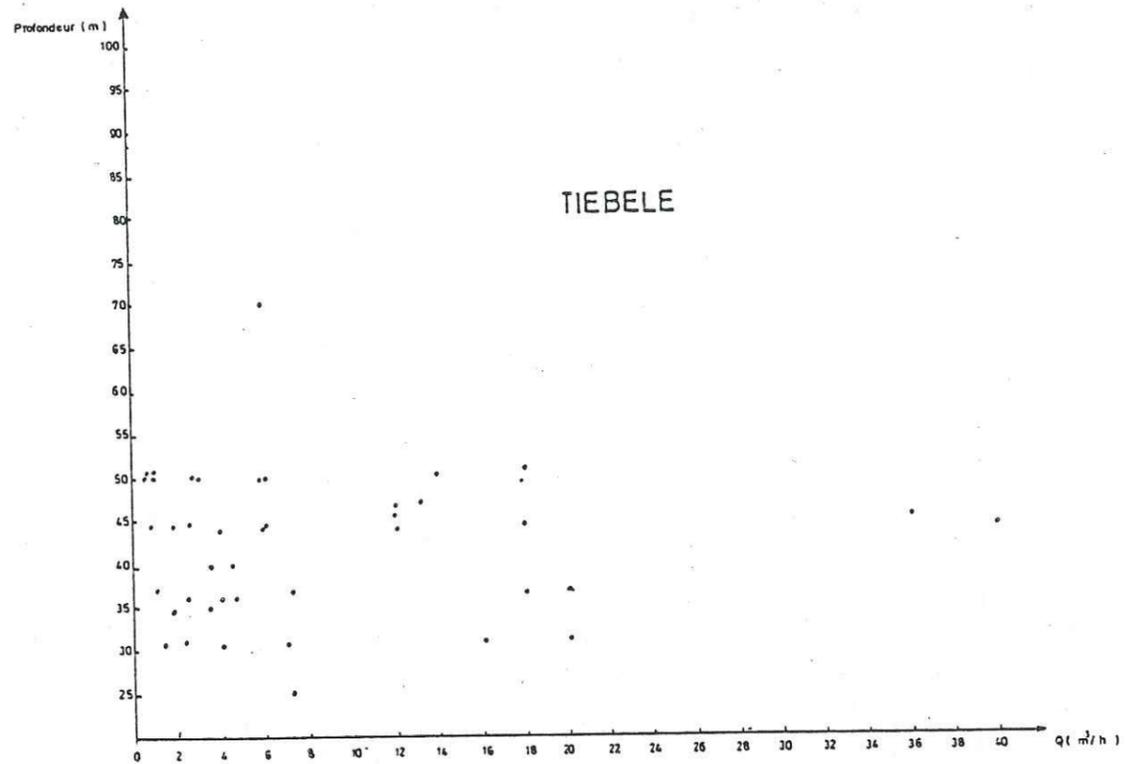


FIG 55 RELATION ENTRE PROFONDEUR DES OUVRAGES ET LEUR DEBIT

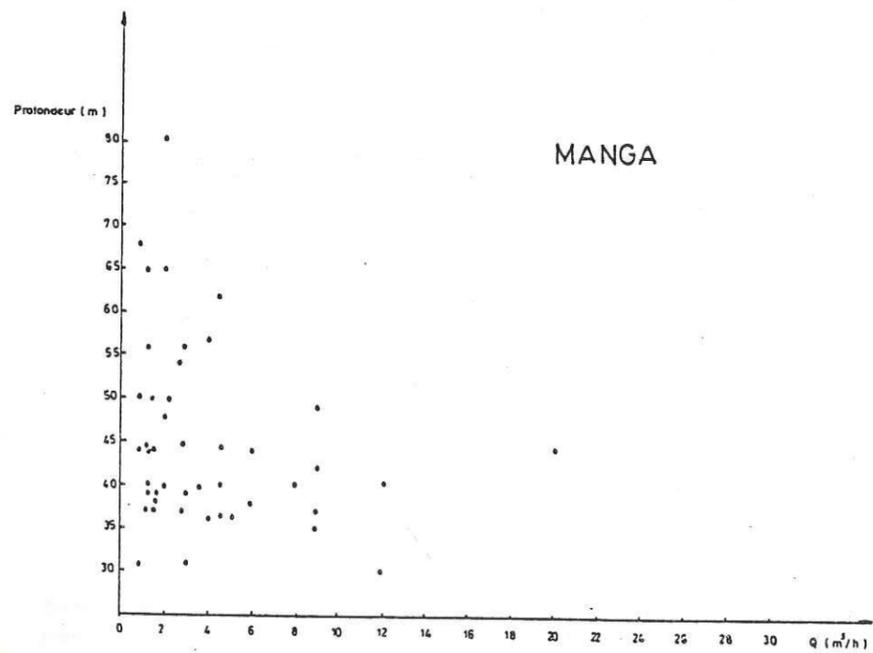


FIG 56 RELATION ENTRE PROFONDEUR DES OUVRAGES ET LEUR DEBIT

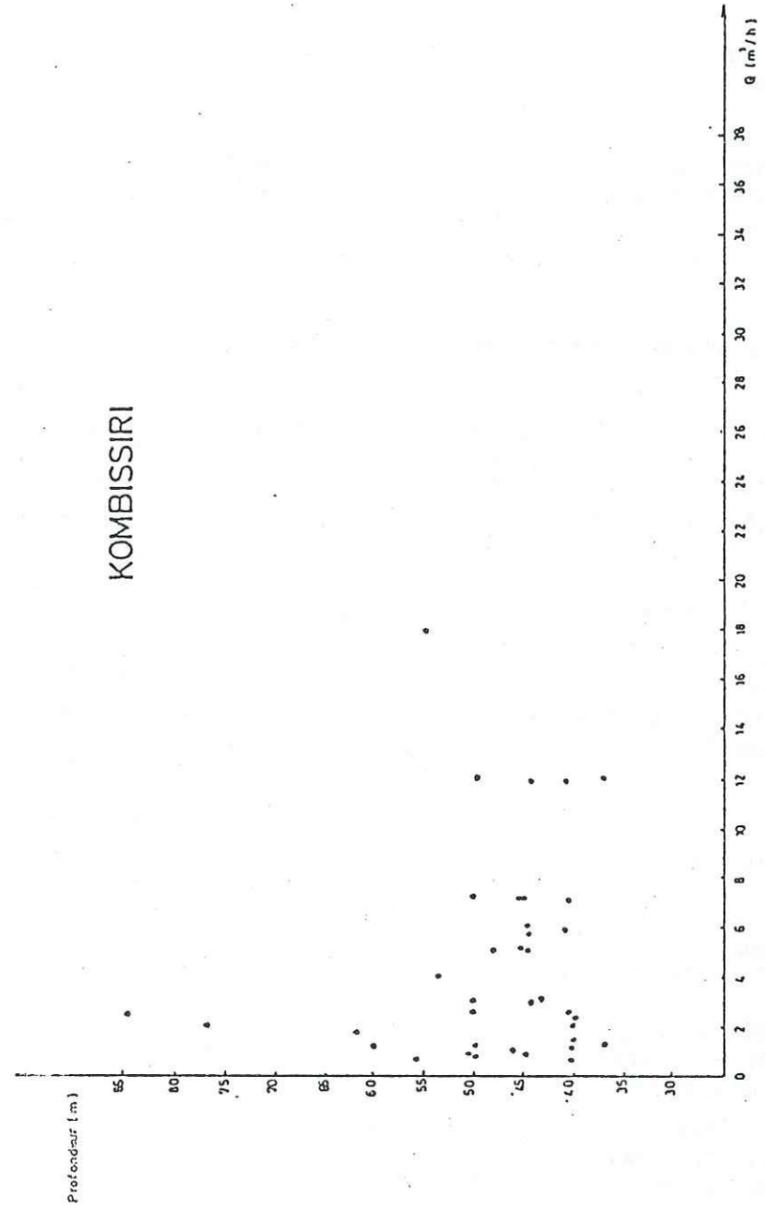


FIG 56 RELATION ENTRE PROFONDEUR DES OUVRAGES ET LEUR DEBIT

En période d'étiage, le niveau piézométrique de la nappe peut se localiser ou non dans la couche superficielle d'altérites, la couche inférieure de fissure ou de failles étant presque toujours saturée.

En saison sèche, le réservoir superficiel ne fonctionne plus, laissant ainsi chaque nappe de fracture se comporter selon ses propres caractéristiques.

Du point de vue hydrogéologique, le forage est à priori adapté pour tous les terrains. Il n'en est pas de même pour les puits à grand diamètre qui ne peuvent être foncés que dans les terrains meubles où l'épaisseur des altérites est suffisante pour garantir la pérennité des ouvrages. Dans tous les cas, nos connaissances sur le mode de gisement des eaux souterraines devraient permettre une implantation aisée des différents types d'ouvrages dont la productivité ne dépend pas uniquement de la profondeur, mais surtout des conditions hydrogéologiques favorables.

4.5 - Exécution et équipement technique des forages

L'implantation des forages d'eau (Chapitre 4.1) se fait au prix d'un processus long et difficile qui n'aura aucun sens si la réalisation technique des ouvrages laisse à désirer. Ces problèmes techniques demeurent à deux niveaux essentiels qui sont très souvent la cause des échecs rencontrés.

4.5.1 - Exécution des forages d'eau

La difficulté majeure en foration réside dans la traversée des arènes argileuses très fluentes qui entraînent dans 90 % des cas l'abandon des ouvrages. Généralement, les foreurs traversent cette couche souvent épaisse au rotary et à l'air au moyen du tricône de diamètre 9 7/8" qui est le diamètre convenable pour la pose du tubage provisoire.

Pratiquement ceci est possible à condition bien sûr que les altérites résistent à la pression d'air de 17 ou 20 bars et permettent d'atteindre la frange fissurée sans s'effondrer. Ce n'est malheureusement pas toujours le cas et les opérateurs sont obligés d'entreprendre le forage rotary à la boue dans un trou déjà trop élargi pour tenir.

L'expérience que nous avons eue dans l'exécution de près de 1000 forages dans le socle cristallin du Burkina-Faso par les ateliers de BUMIGEB et de FORAKY nous amène à proposer le plan d'exécution suivant:

une fois sur le site le foreur doit entreprendre un sondage de reconnaissance afin d'estimer l'épaisseur et surtout la nature des altérites à traverser. Cette opération doit être menée au rotary à l'aide du tricône 63/4".

En fonction des résultats obtenus, il peut opter pour l'une des deux solutions qui s'offrent à lui. Si les altérites traversées ne sont pas bouillantes, il peut agrandir le trou à l'aide du tricône de diamètre 9 7/8" au rotary et poser un tubage provisoire ou perdu sur le toit de la roche fissurée appelé couramment "le dur".

Dans le cas d'une arène fluente, l'utilisation du même tricône à la boue devient impérative. Ce sont là des étapes le plus souvent brûlées, soit par négligence, soit par besoins d'économiser du temps et qui sont pourtant nécessaires pour une bonne foration. Une fois le tubage provisoire posé, il ne reste plus qu'à veiller sur la verticalité du trou dont l'importance se situe au niveau de la pose des tubes PVC et surtout du massif filtrant.

4.5.2 - L'équipement technique des forages

C'est l'une des opérations qui déterminent la productivité des ouvrages. En effet, un forage bien productif peut être par la suite inutilisable soit par insuffisance du débit, soit par la mauvaise qualité de l'eau. Dans les deux cas, c'est la pose des tubes PVC et du massif filtrant qui sont les causes principales. Les venues d'eau des altérites sont parfois plus importantes que celles de la roche fissurée. A la fin de la foration et dans le souci d'avoir un forage productif, on s'arrange pour capter ces eaux superficielles par un équipement approprié. C'est à ce niveau que beaucoup échouent puisqu'ils placent leurs crépines jusqu'au niveau des altérites. Un tel forage, malgré plusieurs heures de développement à l'air lift donnera presque toujours une eau trouble.

En fait, dans de telles conditions, il est nécessaire de poser les crépines au niveau de la frange fissurée, située plus bas et d'introduire le massif filtrant jusqu'à la venue d'eau. Dans certains forages à grand débit, beaucoup utilisent plus de tubes PVC crépinés que pleins, alors qu'en réalité 6 à 12 m de crépines suffisent pour faire un bon captage.

Quant au massif filtrant, il doit être choisi en fonction du terrain en tenant compte des matériaux disponibles. Le quartz roulé 2/4 convient, mais la rareté de ce gravier dans certains pays comme le notre justifie l'utilisation du granite concassé en 3/8". Un gravier plus fin que ces catégories utilisés dans un forage où l'ouverture des fentes des crépines est de l'ordre de 1mm ne peut que fermer les venues d'eau et entraîner une chute de débit.

La figure 57 montre un équipement de forage où les premières venues d'eau se situent au niveau des altérites.

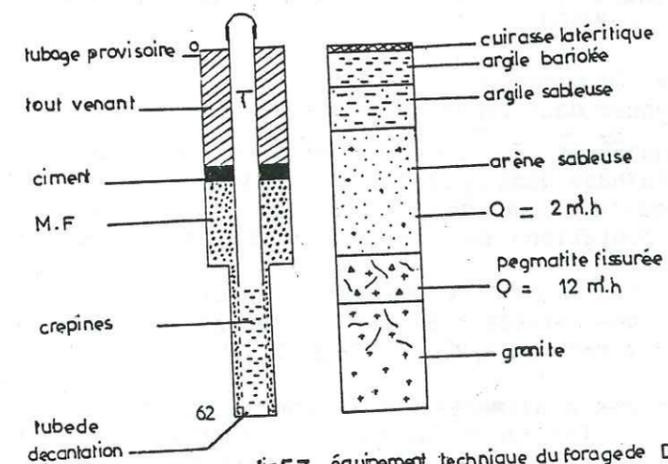


fig 57 équipement technique du forage de DOURE

4-6 ETUDE PIEZOMETRIQUE

4.6.1 - LA CARTE PIEZOMETRIQUE

Les mesures des niveaux d'eau dans les forages exécutés en 1985 à Manga et à Kombissiri dans le cadre du programme d'hydraulique villageoise nous ont permis de dresser la carte piézométrique de la nappe du socle du secteur d'étude (Fig.58). L'examen de cette carte montre des courbes fermées, elliptiques, plus ou moins régulières, qui mettent en évidence des protubérances et des dépressions de la surface piézométrique.

Les protubérances où dômes piézométriques sont caractérisées par des courbes plus ou moins fermées et des lignes de courant divergentes. Ce sont des zones d'alimentation importantes. On les rencontre au Nord du secteur d'étude, notamment au Sud de Kombissiri, dans les villages de Nangouma, Bilbalgo et Dassangandé. Au Centre, elles sont matérialisées par une ligne Est-Ouest qui va de Koakin-Sud à Bounoumtoré. Les formations géologiques de ces deux parties sont essentiellement des migmatites à pegmatite et des migmatites neutres au Nord, tandis que les protubérances du centre sont localisées pratiquement dans les migmatites neutres.

Quant aux zones d'alimentation de la partie sud, elles sont situées sur les migmatites à biotite et sur les schistes de Passintinga, Tanguin, Toemissi.

Les dépressions sont marquées par des lignes de courant convergentes et sont localisées au Nord-Ouest au niveau des villages de Sarana, Rakaye Mossi, Logdin et Benogo-Silmissi. Les dépressions de la partie sud se rencontrent à Pissi, Zaptenga, Sema et Lilgomdé. Ce sont des zones de drainage par excellence dans lesquelles la nappe est libre. Elle devient par contre en charge à l'Est du secteur d'étude, notamment dans les régions de Konekongo et de MANDIE.

Cette topographie assez tourmentée de la surface piézométrique permet de distinguer deux types d'aquifère à écoulement non uniforme:

- . aquifères à nappe convergente qui caractérisent les zones de drainage dont nous venons de parler;
- . aquifères à nappe divergente qui caractérisent les aires d'alimentation par infiltration des précipitations efficaces.

L'existence de ces aquifères semble être liée à la tectonique de la région puisque notamment au centre, les zones de drainage se superposent aux fractures de direction N 90, N 100 et N 130.

Les zones d'alimentation le sont surtout grâce à leur fracturation N 80 et N 150 à l'Est; N 90 au Centre-Sud. L'élément remarquable de cette carte est sans doute la coïncidence relative des sous-bassins hydrologiques avec les sous-bassins hydrogéologiques délimités par les lignes de partage des eaux du Kandaré, du Bazéga et du Kourouba au Sud.

NOV. 1985

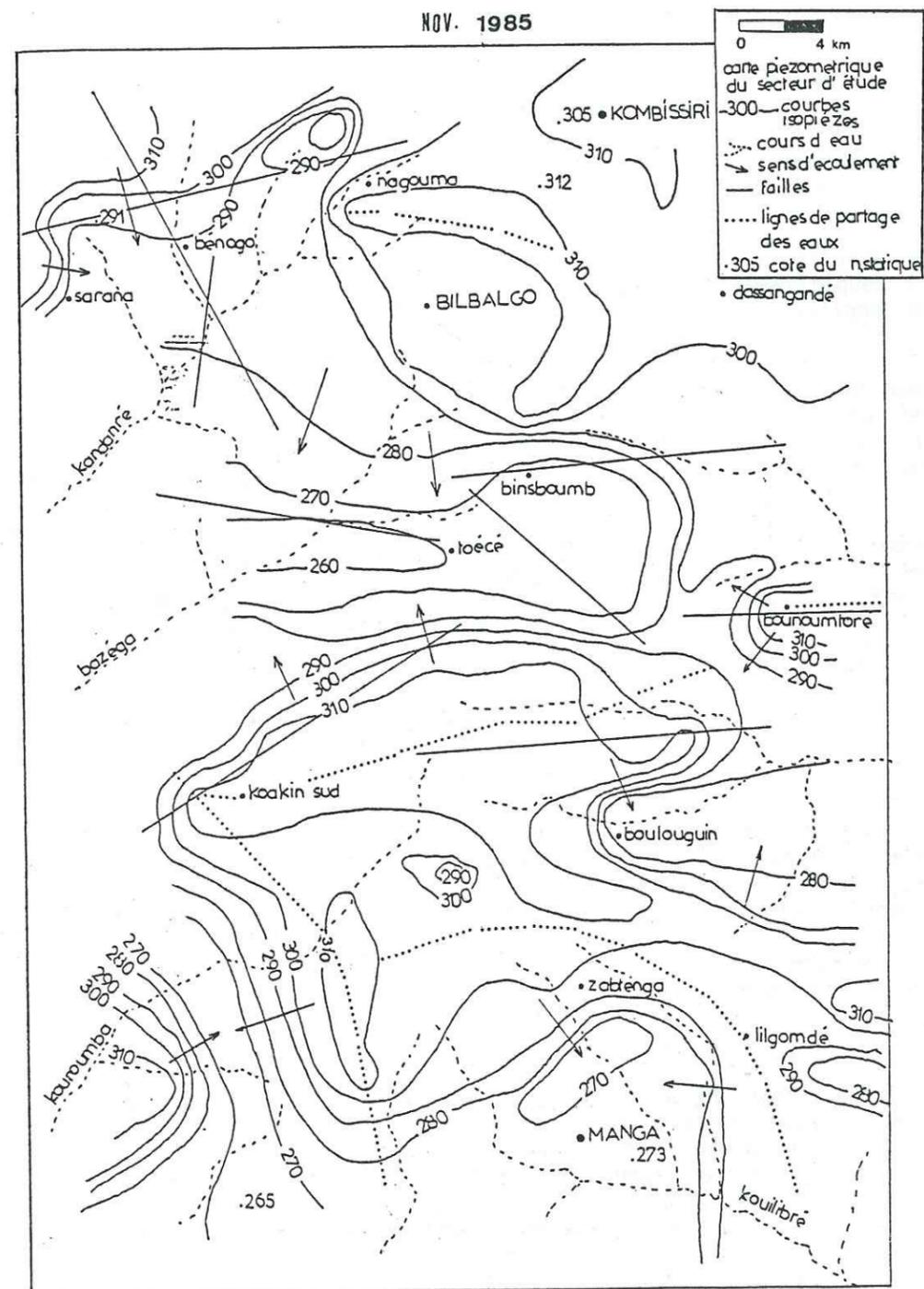
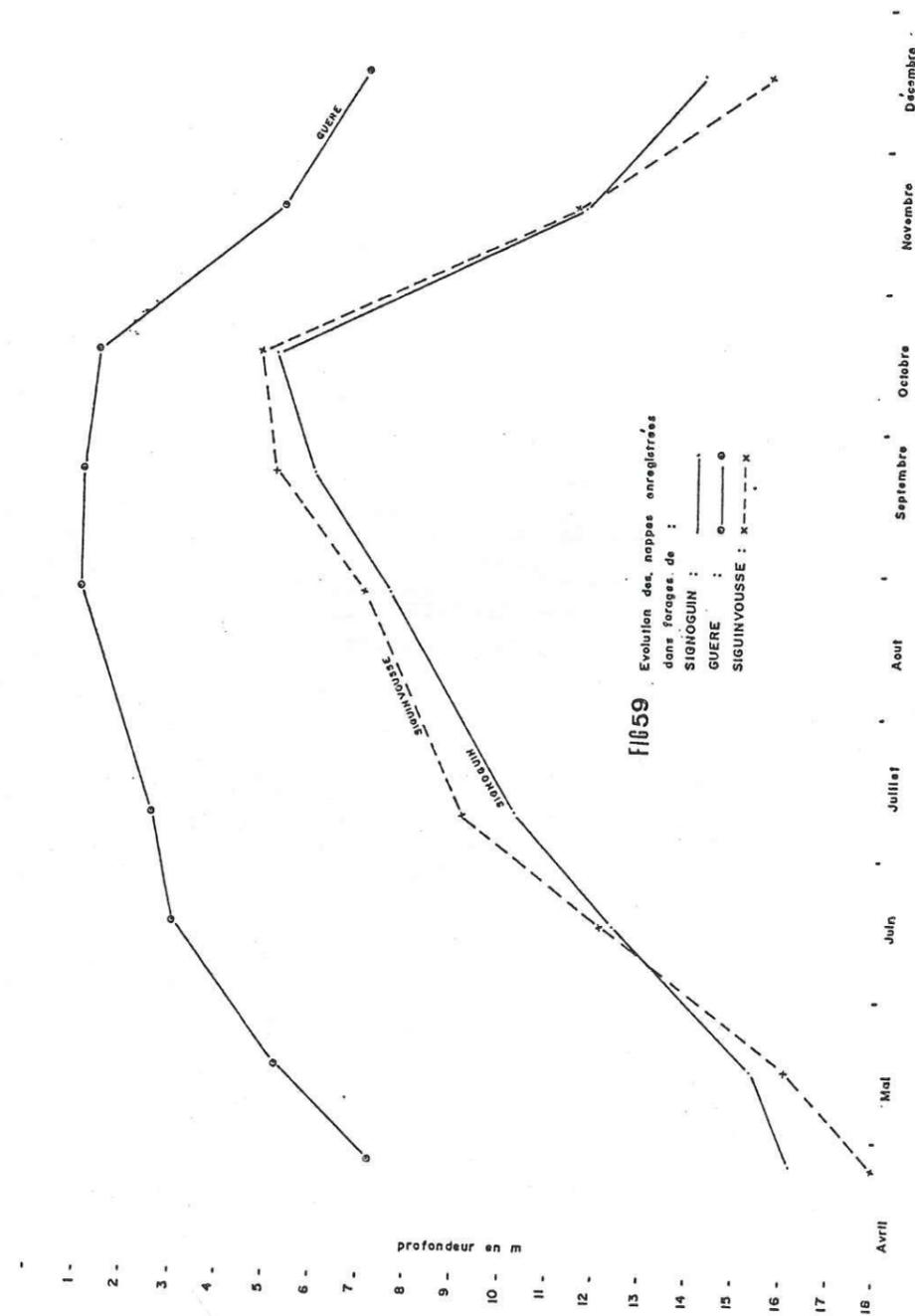


FIG 58



En 1969, C. JOSEPH étudiant les niveaux piézométriques dans les granites de la région de Bouaké en Côte d'Ivoire avait fait remarquer la très grande hétérogénéité des écoulements, hétérogénéité qu'il expliquait par l'effet des niveaux colmatés.

Les travaux sur la piézométrie des aquifères dans le socle cristallin d'Afrique de l'Ouest sont rares. Néanmoins, on peut citer la carte isopiézométrique de M. HAUBERT dans la boucle du cacao en Côte d'Ivoire qui a mis en évidence lui aussi un aquifère généralisé lié à la fracturation, celle de N. SORO sur le bassin de la Mé, ainsi que celle de A.Z. TRAORE au Mali.

Dans notre cas, les isopiézes les plus élevés se situent au Nord et au Sud du secteur d'étude dans les formations migmatitiques et granitiques qu'elles recoupent indifféremment comme l'avait souligné M. HAUBERT.

Mais nous notons par contre des nappes localisées, discontinues où l'on peut mettre en évidence des communications hydrauliques dans les zones fissurées des différents aquifères comme dans la région de SAN au Mali étudiée par R. GUIRAUD en 1982, grâce à des écoulements qui se font par les axes privilégiés.

Les fractures et les cours d'eau (Kandaré, Bazéga, Kouroumba) dont les tacés coïncident très souvent se situent généralement dans les zones topographiquement basses et constituent les principaux collecteurs qui drainent la zone vers la Volta rouge (Nazinon) à l'Ouest et la Volta blanche à l'Est.

4-6-2 FLUCTUATION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES

La comparaison des fluctuations naturelles des niveaux d'eau des forages avec la pluviométrie mensuelle montre que d'une façon générale, les niveaux piézométriques sont influencés par un processus naturel d'alimentation et de vidange, lié essentiellement aux précipitations soit directement, soit indirectement, à la suite des crues des cours d'eau.

Sur la figure 59, on note un pic prononcé en Septembre et Octobre dans les forages de Guéré, Signoguin, Singuinoussé situés au centre de notre secteur d'étude. C'est à cette période que les pluies sont fréquentes.

Ce phénomène a été constaté aussi au Ghana et dans le forage forage I.E.R.H. au Burkina Faso qui a permis par ailleurs de constater une tendance à la baisse pluriannuelle du niveau de l'ordre de 0,6 m/an. Quant à la différence des remontées des nappes, nous pensons qu'elle est liée à la nature pétrographique des terrains donc des perméabilités et aussi à la topographie comme l'a montré B. OUSMANE en 1978 au Niger.

CONCLUSION

La carte piézométrique du secteur d'étude montre une discontinuité des nappes du socle qui se localisent préférentiellement le long des fractures.

Les zones d'infiltration situées plus en hauteur, généralement dans les formations migmatitiques et granitiques le sont grâce à la nature pétrographique de ces formations et aux fractures qui les parcourent. Elles alimentent les différentes nappes qui sont drainées à leur tour vers le Sud-Ouest et vers l'Est. L'étude piézométrique que nous avons abordée dans ce mémoire n'est pas complète, car il aurait fallu mener des observations piézométriques sur toute l'année comme dans le cas de la figure 58, afin de mieux comprendre le compartement hydraulique des différentes nappes. Les seules mesures faites dans les forages avant l'installation définitive des pompes sont sans doute insuffisantes pour une généralisation du phénomène de fluctuations des nappes.

Néanmoins, nous pensons apporter quelques éléments d'appréciation à la piézométrie du secteur concerné.

Du reste, l'expérience de l'hydraulique villageoise de l'Est du pays (Gourma, Gnagna et Tapoa) où nous travaillons doit servir d'exemple à nos responsables. En effet, les forages à débit faible ne sont pas systématiquement abandonnés, mais sont équipés en piézomètre. Si cette expérience se poursuit, l'on disposera à l'avenir des points d'observation sur une grande partie du territoire qui serviront ainsi à des études piézométriques plus concluantes.

CINQUIEME PARTIE

LES ESSAIS DE POMPAGE

5.1 - INTERPRETATION DES ESSAIS DE POMPAGE

5.2 - EXPRESSION DES RESULTATS OBTENUS

CONCLUSION

CHAPITRE V

LES ESSAIS DE POMPAGE

--

Les pompages par paliers et de longues durées permettent de déterminer la géométrie et les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères.

Tous les forages que nous avons implantés dans le secteur d'étude pour le compte du projet BID sont destinés à l'alimentation en eau des villages avec pour moyen d'exhaure des pompes manuelles dont la capacité, rappelons-le, ne dépasse pas 0,6 m³/h à 50 mètres de profondeur. Pour ces raisons, tous ces forages n'ont pas fait l'objet de pompages d'essai en dehors de ceux ayant atteint un débit supérieur ou égal à 3 m³/h. Les autres, c'est-à-dire ceux dont le débit est compris entre 0,6 et 3 m³/h sont équipés après estimation de leur débit à partir du développement fait par le compresseur de l'atelier de forage. Les résultats obtenus dans ce cas et ceux obtenus par le développement à l'air lift d'une durée de 4 heures sont généralement concordants. C'est à l'issue de ces opérations que l'installation de la pompe survient.

5.1 - Interprétation des essais de pompage

Les pompages les plus couramment réalisés sont les pompages par paliers et les pompages de durée relativement longue (6 à 12 heures) ayant pour but le calcul des paramètres hydrodynamiques qui se limitent le plus souvent à la transmissivité. L'absence de piézomètre ne permettant pas la détermination du coefficient d'emmagasinement.

Les méthodes d'interprétation utilisées sont celles du milieu poreux basées sur la formule de THEIS & JACOB. L'application de cette formule suppose qu'on admette les hypothèses et les conditions aux limites suivantes:

- . terrain homogène et isotrope
- . nappe horizontale d'épaisseur constante
- . nappe infinie et non réalimentée
- . nappe au repos avant l'essai de pompage
- . temps de pompage relativement long (42 heures au minimum)

Toutes ces conditions ne sont pas remplies dans notre cas où les couches aquifères ne sont ni homogènes, ni isotropes, ni surtout d'extension infinie.

En effet, dans les réservoirs d'altérites où la perméabilité d'interstice est assez importante, les méthodes classiques d'interprétation des pompages d'essai peuvent rester valables. Mais pour le socle fracturé, un certain nombre de modèles ont été proposés pour résoudre le problème: certains tenant compte des aquifères d'altérites, d'autres ne considérant que le milieu fracturé.

Parmi les modèles qui tiennent compte des altérites, on peut citer celui de PAPADOPOULOS & COOPER; FEUGA, VAUBOURG (1980). Ce modèle fait intervenir les effets de capacité du puits de pompage qui peuvent masquer les réponses propres de l'aquifère pendant une durée de pompage considérable. La méthode de PAPADOPOULOS-COOPER a été initialement mise au point pour tenir compte du volume d'eau d'un puits de grand diamètre. C'est par rapprochement qu'elle est souvent utilisée pour les essais de débit des forages.

Selon cette méthode et pour des transmissivités allant de 10^{-4} m²/s à 10^{-6} m²/s avec un rayon d'ouvrage $r_p=0,07$ m, le temps limite t_c , au-delà duquel les effets de capacité du puits sont négligeables est:

$$t_c = \frac{25 r_p^2}{T}$$

D'autre part, des modèles mathématiques assimilant le milieu fracturé soit à un milieu à double porosité, soit à un milieu poreux équivalent anisotrope ont été proposés par divers auteurs, notamment par GRINGARTEN, WITHERSPON, M. VENDENBOUSH, P. VAUBOURG et D. THIERY en 1983, qui considèrent le cas d'un aquifère isotrope affecté d'une fissure verticale ou horizontale.

Dans le cas d'une fissure verticale affectant un aquifère isotrope les hypothèses suivantes sont émises:

- . l'aquifère est homogène, isotrope et d'épaisseur constante sur toute la zone influencée par le pompage;
- . il est d'extension latérale infinie;
- . les épontes sont imperméables;
- . la libération d'eau par le milieu poreux consécutivement à une baisse de pression est instantanée;
- . Le puits est parfait avec un rayon négligeable;
- . le débit pompé est constant;
- . le puits de pompage est situé au milieu d'une fissure verticale de faible épaisseur, par rapport à la distance au piézomètre d'observation;
- . la fissure a une perméabilité équivalente pratiquement infinie ce qui maintient le niveau piézométrique identique dans toutes les fissures.

Les auteurs font remarquer que ce schéma d'interprétation, bien que théorique, peut-être appliqué dans les forages où les fissures parallèles et subverticales communiquent entre elles. On construit d'abord sur un diagramme bilogarithmique une courbe type à partir des variables (temps, rabattements) réduites:

$$s_a = \frac{4Ts}{Q} = \text{rabattement réduit}$$

$$t_a = \frac{4Tt}{xfS} = \text{temps réduit}$$

$$xf = \text{demi longueur de la fracture verticale}$$

On construit ensuite la courbe d'essai avec les variables réelle s et t .

L'interprétation se fait par la méthode d'identification en relevant les points de coïncidence des courbes types et d'essai

$$(\text{Transmissivité}) T = \frac{Q}{4} \frac{sa}{ta} ; Sx^2f = \frac{4Tt}{ta} \cdot \frac{sa}{s} \quad (S = \text{coefficient d'emmagasinement})$$

En absence de piézomètre, S et xf ne peuvent être obtenus séparément.

L'interprétation peut se faire aussi dans les piézomètres disposés dans l'axe et de part et d'autre de la fracture, en procédant de la même façon que le premier cas. On obtient pour expressions:

$$T = \frac{Q}{4} \frac{sa}{s} \quad \text{et} \quad S = \frac{4T}{x^2} \frac{t}{ta} \quad \text{avec } x = \text{distance du piézomètre au forage}$$

Dans le cas d'une fissure horizontale circulaire, les hypothèses émises pour la fracture verticale restent valables et les calculs de T et S se font suivant la même démarche:

$$T = \frac{Q}{4} \frac{sa}{s} \quad \text{et} \quad S = \frac{4Tt}{x^2 ta} = \frac{Q}{x^2} \frac{t}{ta} = \frac{Q}{x^2} \frac{t}{ta} \frac{sa}{s}$$

La méthode de WAREN & ROOT est appliquée dans le cas d'un aquifère à double porosité:

- . une porosité de matrice constituée de pores fins et à perméabilité faible;
- . une porosité de fracture et de vides à perméabilité supérieure à celle de la matrice.

Dans ce modèle, on considère que l'écoulement de l'eau de la matrice vers les fractures est pseudo-permanent et que les fractures transmettent le fluide vers le puits. Un tel système est caractérisé par deux facteurs:

$$F = \frac{\phi_f C_e}{\phi_f C_e + (1-\phi_f) C_m}$$

et le paramètre d'écoulement

$$= K_m \frac{r^2 f}{k_f}$$

ϕ_f = porosité des fractures et des pores connectés

C_e = coefficient de compressibilité de l'eau

C_m = coefficient de compressibilité de la matrice

K_m = perméabilité de la matrice

r_f = rayon du puits

k_f = perméabilité moyenne des fractures

Lorsque le paramètre $\frac{K_m r^2 f}{k_f}$ est voisin de 1, le modèle de WAREN & ROOT peut-être assimilé à un modèle classique de réservoir homogène.

Le principe d'interprétation est le même que celui de THEIS & JACOB que nous verrons plus loin.

$$T (\text{transmissivité}) = 0,183 \frac{Q}{C}$$

$$F = 10 - \frac{S}{C}$$

en remplaçant F par sa valeur dans le paramètre d'écoulement on obtient ϕ_f .

Néanmoins, malgré ces divers aspects, les différents auteurs admettent que lorsque la durée de pompage est suffisamment longue, l'écoulement dans le milieu fracturé devient identique aux solutions classiques proposées

pour le milieu poreux homogène. C'est notamment le cas surtout des solutions analytiques pour la fracture verticale qui deviennent identiques aux solutions classiques de THEIS & JACOB proposées pour un milieu poreux au bout d'un temps de pompage

$$t \gg x^2 fs / 2T$$

où

x_f = demi-longueur de la fracture
 S = coefficient d'emménagement
 T = transmissivité

Cette constatation justifie quelque peu les interprétations des pompages d'essai effectués dans le milieu fracturé Ouest Africain par les méthodes propres aux milieux poreux. Nous avons pour notre part dépouillé nos essais de pompage selon la méthode graphique d'approximation logarithmique de l'équation de THEIS.

Les descentes et les remontées des niveaux de l'eau dans les forages étant reportées sur des diagrammes semi-logarithmique rabattement fonction de $\log t$ à partir desquels nous pouvons déterminer les transmissivités ponctuelles d'après l'expression:

$$T = \frac{0,183}{C} Q$$

Q étant le débit de pompage
 C = l'accroissement du rabattement dans un cycle logarithmique

5. 2 - Expression des résultats obtenus

Tous les essais de débit ont duré chacun 12 heures (6 heures de descente, 6 heures de remontée), par mesure d'économie imposée par la direction du projet.

La figure 60 représente la courbe de descente du pompage effectué sur le forage de Sinciné.

Le débit du pompage de 3,4 m³/h a provoqué un rabattement de 22 mètres. Pour $C = 0,9$ m on obtient une transmissivité de $1,8 \cdot 10^{-4}$ m²/s.

La figure 61 est celle de la courbe de remontée du même forage qui a permis de déterminer une transmissivité de $1,3 \cdot 10^{-5}$ m²/s.

La figure 62 représente la courbe de descente du forage de Samsaongo implanté sur les pegmatites broyées. Avec un pompage à débit constant de 9 m³/h, on obtient un rabattement maximal de 14,43 m, ce qui correspond à une transmissivité de $3,2 \cdot 10^{-4}$ m²/s.

La figure 63 est la courbe de remontée du même forage. Cette courbe comporte deux parties qui traduisent encore une fois l'hétérogénéité du milieu fissuré et qui permet d'estimer deux transmissivités.

La première partie de la courbe représente les 80 premières minutes de l'essai au cours desquelles les points s'alignent sur une droite où $C = 1,5$ m

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

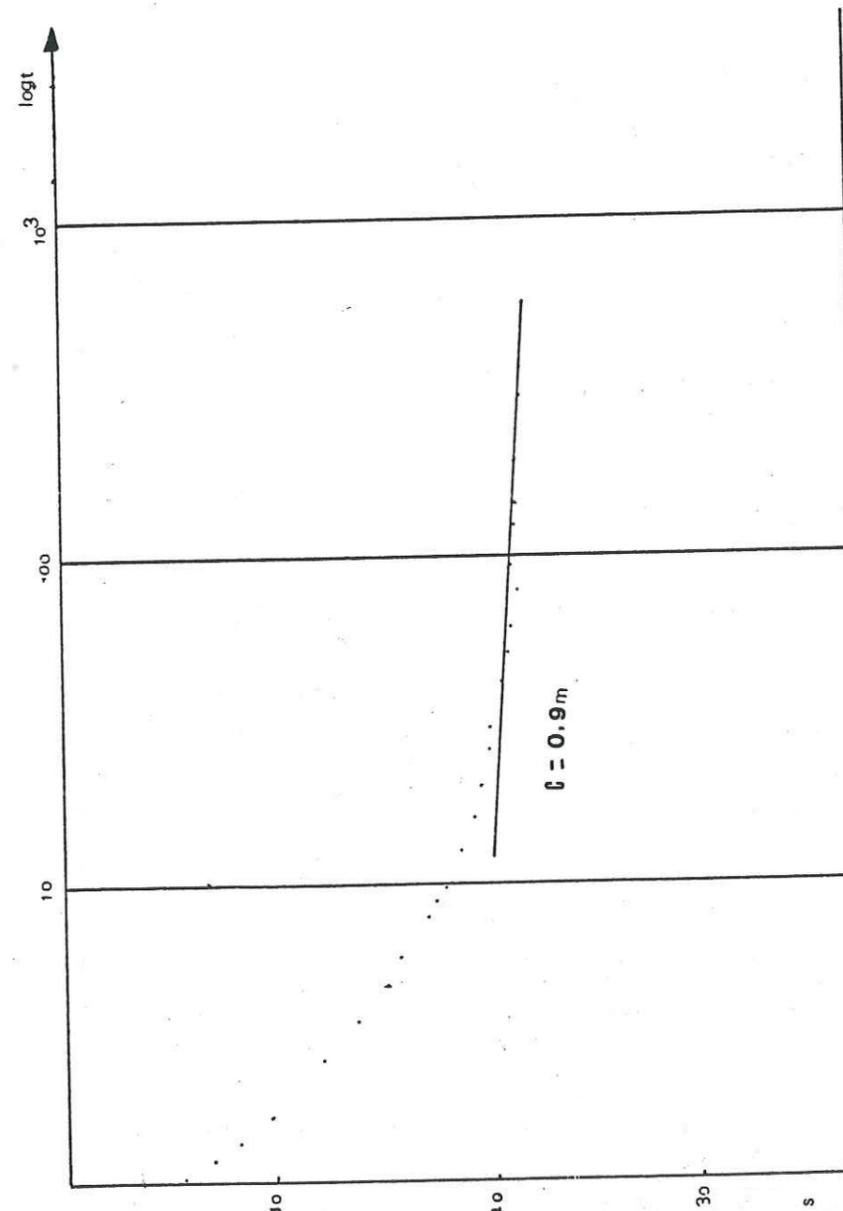


FIG 60 COURBE DE DESCENTE DU FORAGE DE SINCINE

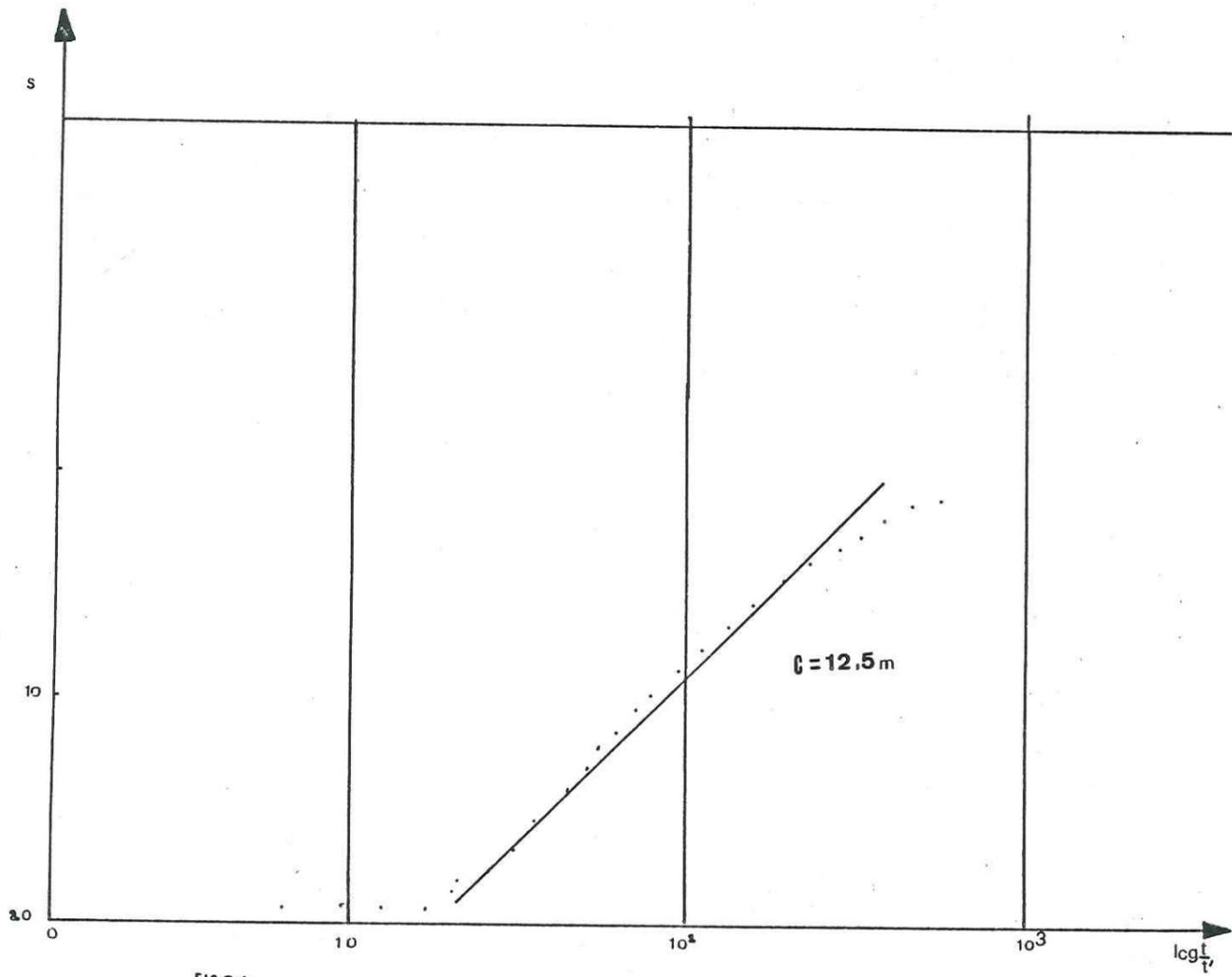


FIG61 COURBE DE REMONTEE DU FORAGE DE SINCINE

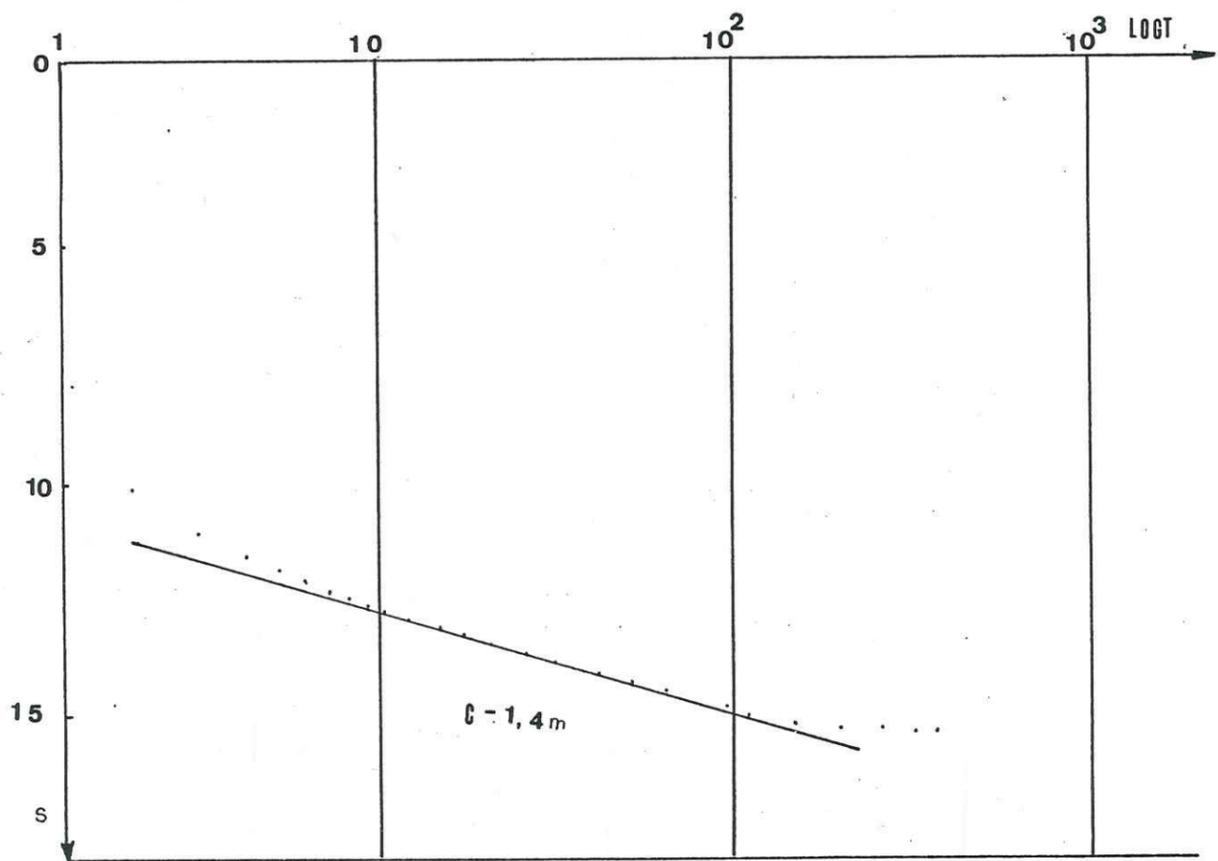


FIG62 COURBE DE DESCENTE DU FORAGE DE SAMSAONGO

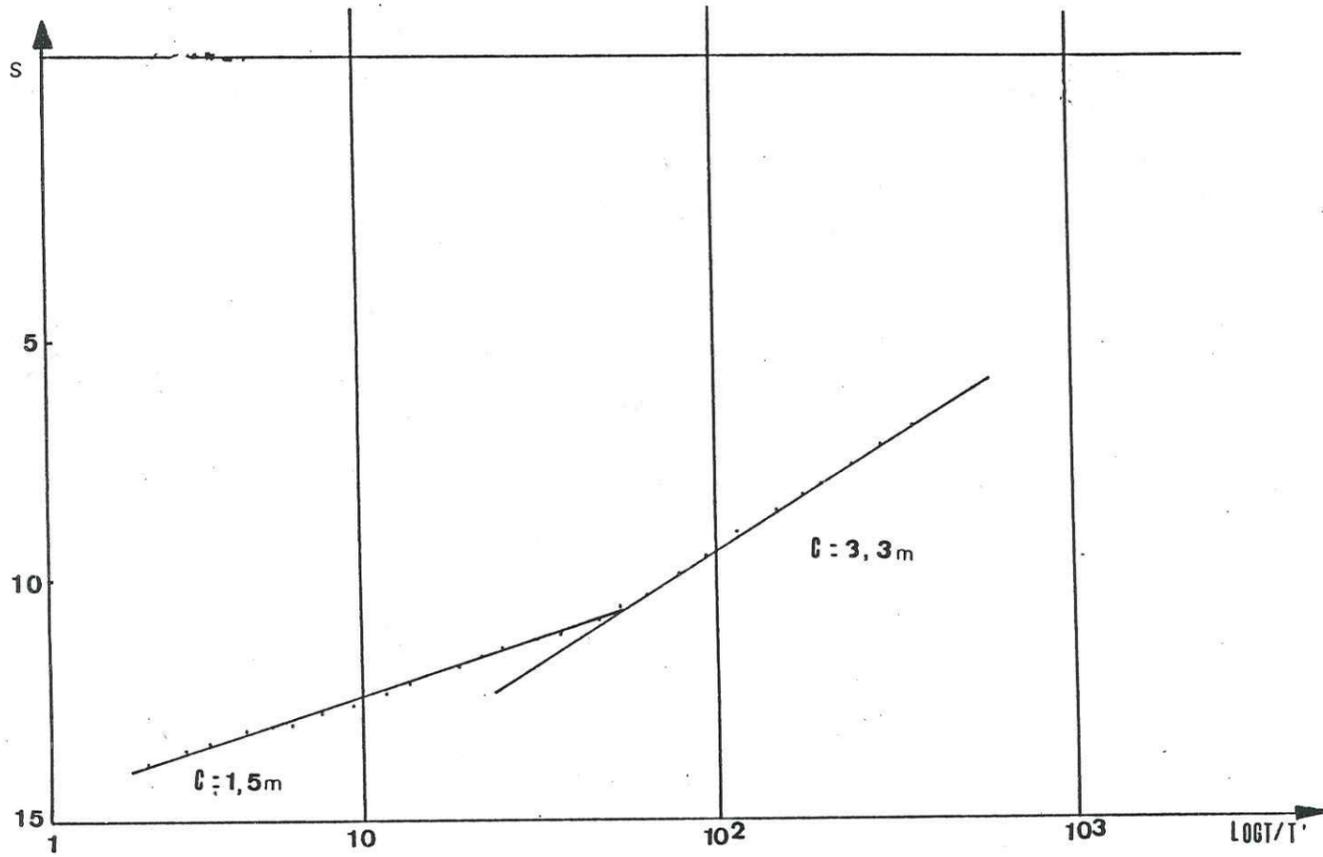


FIG63 COURBE DE REMONTEE DU FORAGE DE SAMSONGO

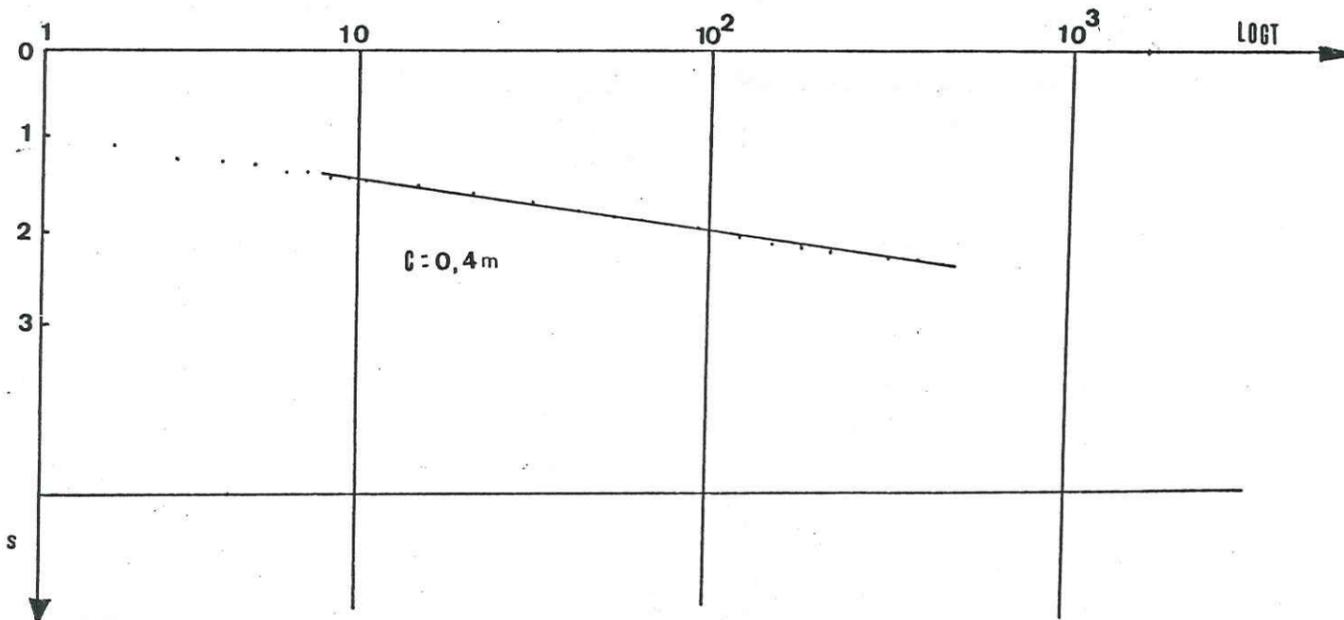


FIG64 COURBE DE DESCENTE DU FORAGE DE RABOGTENGA

10 AOÛT 2003

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
 MAISON DES GEOSCIENCES
 DOCUMENTATION
 B.P. 53
 F. 38041 GRENOBLE CEDEX
 Tél. 04 76 88 54 27 - Fax 04 76 57 40 38
 Mail: p.lalour@ujf-grenoble.fr

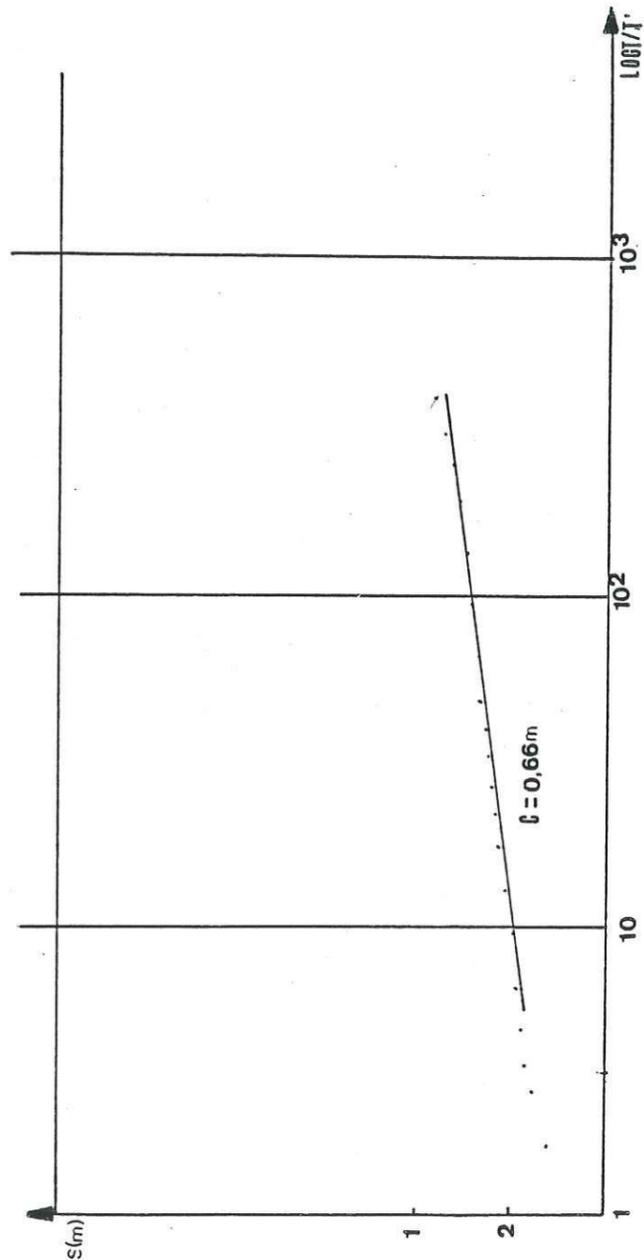


FIG 65 COURBE DE REMONTEE DU FORAGE DE RABOGTENGA

Localités	Venues d'eau	Q (m ³ /h)	T (m ² /s)	Prof. (m)	Crépines ou tubages dans les altérites
TJIRA	17; 25; 34	9	1,4 10 ⁻⁴	44	Altérites tubées
BANA	13; 24	3	4,5 10 ⁻⁵	31	Altérites tubées
OUA 1	23; 30	1,2	5 10 ⁻⁵	44	Altérites tubées
KOAKIN	16; 5; 20; 30; 33	12	1,5 10 ⁻⁴	37	Altérites tubées
LILGOMDE	10; 32; 5; 35	12	7,8 10 ⁻⁵	37	Altérites tubées
SINIKIERE I	31; 54	3	5,7 10 ⁻⁴	56	Altérites tubées
GAOKO	19; 25	12	3,3 10 ⁻⁵	44	Altérites tubées
PASSINTINGA	31; 45	4	2,5 10 ⁻⁴	56	Altérites tubées
SOUANGHIN	25; 33	12	2,1 10 ⁻⁴	40	Altérites tubées
BANGANSOM	25; 40	1,5	3,8 10 ⁻⁵	53	Altérites tubées
SIDTENGA	13,5; 39	4,5	2,1 10 ⁻⁴	62	Altérites tubées
GOUIN	23;	2,7	2,5 10 ⁻⁴	44	Altérites tubées
BOUNOUMIORE	27,5; 31; 34,5	3,8	2,4 10 ⁻⁴	38	Altérites crépinées
GUERE	13; 17	12	4 10 ⁻⁴	41	Altérites crépinées
KONIOUDOU	19; 24	12	7,3 10 ⁻⁴	38	Altérites crépinées
KONDRIN	18; 26	9	7,8 10 ⁻⁴	44	Altérites crépinées
WENTINGA	23; 39	6	6,5 10 ⁻⁴	44	Altérites tubées
NABINKISMA	18; 32	7,2	4 10 ⁻³	41,8	Altérites tubées
TOMABISSI	20	7,2	1,25 10 ⁻⁴	37	Altérites tubées
MOUMA	19	12	1,25 10 ⁻⁴	37	Altérites tubées
TAMCE	20,5	6,5	4,02 10 ⁻⁵	37	Altérites tubées
OUIDI	40	4,5	4,09 10 ⁻⁵	44	Altérites tubées
YOMBASSE	42	3,9	3,4 10 ⁻⁴	50	Altérites tubées
SENA	37; 41	3,1	1,3 10 ⁻⁴	46	Altérites tubées
SAKOUILGA 2	22; 38	7,8	3,5 10 ⁻³	52	Altérites tubées
SARANA	28; 34	4,6	4,10 ⁻³	44	Altérites tubées
RAKAYE MOSSI	31; 50	6,5	9 10 ⁻³	56	Altérites tubées
NABDOGO	20; 28; 36	2	2,10 ⁻³	40	Altérites tubées

Tableau 16

Tableau récapitulatif des ouvrages de captage réalisés dans le secteur de Manga-Kombissiri

Puis après 80 minutes, on remarque une remontée de la courbe. Sur cette deuxième partie, la transmissivité déterminée est de $1,3 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$.

La figure 64 représente la courbe de descente du forage de Rabogtenga. Ce forage pompé à $12 \text{ m}^3/\text{h}$ est le plus productif de la zone avec $36 \text{ m}^3/\text{h}$ rappelons le. Il pourrait être pompé à un débit supérieur si la capacité de la pompe immergée le permettait.

Tous les points s'alignent depuis le début de l'essai jusqu'à la fin. Le rabattement maximal y est de $2,40 \text{ m}$.

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

La figure 65 représente la courbe de remontée du même forage. Courbe qui a permis de déterminer une transmissivité de $8,4 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$.

Nous remarquons sur la majorité des courbes, dans les premières minutes des essais une descente progressive pendant laquelle, les points s'alignent approximativement sur une droite, représentant l'écoulement en régime transitoire de la nappe. C'est le cas des forages des Samsaongo et de Sinciné (fig. 52 et 53), l'apparition de la stabilisation intervient quand l'aquifère rééquilibre son bilan.

Le tableau 16 est celui des transmissivités de quelques uns des forages du secteur d'étude avec leurs conditions d'équipement.

Toutes les venues d'eau situées dans les 20 premiers mètres, c'est à dire dans les altérites, ne sont pas captées par les crépines du moins dans la majorité des cas, mais sont drainées par le massif filtrant introduit jusqu'à leur niveau. Ceci est d'autant plus imposé que certaines venues d'eaux profondes sont faibles.

CONCLUSION

La détermination des caractéristiques des aquifères du socle fracturé par la courbe caractéristique, rabattement résiduel en fonction du débit de J. FORKASIEWCZ 1978 ou de M. GOSSELIN, 1939 est complexe. Les forages sont caractérisés le plus souvent par plusieurs venues d'eau liées à des arènes grenues ou à des filons qui traduisent l'hétérogénéité du milieu fissuré. Nous pouvons dès lors considérer les paramètres calculés à partir des courbes de descente ou de remontée comme caractéristiques ponctuelles des ouvrages de captage. Encore faut-il avoir des piézomètres pour le faire de façon complète.

H. ENGALENC (1979) avait fait aussi cette remarque sur les essais de pompage de Mogtéo situé au Nord-Est de notre secteur d'étude.

Pour cet auteur, le modèle hydrodynamique dans le socle cristallin est un multicouche dont les caractéristiques n'ont pas été étudiées spécifiquement. Vouloir comme dans notre cas calculer les caractéristiques des ouvrages dans des conditions difficiles et particulières, c'est négliger l'hétérogénéité du milieu fissuré qui s'accompagne d'une forte anisotropie.

Cette hétérogénéité se retrouve même au niveau de la nappe d'arène supposée pourtant homogène. K. FRANCOIS avait montré que la nappe d'arène au Burkina oriental était très hétérogène sur une même verticale avec des transmissivités très variables. C'est pourquoi nous ne tenterons pas dans ce mémoire le calcul du coefficient d'emmagasinement à partir des fluctuations du niveau piézométrique.

SIXIEME PARTIE

HYDROCHIMIE

- 6.1 - CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX
- 6.2 - CLASSIFICATION DES EAUX
- 6.3 - ORIGINE DES IONS
- 6.4 - RELATION ENTRE MINERALISATION ET PROFONDEUR
- 6.5 - CONCLUSION

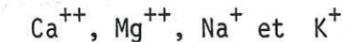
CHAPITRE VI HYDROCHIMIE

--

INTRODUCTION

L'étude hydrochimique que nous entreprenons porte sur 79 échantillons d'eau prélevés au cours des campagnes 1985 et 1986 dans les forages du secteur d'étude.

L'analyse chimique de ces échantillons a été, pour la plupart, faite au Laboratoire d'Hydrologie de l'Office National des Puits et Forages, au Laboratoire du Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina installé à Bobo-Dioulasso. Quelques échantillons ont été analysés au Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Institut Dolomieu et à la Faculté de Pharmacie de Grenoble, notamment pour



selon les méthodes décrites par C. ARMAND et B. DELAQUAIZE en 1977.

6.1 - CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX

L'étude statistique des caractéristiques physico-chimiques des 79 échantillons porte sur 10 variables que nous regroupons dans les tableaux 17 et 18.

6.1.1 - Caractéristiques physiques

C'est essentiellement la température, le pH et la conductivité.

a/ La température

Les valeurs de température mesurées in situ pour certains forages ne figurent pas sur le tableau 17 ci-dessus. Mais celles que nous avons pu appréhender tournent autour d'une moyenne de 30°, avoisinant donc la température moyenne annuelle de l'air.

b/ Le pH

Les eaux ont en général un pH voisin de 7 donc de la neutralité. Les pH les plus acides de 5, 6 ont été mesurés dans les forages de Signoguin et de Simbri. Les plus fortes valeurs de 8,4 et 8,6 ont été observées respectivement dans les forages de Gago et de Lilgomdè.

c/ La conductivité

C'est un paramètre mesuré au cours des essais de débit. Sa variation est étroitement liée à celle de la concentration ionique de l'eau. La corrélation entre la conductivité et la minéralisation totale est assez bonne.

	Localités	Prof. m	pH	C us	TH	HCO ₃ ⁻ meq/l	Cl ⁻ meq/l	SO ₄ ⁻ meq/l	Ca ⁺⁺ meq/l	Mg ⁺⁺ meq/l	Na ⁺ meq/l	K ⁺ meq/l	Σ ⁻	Σ ⁺	Géologie
1	Bagansou	53	6,8	188	1,7	2,10	0,7	0,05	0,77	0,9	0,8	0,77	2,85	2,84	Migmatites
2	Bana	31	7,4	264	8,4	2,68	1,15	4,8	4,5	3,9	0,3		8,63	8,7	Amphibolites
3	Balanguin	56	6,9	125	2,8	2,88	0,6	0,10	1,38	1,5	0,6		3,58	3,48	Migmatites à pegmatites
4	Benogo Nabiga	41	6,9	275	2,74	2,58	1	0,12	1,3	1,45	0,95		3,7	3,7	Micaschistes à grenat
5	Benogo Silmissi	44	7	90	1,55	1,68	0,7	0,12	0,75	0,8	0,95		2,5	2,5	Pegmatites
6	Béré	31	7,1	183	1,95	2,47	0,9	0,43	0,87	1,08	1,25	0,62	3,80	3,82	Migmatites
7	Borogo	40	8,1	231	5,3	4,05	1	1	3,3	2	0,7		6	6	Cuirasse/Pegmatites
8	Bellegre	42	7	127	1,34	1,80	0,7	0,10	0,65	0,7	1,25		2,6	2,6	Migmatites Pegmatites
9	Bingla	40	7,4	126	2,8	1,58	0,8	0,9	1,8	1	0,9		3,60	3,7	Cuirasse/Pegmatites
10	Boulouguin	40	6,8	212	2,27	2,7	0,9	0,1	1,01	1,26	1,43		3,7	3,7	Granito-gneiss
11	Bounoumtoré	38	7,2	314	2,2	1,82	0,75		1	1,15	0,42		2,57	2,57	Granito-gneiss
12	Boussousou	53	7	155	1,82	2,22	0,75	0,08	0,86	0,96	1,15		3,05	2,97	Migmatites
13	Bissiga	54	7,1	200	1,3	1,84	0,95	0,06	0,6	0,67	1,52		2,85	2,79	Granite
14	Douabié	38	7,1	326	1,6	4,4	0,95	0,14	1,42	2,02	1,95		5,49	5,39	Granite/Amphibolites
15	Dassanga ndé	41	7,2	250	2,5	2,9	0,8	0,09	1,14	1,26	1,3		3,71	3,7	Granito-gneiss
16	Douré	44	6,8	141	2,23	2,32	0,85	0,1	1	1,23	1,04		3,27	3,27	Migmatites
17	Douré	32	7	280	1,65	2	0,75	0,2	0,78	0,87	1,25		2,95	2,9	Pegmatites
18	Gago	40	8,4	225	6	4,23	1	1,4	2,9	3,1	8,6		6,62	6,6	Granite à deux micas
19	Gastega	43	8,2	177	5,33	2,86	0,85	0,8	3,17	2,16	0,43	0,53	4,5	6,29	Granite
20	Gaongo	44	7	97	1,45	1,44	0,74	0,02	0,68	0,75	0,77		2,2	2,2	Migmatites
21	Guéré	41	6	128	1,4	1,6	1	0,09	0,65	0,88	1,06	1,28	2,6	2,6	Granite/Pegmatite
22	Guéré-Goguain	38	5,7	131	1,8	2,28	1,09	0,01	0,8	0,77	1,6		3,38	3,37	Granite
23	Ouïassi	56	7	224	2,2	2,4	0,75	0,08	1	1,15	1		3,23	3,15	Granito-gneiss
24	Gogogo	31	7,3	208	3,75	3,38	0,95	0,10	1,75	2,07	0,5		4,43	4,32	Amphibolites
25	Godin	43	7,8	218	4	2,74	0,95	1,1	2,36	1,6	0,8		4,79	4,76	Granite rose
26	Gaoko	41	6,8	130	1,8	2,47	0,85	0,33	0,79	0,98	1,9	0,55	4,17	4,22	Micaschistes
27	Gonsé	38	7,3	173	2,65	3,34	0,95	0,2	1,25	1,4	1,85		4,49	4,5	Granite
28	Imassogo	36,5	7,5	109	0,9	1,61	0,65	0,28	0,39	0,49	1,22	0,45	2,54	2,55	Micaschistes
29	Kambo	65	6,9	131	1,25	1,6	0,65	0,51	0,55	0,69	1	0,48	2,76	2,72	Granito-gneiss
30	Koakin	37	7,4	250	7,9	3,9	0,8	2,5	4,3	2,6	0,3		7,2	7,2	Schiste et micaschistes
31	Konioudou	38	7	251	4	2,6	0,85	1	2,16	1,8	0,6		4,45	4,56	Granite/Pegmatites
32	Kouïgou	40	7	138	2,23	2,8	1	0,10	1	1,93	1,6		3,9	3,8	Granite/Pegmatites
33	Kougbaga	36,5	6,8	148	2,6	2,61	0,95	0,42	1,15	1,43	0,57	0,82	3,97	3,97	Migmatites
34	Kie dbingré	44	7	124	1,34	1,31	0,65	0,14	0,65	0,7	0,7		2,1	2,05	
35	Konekongo	80	5,9	214	3,16	4,38	0,8	0,07	1,58	1,56	2,04		5,25	5,18	Schistes graphiteux

36	Kondrin	44	6	160	1,6	2,08	1,2		0,6	0,92	1,76		3,28	3,28	Granito-gneiss
37	Kierma	50	6,8	218	3	2,6	1,05	0,08	1,4	1,55	0,70		3,73	3,65	Migmatites
38	Kazanga	40	7,2	399	3,63	3,52	2,1	0,3	2,52	1,11	2,3		5,92	5,93	Migmatites/Amphibolites
39	Lallé	50	7,1	227	4,2	2,88	0,95	1,25	2,48	1,72	0,7		5,05	4,9	Filon de quartz
40	Lanzoudo	50	7		2,9	3,28	0,85	0,10	1,4	1,5	1,35		4,23	4,25	Pegmatites
41	Lilgomdé	37	8,6	375	9,9	6,8	1,1	2	5,7	4,2	0,3		9,9	10,2	Schistes/quartz
42	Mandié	57	7,7	325	3,7	5,12	0,8	0,12	1,7	1,9	2,3		6,04	5,9	Micaschistes
43	Nabinkisma	42	7,1	197	2,05	2,29	0,9	0,04	1,3	0,75	0,84	0,26	3,23	3,15	Migmatites à Pegmatites
44	Nagouma	42	6,8	180	1,9	2,12	1	0,08	0,9	0,96	1,2		3,2	3,06	Granite/Pegmatite
45	Nabdogo	48	7	176	3	2,14	0,9	0,6	1,9	1,07	0,74		3,64	3,71	Pegmatites
46	Nini-Nobéré	51	6,9	183	3,2	2,86	0,85	0,12	1,5	1,66	0,36	0,22	3,75	3,71	Micaschistes
47	Ouda I	44	8	243	6,6	4,86	0,9	1,6	3,8	2,8	0,76		7,26	7,26	Schistes graphiteux
48	Ouda II	40	8,2	275	7	4,7	0,75	2	4,5	2,5	0,5		7,45	7,5	Granite à amphibole
49	Ouidi	44	6,9	148	1,7	1,38	0,75	0,05	0,8	0,88	0,45		2,18	2,13	Migmatites
50	Passintenga	56	6,9	125	1,86	2,57	0,85	0,16	0,83	1,03	1,3	0,33	3,58	3,49	Migmatites
51	Rabogtenga	39	7,2	218	5	2,98	0,75	1,6	3,15	1,6	0,47		5,3	5,32	Migmatites/Amphibolites
52	Rakaye Mossi	56	7,4	243	3,4	3,11	0,75	0,06	1,5	1,9	0,5	0,21	3,92	4,11	Roches vertes
53	Samsaongo	48	7,5	128	2,4	1,55	0,62	0,28	1,35	0,98	0,35	0,18	2,45	2,86	Pegmatites
54	Sarana	44	7,5	110	2,7	2,77	0,65	0,08	1,21	0,96	0,69	0,28	3,5	3,13	Granite/Pegmatite
55	Sinciné	50	7,4	231	4,1	3,19	0,85	0,27	2,8	1,28	0,28	0,17	4,3	4,5	Granito-gneiss
56	Signoguin	38	5,6	297	3,2	4,5	0,8	0,02	1,78	1,42	2,5		5,7	5,7	Micaschistes
57	Sidtengo	62	6	171	2,2	2,92	0,7	0,04	1,46	0,76	1,41		3,66	3,63	Granito-gneiss
58	Siguinvoussé	50	6	156	1,76	2,2	1	0,06	1	0,76	1,45		3,2	3,21	Granite à amphibole
59	Sinikiéré I	56	7,2	237	6	3,42	0,95	1,93	3,6	2,3	0,4		5,37	6,3	Schistes graphiteux
60	Sinikiéré II	47	6,8	288	1,6	2	0,7	0,06	0,64	0,71	1,35		2,76	2,70	Schistes graphiteux
61	Silimba	44	7,6	190	3,8	2,79	0,65	0,39	1,96	1,8	0,16	0,04	3,71	3,96	Granite
62	Soré	56	7,2	190	1,6	1,46	0,85	0,15	1	0,6	0,86		2,46	2,46	Granite
63	Soanghin	40	6,8	188	1,9	2,59	0,9	0,47	0,85	1,05	1,82	0,24	3,96	3,96	Gneiss
64	Simbri	58	5,6	301	4,05	4,8	1,2	0,1	2,1	1,95	2		6,1	6,05	Micaschistes
65	Tandaga	37,5	7,2	85	1,8	1,88	0,8	0,06	0,8	0,88	1		8,74	2,7	Granite rose
66	Toebanaga	41	7,2	113	1,7	1,34	0,65		0,96	0,73	0,30		1,99	1,99	Migmatites
67	Toghin	78	7,1	150	1,77	1,91	0,85	0,18	1,1	0,66	0,76	0,25	2,94	2,77	Pegmatites/Aplites
68	Tingandogo	47	6,7	190	3,5	4,24	1	0,08	1,66	1,84	1,74		5,32	5,34	Migmatites
69	Tigré	68	8	235	5,9	3,5	1,5	4,2	4,9	4	0,3		9,2	9,2	Micaschistes
70	Toula	31	8,6	198	5,4	3,66	1	0,4	3,4	2	0,07	0,05	5,06	5,52	Granite à biotite

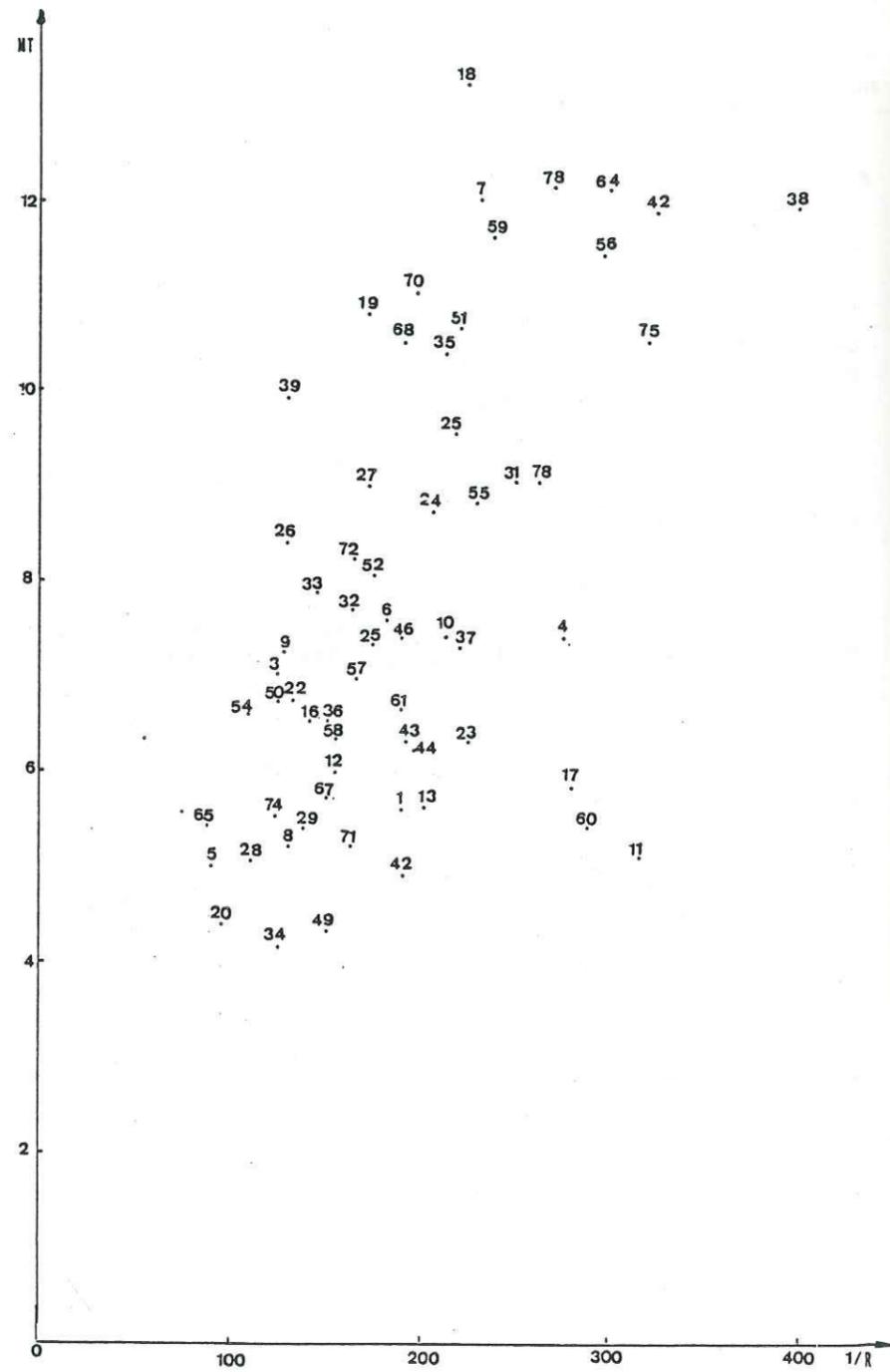


Figure 66: Variation de la conductivité en fonction de la minéralisation totale

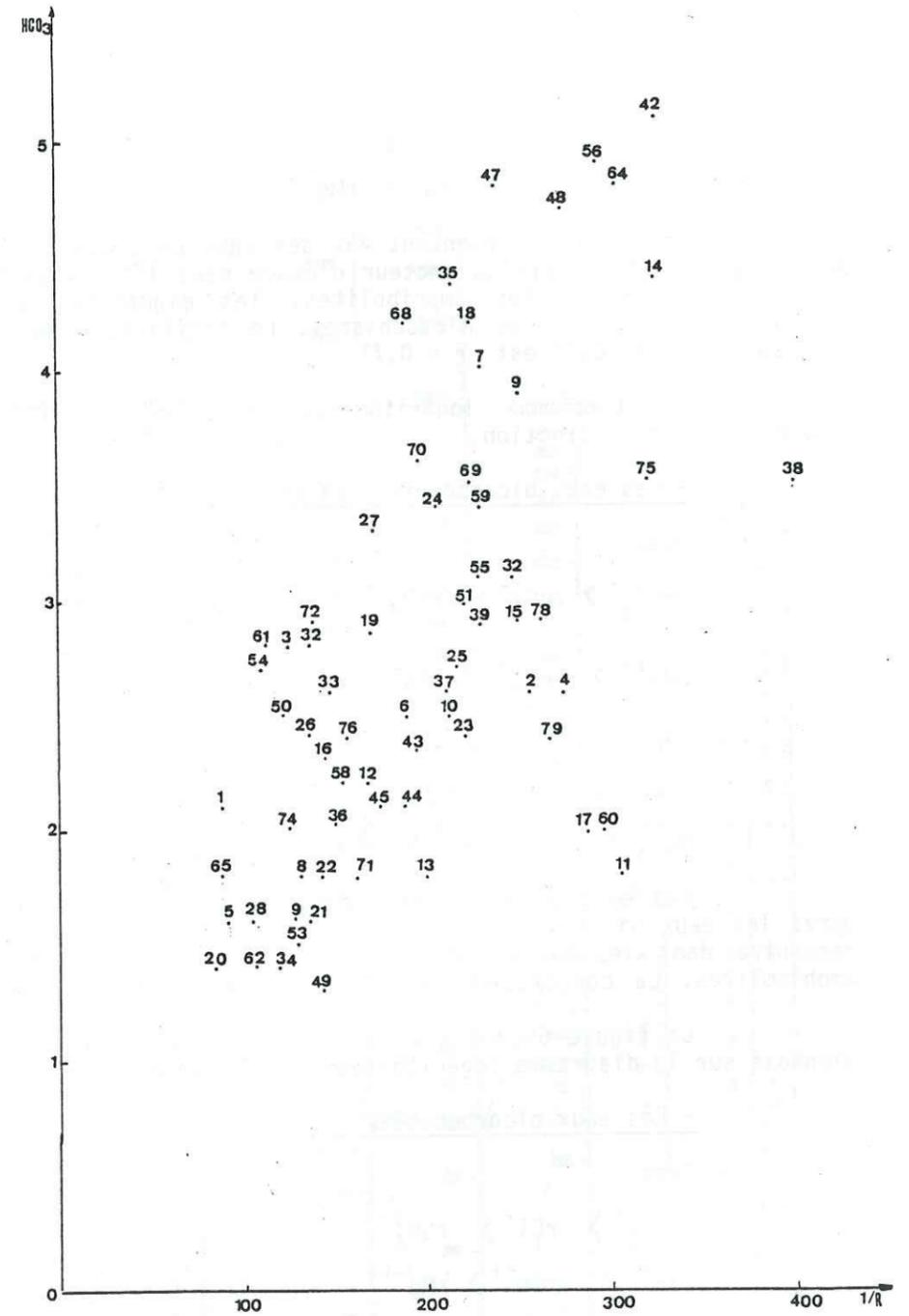
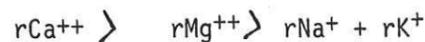
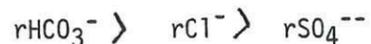


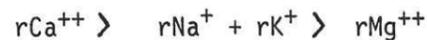
Figure 67: Variation de la conductivité en fonction de la concentration en ion HCO₃⁻

- Les eaux bicarbonatées calciques

Avec



Ou encore

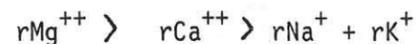
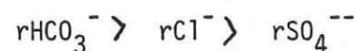


Ces eaux représentent 45% des eaux du secteur d'étude. Elles sont réparties sur l'ensemble du secteur d'étude dans les diverses formations géologiques telles que les amphibolites, les migmatites à pegmatites, les granites, les schistes et micaschistes. Le coefficient de corrélation entre les ions HCO_3^- et Ca^{++} est $r = 0,71$.

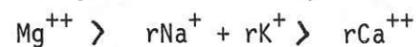
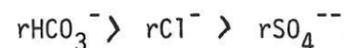
Le diagramme logarithmique de SCHOELLER (fig.68) fait mieux ressortir cette distinction.

- Les eaux bicarbonatées magnésiennes

Avec



Ou

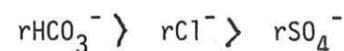


Les eaux bicarbonatées magnésiennes sont relativement fréquentes, après les eaux bicarbonatées calciques avec 35% des eaux de la région. On les rencontre dans les migmatites, les granitogneiss, les granites et dans les amphibolites. La corrélation entre HCO_3^- et Mg^{++} est bonne ($r = 0,77$). La

La figure 69 est une représentation des eaux bicarbonatées magnésiennes sur la diagramme logarithmique de SCHOELLER.

- Les eaux bicarbonatées sodiques

Avec



Ou

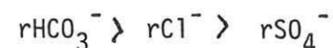


DIAGRAMME LOGARITHMIQUE

(D'après H. Schoeller)

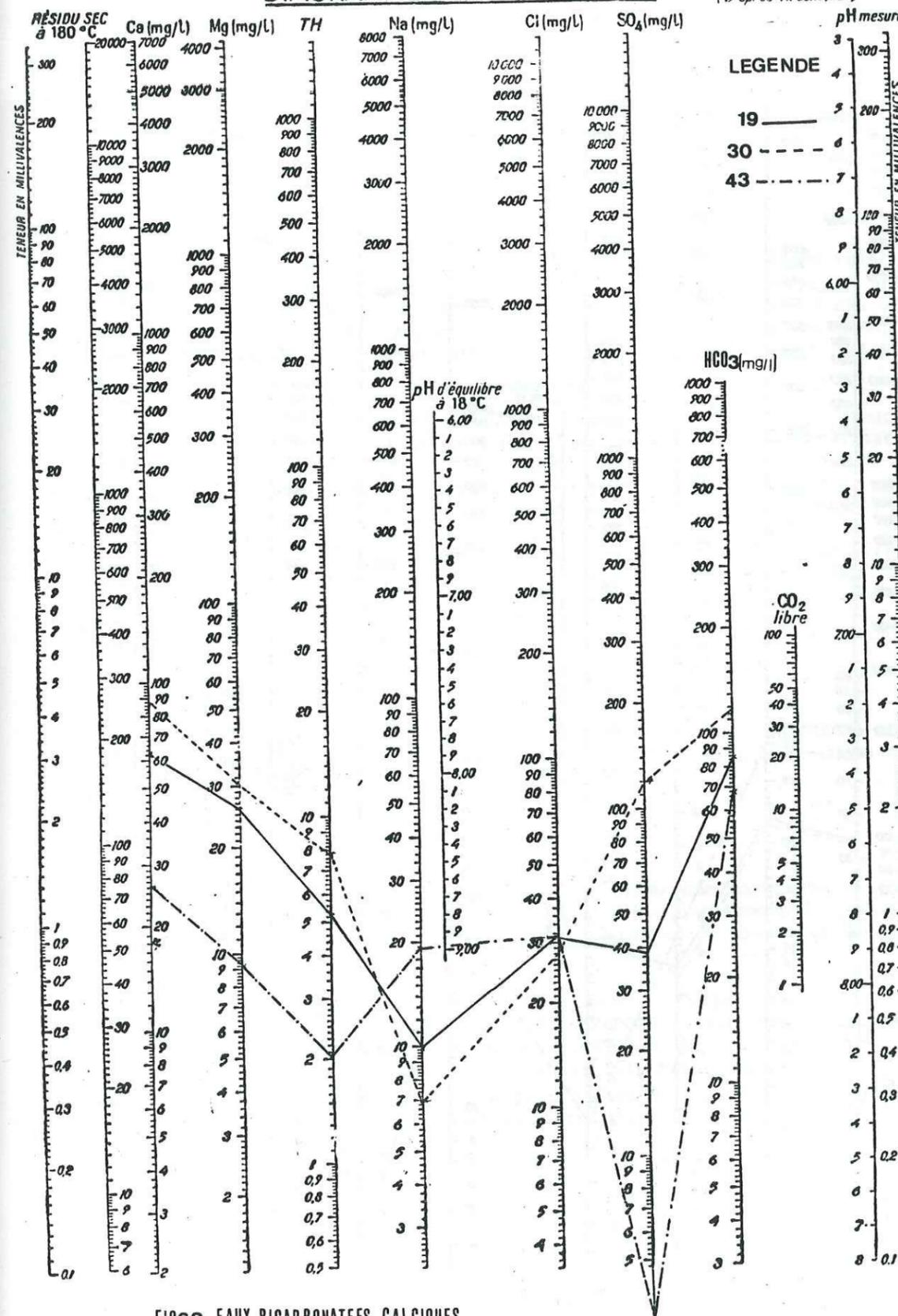


FIG68 EAUX BICARBONATEES CALCIQUES

DIAGRAMME LOGARITHMIQUE

(D'après H. Schoeller)

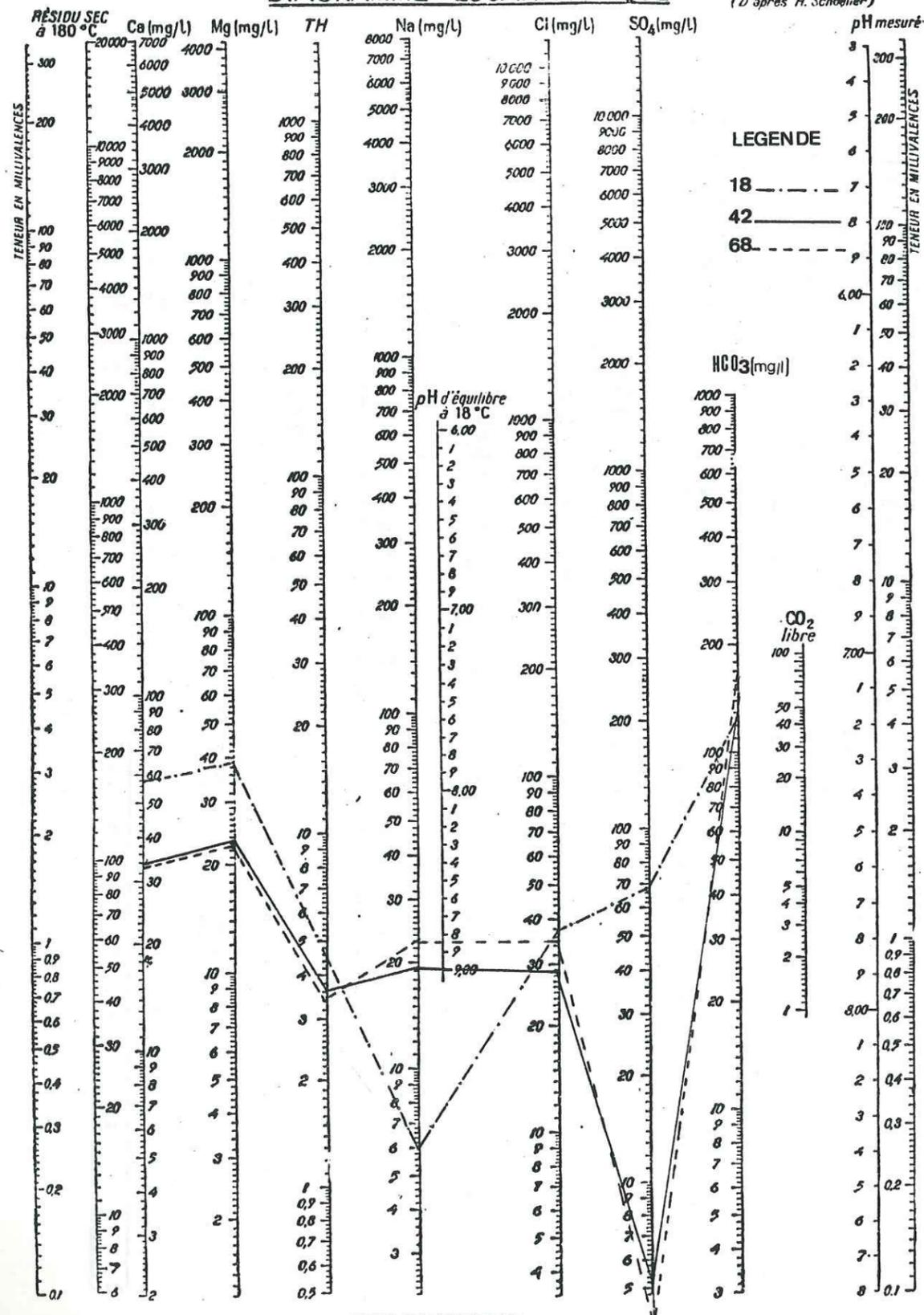


FIG 69 EAUX BICARBONATÉES MAGNÉSIENNES

C'est la famille d'eau la moins répandue avec 20% seulement de l'ensemble des eaux. On rencontre ces eaux surtout au Nord de Manga dans les localités de Béré, Guéré, Gaoko, Imassogo, Passinting, Soanghin et Zamcé. Elle est moins étendue dans la région de Kombissiri.

La figure 70 est une représentation des eaux bicarbonatées sodiques sur le diagramme de SCHOELLER.

Les caractéristiques chimiques des trois types d'eau se distinguent nettement sur le diagramme de PIPER (Fig.71).

6.3 - ORIGINE DES IONS

La diversité chimique des eaux nous amène à penser à une relation entre l'eau et les roches à travers lesquelles elle circule. En effet, si nous considérons le tableau 19, on se rend compte que les échantillons d'eau dont la minéralisation totale est supérieure à 10 méq./l sont issus des granito-gneiss, amphibolites, schistes et micaschistes qui sont les roches les plus minéralisées.

TARDY (1969, KIKIETA (1978), WACKERMANN (1975) et beaucoup d'autres études menées en Afrique de l'Ouest ont montré que la minéralisation des eaux souterraines est liée à la nature lithologique du réservoir. Ces observations se justifient d'ailleurs si nous tenons compte que selon SCHOELLER (1962), les roches traversées par les eaux sont le siège d'une dissolution et attaque des éléments constitutifs: la minéralisation sera d'autant plus importante que la durée du contact eau-roche est longue. Effectivement ces roches schisteuses connaissent une altération argileuse très poussée qui limite la circulation de l'eau en leur sein et au niveau des fissures sous-jacentes.

6.3.1 - Les anions

Les eaux sont caractérisées par leur pauvreté en carbonates et en nitrates qui subsistent seulement en traces dans certains forages comme ceux de Gastega, Toéyoko, Kazanga, Mandié et Toula.

6.3.1.1 - Les bicarbonates

C'est l'anion le plus répandu qui imprime son caractère à toutes les eaux. Il provient de la dissolution du gaz carbonique atmosphérique et sa présence semble guider la mise en solution du calcium et du magnésium dans les eaux.

Les eaux souterraines se caractérisent alors par leur richesse en HCO_3^- par rapport aux eaux de surface (A.N. SAVADOGO, 1984). Cet état de fait traduit un enrichissement des eaux météoriques lors de leur infiltration à travers les altérites. K. FRANCOIS (1975) avait fait remarquer que les concentrations en HCO_3^- diminuaient avec les plus hautes côtes des nappes. Malheureusement nous n'avons pas pu vérifier cette hypothèse dans nos forages.

DIAGRAMME LOGARITHMIQUE

(D'après H. Schoellier)

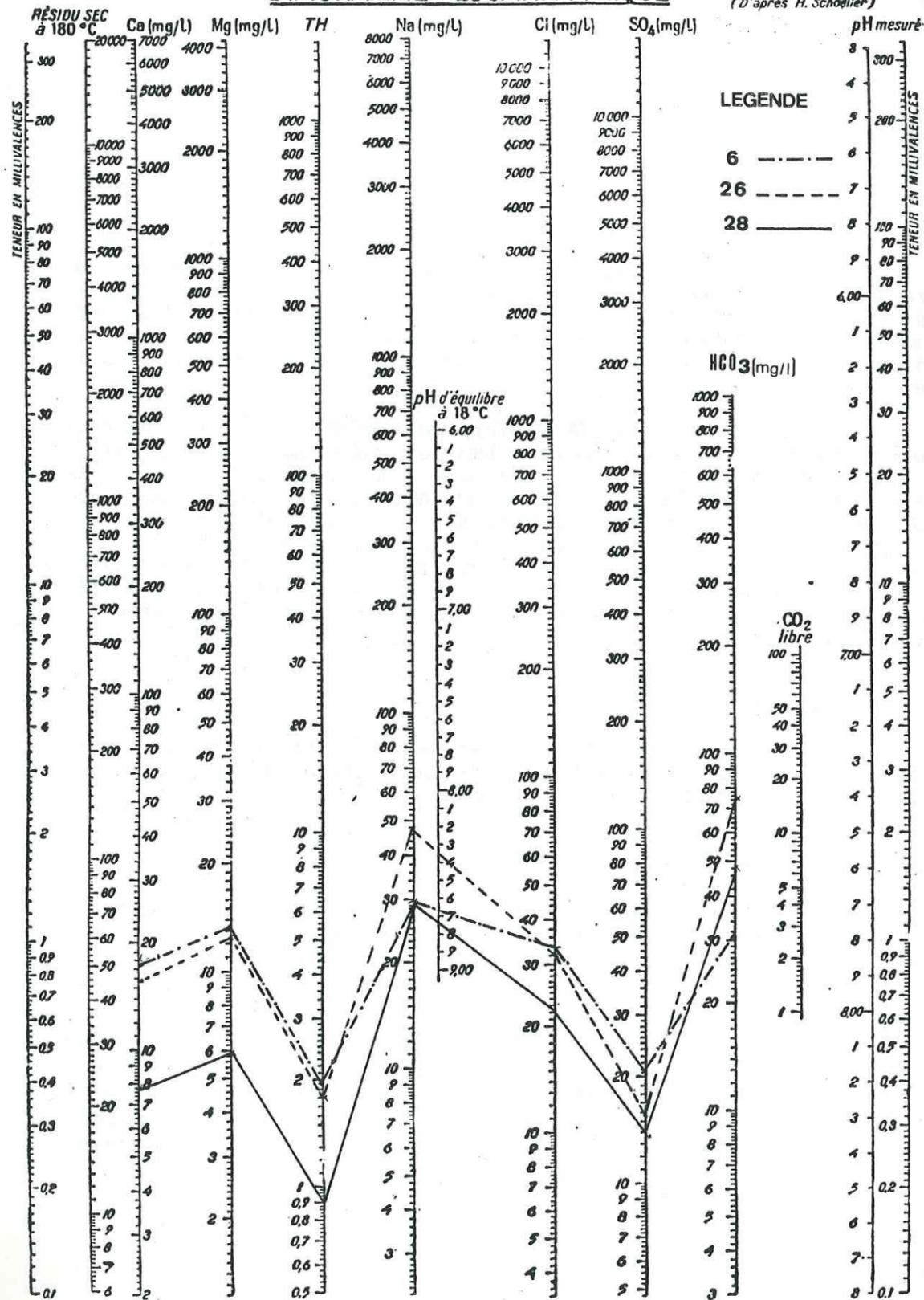


FIG 70 EAUX BICARBONATEES SODIQUES

B.R.G.M.
Hydrogéologie

DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU

Carte PIPER (U.S. Geological Survey)

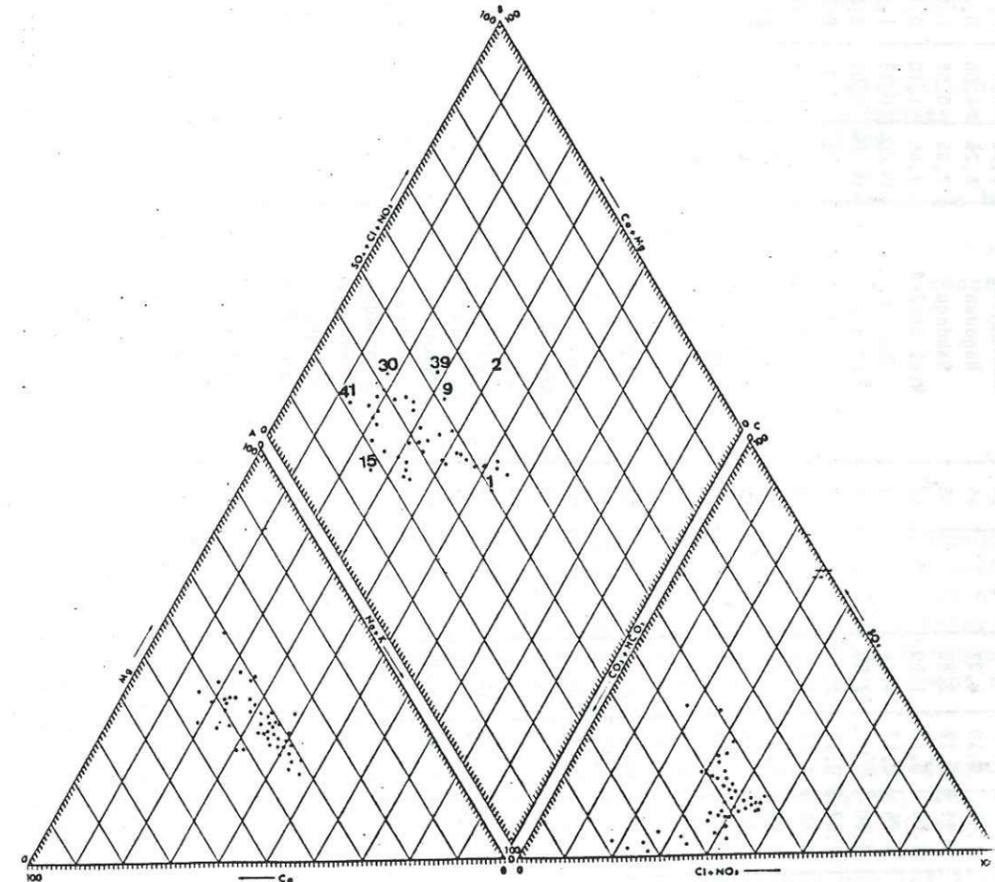


Figure 71: Les eaux du secteur d'étude dans le diagramme de PIPER

No	Localités	Mt	$\frac{rMg^{++}}{rCa^{++}}$	$\frac{rSO_4^{--}}{rCl^-}$	$\frac{rMg^{++}rCl^-}{rCa^{++}rSO_4^{--}}$	No	Localités	Mt	$\frac{rMg^{++}}{rCa^{++}}$	$\frac{rSO_4^{--}}{rCl^-}$	$\frac{rMg^{++}rCl^-}{rCa^{++}rSO_4^{--}}$
1	Bagamssou	5,69	1,16	0,07	1,42	41	Limondé	19,92	0,73	1,8	33
2	Bana	17,33	0,86	4,17	28	42	Mandié	11,94	1,11	0,15	1,56
3	Balonguin	7,06	1,08	0,16	4,21	43	Mabinkisma	6,38	0,57	0,04	1,86
4	Benogo Nabiga	7,4	1,11	0,12	2,82	44	Nagouma	6,26	1,06	0,08	1,7
5	Benogo Silmissi	5	1,06	0,17	1,59	45	Nabdogo	7,35	0,56	0,66	3,34
6	Béré	7,62	1,24	0,47	1,44	46	Nini Nobéré	7,46	1,10	0,14	4,36
7	Borogo	12	0,60	1	7,57	47	Ouda I	14,52	0,73	1,77	7,48
8	Bellegré	5,2	1,07	0,14	1,03	48	Ouda II	14,95	0,55	2,66	14
9	Bingla	7,38	0,55	1,12	3,11	49	Quidi	4,31	1,1	0,06	2,75
10	Boulouguin	7,4	1,24	0,11	0,88	50	Passinkinga	7,07	1,24	0,18	1,14
11	Bounountoré	5,14	1,5	0,11	5,11	51	Rabogtenga	10,62	0,50	2,13	10,10
12	Boussougou	6,02	1,11	0,10	1,69	52	Rakaye Mossi	8,03	1,26	0,08	4,78
13	Bissiga	5,64	1,11	0,06	1,04	53	Samsaongo	5,31	0,72	0,45	3,19
14	Douabié	10,88	1,10	0,11	2,10	54	Sarana	6,63	0,79	0,12	3,19
15	Dassangandé	6,54	1,23	0,11	2,14	55	Sinciné	8,8	0,56	0,31	9,06
16	Douré	5,85	1,1	0,26	1,47	56	Signoguin	11,4	0,79	0,025	1,28
17	Douré	13,22	1,06	1,4	8,06	57	Siditenga	7,29	0,52	0,05	1,99
18	Gago	10,79	0,68	0,9	5,42	58	Siguinvoussi	6,41	0,76	0,06	1,21
19	Gastega	4,4	1,10	0,02	1,65	59	Sinikieré I	11,67	0,63	2,03	9,35
20	Gaongho	5,2	1,35	0,09	1,30	60	Sinikieré II	5,46	1,10	0,08	1,16
21	Guéré	6,75	1,21	0,009	1,40	61	Silimba	7,67	0,91	0,6	18,8
22	Guéré Goguin	6,38	1,15	0,10	2,15	62	Saré	4,92	0,6	0,17	1,86
23	Guidssi	8,75	1,18	0,10	7,64	63	Soanghin	7,92	1,23	0,52	0,92
24	Gogogo	9,55	0,67	1,15	4,95	64	Simbri	12,15	0,92	0,08	3,07
25	Godin	8,39	1,24	0,38	0,72	65	Tandaga	5,44	1,1	0,07	0,68
26	Gaoko	8,99	1,12	0,2	1,43	66	Toebanaga	5,71	0,6	0,21	3,39
27	Gonsé	5,09	1,25	0,43	0,68	67	Toghin	10,56	1,10	0,08	2,71
28	Imassogo	5,48	1,25	0,78	1,06	68	Tinpandogo	18,4	0,81	2,8	10,23
29	Kombo	14,4	0,60	3,12	23	69	Tigré	10,58	0,58	0,4	45
30	Koakin	9,06	0,83	1,17	5,16	70	Toula	5,02	1,10	0,2	1,65
31	Konioudou	7,7	1,93	0,1	1,83	71	Tampouy	8,25	1,10	0,31	1,85
32	Kouigou	7,94	1,24	0,44	1,85	72	Tjira	5,15	1,25	0,14	1,53
33	Koubaga	4,15	1,07	0,21	1,92	73	Wemtinga	5,53	1,24	0,08	1,15
34	Kienbingré	10,43	0,98	0,08	1,53	74	Yakin	10,50	1,31	0,61	4,41
35	Konekongo	6,56	1,53	1,12	1,12	75	Yargo	6,63	1,10	0,08	1,68
36	Kondin	7,38	1,10	0,07	3,6	76	Zinguedouin	22,3	0,8	4,03	14
37	Kierma	11,85	0,44	0,14	1,57	77	Zigla	9,02	1,27	0,52	1,19
38	Kozanga	9,95	0,69	1,31	6	78	Zamcé	12,15	0,92	0,07	3,07
39	Lallé	8,48	1,07	0,11	2,14	79	Zaptenga				
40	Lamzoudo						TOTAUX	640,58			

TABLEAU 19 : RAPPORTS CARACTERISTIQUES

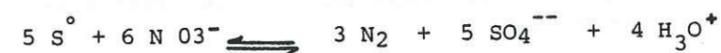
6.3.1.2 - Les sulfates

Les concentrations en SO_4^{--} sont relativement faibles. L'origine possible des ions sulfates dans certains forages comme celui de Sinciné peut être attribuée aux engrais utilisés dans certains périmètres d'exploitation agricole. Ce constat assez isolé ne permet pas de généraliser le phénomène et nous pensons que les sulfates proviendraient surtout du lessivage des horizons contenant de la pyrite que l'infiltration des eaux aurait ensuite introduit dans les nappes. Cette hypothèse paraît plus plausible quand on sait qu'au cours des forations la pyrite est très souvent rencontrée surtout dans les formations birrimiennes.

Enfin, s'il n'y avait pas toujours un bouchon de protection en ciment, au-dessus du massif filtrant de nos forages on aurait pu penser à une éventuelle infiltration d'eau usée comme l'a fait remarquer N. SORO

La production de sulfates en milieu anaérobie par certaines bactéries comme *Thiobacillus denitrificans* n'est pas à négliger.

Cette bactérie produit des sulfates suivant une réaction réversible (BAICHELOR, 1978).



6.3.1.3 - Les chlorures

Il semble que les fortes concentrations en ion Cl^- accompagnent presque toujours les teneurs élevées en magnésium. Dans notre cas, le coefficient de corrélation entre les ions Cl^- et Mg^{++} est faible ($r=0,29$). Il n'y a pas d'eau chlorurée dans notre secteur d'étude. Les concentrations relativement élevées (1 méq./l) de chlorures se rencontrent dans les forages de Bana, Guéré, Lilgomdé, Simbri, Tigré, Zaptenga, implantés respectivement dans les amphibolites, granito-gneiss, schistes et micaschistes.

Leur origine n'est peut-être pas liée à la nature pétrographique des roches qui n'en contiennent pas beaucoup. Selon S. ASOULINE, les eaux chlorurées magnésiennes caractérisent des zones à circulation difficile.

Il est donc possible que les altérites argileuses recouvrant le substratum rendent difficile la circulation d'eau au sein de ces formations entraînant une surconcentration en ions chlorures.

6.3.1.4 - Les nitrates

Ils sont rares. Leur origine peut être attribuée aux engrais ou à la transformation des matières organiques par oxydation ou même à la matière organique contenue dans les schistes. Selon A. MARIOTTI cité par A.N. SAWADOGO il est possible de différencier ces sources en étudiant les variations de teneurs en azote 15.

6.3.2 - Les cations

6.3.2.1 - Le calcium

C'est le cation le plus répandu avec près de 20% de la minéralisation totale. Le rapport rMg/rCa est faible (souvent inférieur à 1). Les plus fortes concentrations de calcium se rencontrent dans les forages de Bana, Kao-Kin, Ligomdé, Tigré situés dans les amphibolites et les micaschistes. L'ion Ca provient de la décomposition des plagioclases des amphibolites et des amphiboles.

6.3.2.2 - Le magnésium

L'ion Mg^{++} représente 17,5 % de la minéralisation totale. Sa teneur croît dans les roches basiques comme les amphibolites et les granito-gneiss.

On peut dire alors qu'il résulte de la décomposition des minéraux ferromagnésiens comme la biotite, les amphiboles et les pyroxènes en proportions remarquables dans ces roches.

6.3.2.3 - Le Sodium et le Potassium

Certes nous n'avons pas pour tous les échantillons des valeurs séparées de Na^+ et K^+ . Pour un certain nombre d'échantillons, les valeurs Na et K ont été déduites de la balance ionique. Mais la dizaine d'échantillons sur lesquels ces ions ont été déterminés séparément permet de constater d'une façon générale que les teneurs en Na^+ sont supérieures à celles de K^+ . On trouve des rapports rNa/rK supérieurs à l'unité dans tous les cas.

La présence de ces alcalins va jouer un rôle déterminant dans la fixation du CO_2 qui intervient dans la modification d'un pH acide à un pH basique. Des études comparées menées dans plusieurs régions du Burkina-Faso et notamment dans le bassin de la Sissili par A. SAWADOGO ont montré que les concentrations en ions Na^+ augmentaient dans les eaux souterraines. Cet état de fait traduit un apport de sodium par les roches à travers lesquelles ces eaux circulent. Les valeurs élevées de Na^+ sont enregistrées à Béré, Guéré, Gaoko, Imassogo et Passintinga dans les migmatites à pegmatites et dans les micaschistes. Il est donc probable que la décomposition des plagioclases (albite) et de la muscovite soit à l'origine du sodium.

Le potassium dérive des orthoclases et des micas potassiques. Sa faible concentration par rapport au sodium pourrait être le résultat de la plus grande stabilité de ces orthoclases et micas potassiques ou de son absorption par les minéraux néoformés au cours du processus d'altération et enfin par les plantes.

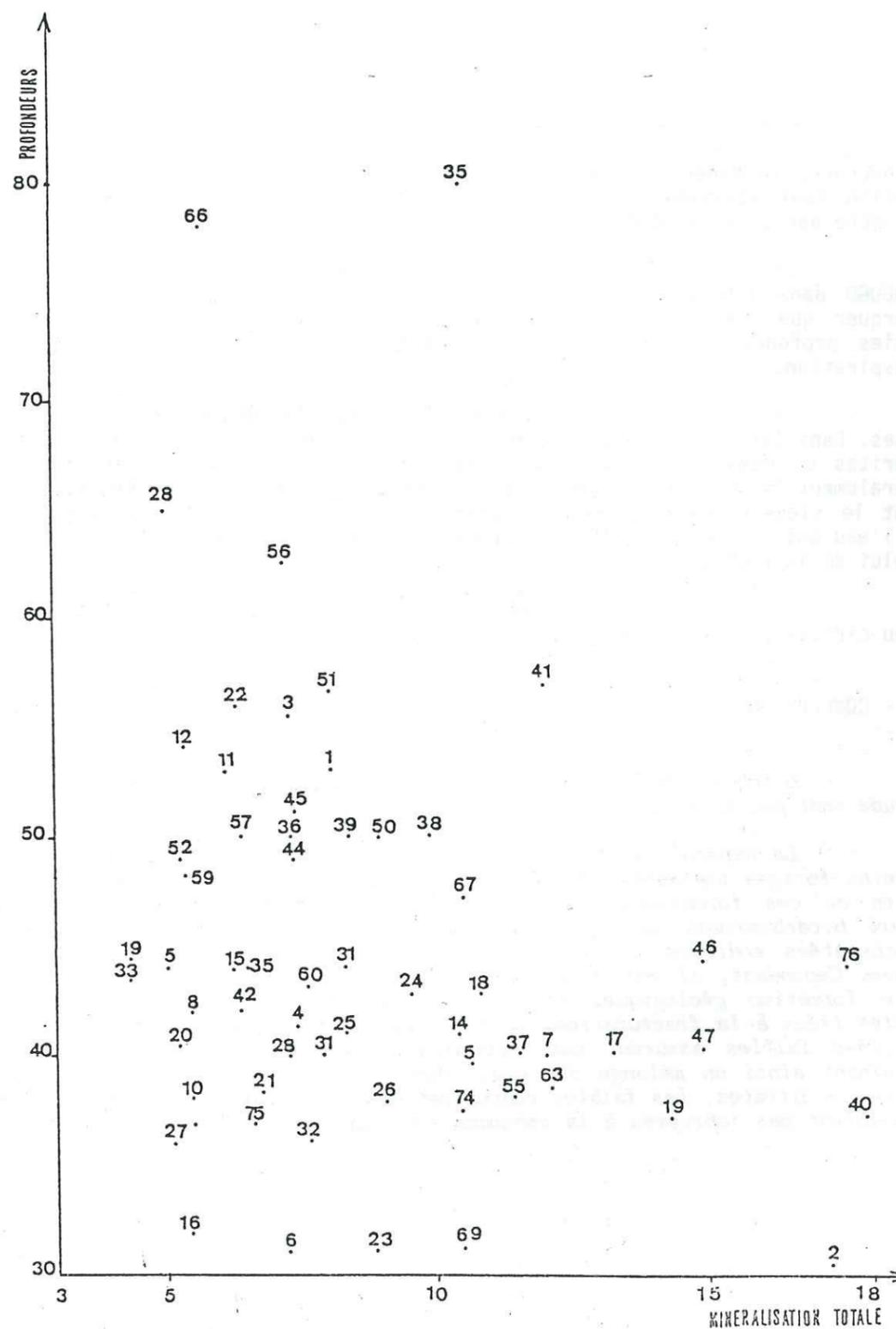


FIG. 72 RELATION ENTRE MINERALISATION ET PROFONDEUR DES OUVRAGES

6.4. - RELATION ENTRE MINERALISATION ET PROFONDEUR

Il existe une relation entre la minéralisation des eaux souterraines et la profondeur des ouvrages. La figure 72 montre que la minéralisation totale est une fonction décroissante de la profondeur. Dans les grandes profondeurs, la minéralisation est faible. Les plus fortes valeurs de minéralisation sont observées dans les 45 premiers mètres. On peut expliquer ce phénomène par deux hypothèses.

La première hypothèse tient compte des observations faites par A. SAWADOGO dans l'Oudalan au Nord du pays. Dans cette région l'auteur fait remarquer que l'eau du toit des nappes est plus minéralisée que celle des parties profondes à cause de la surconcentration superficielle par évapotranspiration.

La deuxième hypothèse est fondée sur le degré d'altération des roches. Dans les forages peu profonds, les nappes ont été rencontrées dans les altérites ou dans la frange intensément fissurée. Les débits obtenus sont généralement bons et expliquent l'arrêt précoce de la foration. Ces horizons étant le siège d'une décomposition profonde des minéraux, on peut comprendre que l'eau qui les baigne soit minéralisée puisque le chimisme de l'eau est lié à celui de la roche.

En profondeur, les roches sont très peu altérées et d'autre part l'eau circule plus rapidement que dans les formations susjacentes.

6.5 - CONCLUSION

L'analyse hydrochimique permet de conclure que les eaux du secteur d'étude sont peu minéralisées.

La minéralisation relativement élevée constatée dans les eaux de certains forages implantés dans les roches basiques fait penser à une contribution de ces formations géologiques à cette minéralisation. La présence d'eaux bicarbonatées calciques, d'eaux bicarbonatées magnésiennes, d'eaux bicarbonatées sodiques, est donc liée à la diversité des formations géologiques. Cependant, il est difficile de rattacher rigoureusement telle eau à telle formation géologique, car nous avons évoqué l'existence de nappes locales liées à la fracturation. Il est donc possible que ces drains que sont certaines failles assurent une communication entre les différentes nappes entraînant ainsi un mélange des eaux. Dans tous les cas, l'absence presque totale de nitrates, les faibles concentrations en sulfates font que ces eaux ne semblent pas impropres à la consommation humaine et cela est réconfortant.

CONCLUSIONS GENERALES

CONCLUSIONS GENERALES

Situé au Sud de Ouagadougou entre le Nazino et le Nakambé, le secteur d'étude présente un relief plat à altitude variable entre 250 et 320 mètres.

Il est marqué çà et là par des pointements de collines à sommet latéritique. A travers ce plateau, se dessine un réseau hydrographique variable en densité d'une zone à l'autre qui traduit déjà l'hétérogénéité pétrographique du terrain. Les nombreux cours d'eau temporaires qui prennent naissance sur les plateaux du centre sont des affluents du Nazino et du Nakambé.

Le climat, de type soudanéen est caractérisé par deux saisons (sèche et pluvieuse) au cours desquelles la température varie entre 24° et 28°.

La moyenne annuelle des précipitations atteint 912 mm dont 4% seulement participent à la recharge des nappes. Sur le plan géologique, les grands ensembles pétrographiques sont essentiellement les granites, les migmatites, les séries métamorphiques et les roches éruptives basiques.

L'altération des différents faciès varie dans l'espace et va guider l'infiltration et le stockage de l'eau. Ces formations sont liées aux cycles éburnéen, birrimien et peut-être libérien pour les migmatites et les granitogneiss.

C'est sur ce bâti cristallin que s'est mis en place un réseau complexe de fracturation dans lequel se distinguent des fractures ouvertes et des fractures fermées.

L'ouverture des fractures en profondeur est liée à leur extension latérale: plus elles sont longues, plus l'altération des zones qu'elles affectent est profonde, donc susceptible de jouer un rôle aquifère important. En moyenne, les venues d'eau sont fréquentes dans les cinquantes premiers mètres. Mais au-delà certaines fractures sont toujours ouvertes. C'est ainsi qu'à Douré (près de Doulougou), le forage profond de 80 m n'a pas atteint la roche saine. Les venues d'eau respectivement à 78 m et 74 m à Toghin et à Konékongo confirment cette hypothèse.

Les nappes du secteur d'étude ne sont pas continues mais se localisent préférentiellement le long des failles. Si elles sont libres au centre et à l'Ouest, elles paraissent bien en charge à l'Est dans les régions de Konékongo et de Mandié. Dans ces régions, des venues d'eau importantes et brutales sont captées sous les altérites argileuses, sèches et épaisses.

La localisation des zones aquifères en pays cristallin est difficile et nécessite l'utilisation coordonnée de plusieurs méthodes dont les photographies aériennes et la prospection géophysique.

La productivité des ouvrages implantés varie selon les faciès géologiques. Ainsi l'étude statistique menée à l'échelle régionale nous a permis de hiérarchiser les formations géologiques suivant leur capacité aquifère.

Ce sont essentiellement:

- les filons de quartz et de pegmatite
- les migmatites hétérogènes et les granites porphyroïdes
- les amphibolites
- les schistes
- les granites homogènes.

Cette productivité n'est pas liée à la profondeur, mais aux conditions hydrogéologiques.

Les essais de pompage pratiqués dans les ouvrages selon la méthode de THEIS et JACOB ont permis de déterminer leurs caractéristiques hydrodynamiques.

L'étude de la chimie des eaux a révélé la présence de trois types d'eau dans la région:

- les eaux bicarbonatées calciques;
- les eaux bicarbonatées magnésiennes;
- les eaux bicarbonatées sodiques.

Ces eaux très peu minéralisées, avec un chimisme lié à celui des roches à travers lesquelles elles circulent ne semblent pas présenter un danger à la consommation humaine et végétale.

A cet effet, nous faisons remarquer, bien que cela ne soit pas l'objectif principal de l'hydraulique villageoise, que certains forages atteignent des débits considérables. Ce sont ceux de Samsaongo, Guidssi, Nabinkisma (qui ont l'avantage d'être voisins), Rabogtenga, Sarogo et beaucoup d'autres encore.

En estimant que l'autosuffisance alimentaire est l'un des critères du développement et que les débits de 1 m³/h suffisent pour l'instant à chaque village, il serait souhaitable de mener une politique d'utilisation rationnelle de l'eau en pratiquant autour de ces forages très productifs la culture maraîchère par petite irrigation comme c'est le cas au Niger, d'autant que certains de ces forages sont situés à proximité des bas-fonds. Enfin, nous avons essayé dans ce mémoire d'apporter notre modeste contribution à la résolution du problème d'eau qui se pose avec acuité dans notre pays. Mais beaucoup reste à faire et nous osons espérer en regardant l'avenir avec optimisme, que des moyens plus substantiels et des techniques nouvelles viendront transformer le rêve d'une vie heureuse des populations burkinabès en une réalité.

BIBLIOGRAPHIE

- ABUSADA H. (1980).- Quelques problèmes de gisement et d'exploitation des eaux souterraines en zone aride - Koweit (Arabie Nord-Est). Thèse de 3e cycle USTMG, 1980.
- ANDRENI J.C., BOURGUET L. (1984).- Les barrages souterrains: conditions d'application au Sahel. Bulletin B.R.G.M.-Série hydrogéologie n°4 - 1984, p. 393-399
- Annuaire hydrologique du Burkina-Faso (1980).- DHER-Ouagadougou (service de l'hydrologie - Inédit 1980).
- ARCHANBAULT J. (1965).- Données hydrogéologiques de base pour l'équipement des cercles de Léo et Zabré. Aperçu statistique des résultats de l'inventaire des points d'eau. BURGEAP 397. 1
- ARMAND Cl. et DELAQUAIZE B. (1977).- Analyse physico-chimique des eaux - Mémento pratique. Laboratoire d'hydrogéologie USTMG - 1977.
- ARMAND Cl., KOUATE L., SOURISSEAU B. (1985).- Hydraulique villageoise dans la région centrale de Burkina-Faso. Programme CEAO-OCCE principaux résultats et leur valorisation. Bulletin B.R.G.M. - Série hydrogéologie n°3, 1985. Page 203-207.
- ASTIER J.L. (1971).- Géophysique appliquée à l'hydrogéologie. Edition Masson et Cie. Paris 1971.
- ASTIER J.L., SAWADOGO N.A., QUEDRAOGO S. (1983).- Intérêt hydrogéologique des cartes aéromagnétiques dans les régions cristallines et métamorphiques. Bulletin du BRGM, n°1 1983.
- BASSOT J.P. (1986).- Le protérozoïque de l'Afrique de l'Ouest. Journée scientifique 1986/10.
- BERGER G., MAZENC B., GARIN H. et AYARGA K. (1984).- Evolution de la minéralisation des eaux des nappes libres et captives de 1947 à 1983 (Seine et Marne). Bulletin B.R.G.M. n°4, p. 343-354 (1984).
- BERNET G., CHENET J. (1984).- Renforcement de l'alimentation en eau potable des quartiers de la périphérie de Niamey et sa valorisation par la petite irrigation. Bulletin B.R.G.M. n°3, 1984. Série hydrogéologie. Pages 209-212.
- BESSELES B. (1978).- Géologie de l'Afrique. Le craton ouest africain. Mémoire du BRGM, n°88, 1978.
- BESSELES B. et TROMPETTE R. (1980).- Géologie de l'Afrique. La chaîne panafricaine "zone mobile d'Afrique centrale" (Partie sud et zone mobile soudanaise. Mémoire du B.R.G.M., n°2, 1980).
- BIZE L., BOURGUET L. et LEMOINE J. (1972).- Alimentation artificielle des nappes souterraines. Ed. Masson et Cie. Paris, 1972.
- CASTANY G. (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. DUNOD-Université 1982.
- CA.TE.E.S. (1983).- Compte-rendu de la 5e conférence africaine des techniques d'exploitation des eaux souterraines. 6/8 octobre 1983 (C.I.E.H.).
- C.E.F.I.G.R.E. (1984).- Synthèse des connaissances sur l'hydrogéologie du socle cristallin et cristallophyllien et sédimentaire ancien de l'Afrique de l'Ouest. CEFIGRE, 1984.
- C.I.E.H. (1978).- Méthodes d'études et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Bulletin de liaison (1978).
- C.I.E.H. (1982).- Essais de débit simplifié sur puits. Série hydrogéologie. BURGEAP (1982).
- C.I.F.E.G. (1986).- Les formations birrimiennes en Afrique. C.I.F.E.G. Journée scientifique 1986.
- CRUCHET M. (1983).- Relation entre l'hydrogéologie, le thermalisme et les circulations d'eaux uranifères dans les roches fissurées: les massifs cristallins de Basse-Maurienne (Savoie). Thèse de 3e cycle, USTMG 1983.
- Direction générale des mines (1963).- Etude hydrogéologique des cercles de Pô, Manga, Koupéla. Alimentation en eau de la ville de Pô. Micodin (1963).
- DJEUDA H. (1987).- Géologie et hydrogéologie d'un secteur de la zone mobile d'Afrique centrale: région de Poli, Nord-Cameroun. Thèse de Doctorat de l'USTMG, 1987.
- DUCELLIER J. (1963).- Contribution à l'étude des formations cristallines et métamorphiques du Centre et du Nord de la Haute-Volta. Mémoire 341b du BRGM n°10, 1963.
- FABRE R., MATHEIS G. et UTKE A.W. (1987).- Caractérisation géochimique du magmatisme birrimien dans le centre de la Côte d'Ivoire. Current research in African Earth - Sciences. Ed. G. MATHEIS et H. SCHANDELMEIR, 1987, p.21-24.

- FRANCISS O.F. (1970).- Contribution à l'étude des mouvements de l'eau à travers les milieux fissurés. Thèse de Docteur Ingénieur USTMG, 1970.
- GONZALEZ-LAREZ H. (1982).- Hydrogéologie des formations fissurées et karstifiées de la région orientale du Vénézuéla. Thèse de 3e cycle USTMG, 1982.
- GRINGARTEN A.C. (1982).- Flow-test evaluation of fractured reservoirs. Geological society of America special paper 189 - 1982.
- HACCARD D. (1983).- Analyse structurale du gisement de Kwademen. Rapport inédit. BUMIGEB (Ouagadougou). 30 p.
- HOTTIN G. et OUEDRAOGO O.F. (1975).- Notice explicative de la carte géologique à 1/100.000 de la république de Haute-Volta. Mémoire B.R.G.M., 1975.
- KABORE F. (1975).- Contribution à l'étude hydrogéologique et la mise en exploitation des ressources hydrauliques de la région du Centre-Est de Haute-Volta. Thèse de 3e cycle USTL.
- LANDREAU A., MARIOTTI A. (1986).- Etude de transfert de l'évolution des nitrates dans les aquifères au moyen du traçage isotopique nature ^{15}N . Bulletin B.R.G.M. n°1, 1986 Série hydrogéologie p.77-86.
- MASSONAT G. (1981).- Hydrogéologie en milieu fissuré et thermalisme: Etude du massif de Bramefarine et du Nord du Massif d'Allevard (Isère-France). Thèse de 3e cycle USMGI, 1981.
- MATTAUER M. (1973).- Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre. Ed. Hermann - Paris, 1973.
- NAO C. (1987).- Méthodes d'analyses physico-chimique des eaux naturelles. Inédit BUMIGEB-Ouagadougou, 1987 - 11 p.
- NEDELEC A. NSIFAE (1987).- Le complexe du Niem (Sud-Cameroun) une série tonalito-trondjémite archéenne typique. Current research in African earth sciences (MATHEIS and SCHANDELMEIER ed.) 1987, p.3-6.
- SAWADOGO N.A., SARROT-REYNAULD J. (1981).- Apport des analyses chimiques et isotopiques à la connaissance du mode de recharge des nappes en Haute-Volta. C.R. 106e Congrès National des Sociétés Savantes Perpignan-Sc. Fasc.III.
- SAWADOGO N.A. (1984).- Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta. Etude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles - USMGI, 1984.
- SCHOELLER H. (1962).- Les eaux souterraines. 1ère partie. Ed. Masson et Cie 1962.
- SORO N. (1987).- Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Bassin versant de la Mé. Thèse de 3e cycle USTMG, 1987.
- TAGINI B., GOBERT M., CASANOVA R. (1972).- Brève histoire géologique de la Côte d'Ivoire. SODEMI Abidjan, 1972.
- TELFORD W.M., GELDART L.P., SHERIFF R.E. (1976).- La prospection géophysique. Tome III. ERG Edition. La Barbannerie, 1976.
- TESSIER J. (1974).- Aménagement des vallées des Voltas. Etude morpho-pédologique des blocs expérimentaux de Mogtédou - Kaïbo, Bane, Tiébélé. IRAT (RG), 1974.
- TEMPIER P. (1986).- Le Burkinien cycle orogénique majeur du protérozoïque inférieur en A.O.F. - Département de Géologie et minéralogie. Université de Clermont-Ferrand II, 1986.
- THIERY D. VANDENBEUSCH J., VAUBOURG P. (1982).- Interprétation des pompages d'essai en milieu fissuré aquifère. Rapport B.R.G.M. 82 SGN 920 Eau.
- TRINQUART R. (1971).- Notice explicative de la carte géologique au 1/200.000 de Tenkodogo. Mémoire du B.R.G.M. 1971.
- VIDAL M. et ALRIC G. (1986).- Une tectonique de coulissement et un volcanisme tholéitique spécifiques du cycle éburnéen de Haute Comoé (Côte d'Ivoire). Current research in African earth sciences.
- YANEOGO D. (1984).- Hydrogéologie des roches fissurées. D.E.A. USTMG, 1984

LISTE DES FIGURES

Chapitre I et Chapitre II

- Figure 1 - Position géographique du Burkina-Faso en Afrique de l'Ouest 6
- Figure 2 - Carte physique du Burkina-Faso 7
- Figure 3 - Réseau hydrographique du Burkina-Faso 7
- Figure 4 - Ensemble schématique de l'Ouest africain 9
- Figure 5 - Carte géologique des formations précambriennes et paléozoïques du Sénégal oriental
Contexte géologique de la série de Mako 11
- Figure 6 - Esquisse géologique du Burkina-Faso 13
- Figure 7 - Organisation structurale du géosynclinal éburnéen par B. TAGINI, 1971 14
- Figure 8 - Situation géographique du secteur d'étude 20
- Figure 9 - Carte du réseau hydrographique du secteur d'étude 22
- Figure 10 - Différents types de réseau hydrographique 24
- Figure 11 - Isohyètes moyennes du Burkina-Faso 26
- Figure 12 - Représentation graphique des précipitations 28
- Figure 13 - Isohyètes de 1961 à 1980 - variation de la pluviométrie dans le temps 29
- Figure 14 - Courbe de tarage de la Volta rouge à Nobéré 31
- Figure 15 - Fluctuation des nappes avec la pluviométrie / 37
- Figure 16 - Esquisse géologique du secteur d'étude 39
- Figure 17 - Profil géologique des terrains du secteur 46

Chapitre III

- Figure 18 - Carte de fracturation 54
- Figure 19 - Distribution fréquentielle des directions de linéaments dans le secteur de Bindé-Gaoko 55
- Figure 20 - Distribution fréquentielle des directions de linéaments dans le secteur de Touzou-Zangogo 57
- Figure 21 - Distribution fréquentielle des directions de linéaments dans le secteur de Béré 58
- Figure 22 - Distribution fréquentielle des directions de linéaments dans le secteur de Lilgomdé 59
- Figure 23 - Distribution fréquentielle des directions de linéaments dans le secteur de Boussougou-Nabinkisma 60
- Figure 24 - Distribution fréquentielle des directions de linéaments dans les différents secteurs 61
- Figure 25 - Répartition fréquentielle des longueurs de linéaments par classe de direction 62
- Figure 26 A - Distribution fréquentielle des directions des fractures à l'affleurement (centre de la zone) 62
- Figure 26 B - Distribution fréquentielle des directions de fracture à l'affleurement (nord de la zone) 62
- Figure 27 - Distribution des directions de filons de quartz 63
- Figure 28 - Distribution des directions de foliation 63
- Figure 29 A et B - Structures planaires d'une zone de cisaillement 68

Chapitre IV

- Figure 30 - Implantation photogéologique des forages de Samsaongo, Nabinkisma et Baogtenda 77
- Figure 31 - Implantation géologique du forage de Lilgomdé 78
- Figure 32 - Prospection électromagnétique: schémas de principe et profils obtenus avec bobines horizontales 82
- Figure 33 - Comparaison entre profils de résistivités et profils électromagnétiques 83
- Figure 34 - Profil de trainé électrique sur le site du forage de Nabinkisma 85
- Figure 35 - Profil de trainé électrique sur le site du forage de Lilgomdé 86
- Figure 36 - Profil de trainé électrique sur le site du forage de Rakaye Mossi 87
- Figure 37 - Courbe de sondage électrique du forage de Rakaye Mossi 89
- Figure 38 - Courbe de sondage électrique du forage de Lamzondo 90
- Figure 39 - Courbe de sondage électrique du forage de Sarana 91
- Figure 40 - Effet des paliers sur les courbes de sondages électriques 92
- Figure 41 - Courbe de sondage électrique du forage de Sinciné 93
- Figure 42 - Courbe de sondage électrique du forage de Robogtenga 94
- Figure 43 - Courbe de sondage électrique du forage de Parouré 95

Figure 44 -	Evaluation des épaisseurs des terrains par la méthode des asymptotes	96
Figure 45 -	Dispositif carré pluridirectionnel	98
Figure 46 -	Nappe d'alluvions à Bindé	100
Figure 47 -	Nappe de cuirasse noyée de Bingla	102
Figure 48 -	Variation des débits avec l'épaisseur d'altération	106
Figure 49 -	Fréquences des venues d'eau à Tiébélé	106
Figure 50 -	Fréquences des venues d'eau à Manga	107
Figure 51 -	Fréquences des venues d'eau à Kombissiri	107
Figure 52 a -	Fréquences des débits de forages à Tiébélé	109
Figure 52 b -	Fréquences des débits des forages de Manga	109
Figure 53 -	Fréquences des débits des forages de Kombissiri	109
Figure 54 -	Variation des débits en fonction des profondeurs (Tiébélé)	109
Figure 55 -	Variation des débits en fonction des profondeurs (Manga)	110
Figure 56 -	Variation des débits en fonction des profondeurs (Kombissiri)	110
Figure 57 -	Equipement technique du forage de Douré	113
Figure 58 -	Carte piézométrique du secteur Manga-Kombissiri	115
Figure 59 -	COurbes des fluctuations des forages de Guéré, Signoguin et Signinvoussé	116
Chapitre V		
Figure 60 -	Courbe de descente du forage de Sinciné	125
Figure 61 -	Courbe de remontée du forage de Sinciné	126
Figure 62 -	Courbe de descente du forage de Samsaongo	127
Figure 63 -	Courbe de remontée du forage de Samsaongo	128
Figure 64 -	Courbe de descente du forage de Rabogtenga	129
Figure 65 -	Courbe de remontée du forage de Rabogtenga	130
Chapitre VI		
Figure 66 -	Variation de la conductivité en fonction de la minéralisation totale	140
Figure 67 -	Variation de la conductivité en fonction de la concentration en ions bicarbonatés ...	141
Figure 68 -	Eaux bicarbonatées calciques	143
Figure 69 -	Eaux bicarbonatées magnésiennes	144
Figure 70 -	Eaux bicarbonatées sodiques	146
Figure 71 -	Diagramme de Piper	147
Figure 72 -	Relation entre minéralisation totale et profondeur	151

Liste des tableaux

Tableau 1 -	Valeurs moyennes des températures maximales 1976-1985	23
Tableau 2 -	Valeurs moyennes de l'humidité relative	25
Tableau 3 -	Précipitations dans le secteur d'étude (1976-1985)	25
Tableau 4 -	Valeur moyenne de l'insolation entre 1971 et 1985	27
Tableau 5 -	Tableau de jaugeage au Pont de Nobéré	27
Tableau 6 -	Valeurs des débits journaliers en 1984	30
Tableau 7 -	Calcul de l'ETP par la formule de L. TURC	33
Tableau 8 -	Bilan moyen annuel: période 1976-1985	35
Tableau 9 -	ETR par les méthodes de Coutagne, Turc et Thornthwaite	35
Tableau 10 -	Bilan hydrologique	36
Tableau 11 -	Epaisseurs d'altérites et débit des forages	48
Tableau 12 -	Relation entre réseau hydrographique et épaisseur des altérites	50
Tableau 13 -	Chronologie des phases tectoniques	69
Tableau 14 -	Productivité des ouvrages en fonction des directions des linéaments	70
Tableau 15 -	Nature géologique des roches liées aux venues d'eau	104
Tableau 16 -	Caractéristiques des ouvrages	131
Tableau 17 -	Caractéristiques chimiques des eaux	136
Tableau 18 -	Etude statistique des échantillons d'eau	138
Tableau 19 -	Rapports caractéristiques de la chimie des eaux	148

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
TRAVAUX ANTERIEURS	2
PREMIERE PARTIE - BREF APERCU SUR LA GEOGRAPHIE ET SUR LA GEOLOGIE DU BURKINA FASO.....	5
1- Aperçu géographique	5
1.1- Position géographique du Burkina-Faso en Afrique de l'Ouest	5
1.2- Relief.....	5
1.3- Hydrographie.....	5
1.4- Climat	8
2- Aperçu géologique	8
2.1- La dorsale Reguibat.....	8
2.2- Les fenêtres de Kayes et de Kéniéba	10
2.3- La dorsale de Man (Léo)	12
2.4- Les formations éburnéennes du Burkina-Faso	12
2.4.1- Les gneiss à biotite	15
2.4.2- Les migmatites	15
2.4.3- Les granites calco-alcalins	15
3- Tectonique	15
DEUXIEME PARTIE - POSITION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU SECTEUR D'ETUDE	
1- Position géographique	19
1.1- Relief	19
1.2- Voies d'accès	21
1.3- Réseau hydrographique	23
1.4- Le climat	23
1.4.1- Détermination des termes du bilan hydrologique	23
1.4.2- LA température	23
1.4.3- L'humidité relative	25
1.4.4- Les précipitations	27
1.4.5- L'insolation	27
1.4.6- Le ruissellement	32
1.4.7- L'évapotranspiration	32
1.4.7.1- Détermination de l'E.T.P.....	33
1.4.7.2- Détermination de l'E.T.R.....	33
2- Géologie du secteur d'étude	36
2.1- Les granites et migmatites	38
2.1.1- Les granites hétérogènes.....	38
2.1.2- Le granite homogène à biotite	40
2.1.3- Le granite porphyroïde.....	40
2.1.4- Granites à deux micas	40
2.2- Les migmatites	41
2.2.1- Les migmatites hétérogènes	41
2.2.2- Les migmatites homogènes à biotite	41
2.3- Les séries particulières	42
2.3.1- La série de Timboué.....	42
2.3.2- Les séries métamorphiques	42
2.3.3- La série de Lilgomdé (Kaïbo)	42
2.4- Les amphibolites	43
2.5- Les schistes graphiteux	43
2.6- Age des différentes formations.....	43
2.7- Ressources minérales	43
2.8- Les formations d'altération	43

2.8.1-	Les cuirasses latéritiques	44
2.8.2-	Altération des schistes birrimiens	44
2.8.3-	Altération des granito-gneiss.....	44
2.8.4-	Altération des migmatites.....	44
2.9-	Processus d'altération et produits.....	44
2.9.1-	Processus d'altération	44
2.9.2-	La composition minéralogique des roches	45
2.9.4-	Le climat.....	45
2.9.5-	Les produits d'altération	45
2.9.6-	Capacité aquifère des altérites.....	47
2.9.6.1-	Particularité des filons de quartz et de pegmatite.....	49
2.9.6.2-	Epaisseur des altérites	49
2.9.6.3-	Les alluvions sablo-gravillonnaires.....	49
2.9.6.4-	Réseau hydrographique et géologie.....	49
TROISIEME PARTIE - Etude de la fracturation		
3.1-	La photointerprétation	53
3.1.1-	Extension des fractures.....	56
3.2-	Mesures sur les affleurements	64
3.2.1-	Les microfractures.....	64
3.2.2-	Les filons de quartz.....	64
3.2.3-	La foliation.....	65
3.2.4-	Conclusion sur les différents diagrammes	65
3.3-	Conditions d'apparition des fractures	68
3.3.1-	Etudes des données de terrain (foliation).....	67
3.3.2-	Comportement hydraulique des différentes fractures.....	69
3.3.3-	Résultats obtenus	69
3.3.4-	Conclusion sur l'étude de la fracturation	69
QUATRIEME PARTIE - METHODES D'IMPLANTATION DES OUVRAGES.....		
4-	Méthodes d'implantation des ouvrages	75
4.1-	Les méthodes directes.....	75
4.1.1-	La photogéologie.....	75
4.1.2-	La géologie.....	76
4.1.3-	La géomorphologie	78
4.1.4-	Les indices biologiques	78
4.1.4.1-	Les termitières épigées.....	79
4.1.4.2-	Les végétaux hydrophiles	79
4.2-	Les méthodes indirectes.....	80
4.2.1-	La prospection géophysique	80
4.2.1.1-	La méthode sismique.....	80
4.2.1.2-	Les méthodes électromagnétiques.....	81
4.2.1.3-	La prospection électrique.....	84
4.2.1.4-	Résultats obtenus par la méthode électrique.....	85
4.3-	Les différents types de nappes	99
4.3.1-	Les réservoirs supérieurs.....	99
4.3.1.1-	Les nappes d'alluvions.....	99
4.3.1.2-	Les nappes de cuirasse noyée.....	101
4.3.2-	Les réservoirs inférieurs	102
4.4-	Facteurs de productivité des nappes profondes.....	103
4.4.1-	Productivité des ouvrages en fonction de l'épaisseur d'altération	105
4.4.2-	Statistiques sur les ouvrages de captage du secteur d'étude	105
4.4.2.1-	Les venues d'eau dans les roches fissurées.....	105
4.4.2.2-	Les débits des ouvrages de captage.....	108
4.4.3-	Profondeur maximale des ouvrages de captage.....	108
	Conclusion	108

4.5-	Exécution et équipement technique des forages.....	112
4.5.1-	Exécution des forages d'eau.....	112
4.5.2-	L'équipement technique des forages.....	113
4.6-	Etude piézométrique	114
4.6.1-	La carte piézométrique	114
4.6.2-	Fluctuation des niveaux piézométriques.....	117
	Conclusion	117
CINQUIEME PARTIE - LES ESSAIS DE POMPAGE		
5.1-	Interprétation des essais de pompage	121
5.2-	Expression des résultats	124
	Conclusion	132
SIXIEME PARTIE - LA CHIMIE DES EAUX		
Introduction		
		135
6.1-	Caractéristiques physico-chimique des eaux.....	135
6.1.1-	Caractéristiques physiques	135
6.1.2-	Caractéristiques chimiques des eaux.....	139
6.2-	Classification des eaux	139
6.3-	Origine des ions.....	145
6.3.1-	Les anions	145
6.3.1.1-	Les bicarbonates	145
6.3.1.2-	Les sulfates	149
6.3.1.3-	Les chlorures	149
6.3.1.4-	Les nitrates	149
6.3.2-	Les cations	150
6.3.2.1-	Le calcium	150
6.3.2.2-	Le magnésium	150
6.3.2.3-	Le sodium et le potassium	150
6.4-	Relation entre minéralisation et profondeur	152
6.5-	Conclusion	152
Conclusions générales		
		153
Bibliographie		
		157
Liste des figures		
		159
Liste des tableaux		
		161

Thèse de doctorat de l'Université Scientifique,
Technologique et Médicale de Grenoble

Titre de l'ouvrage :

**HYDROGEOLOGIE DES FORMATIONS FISSUREES DE
LA PARTIE SUD DU PLATEAU MOSSI ENTRE LE
NAZINO ET LE NAKAMBE
(Région de KOMBISSIRI - MANGA)
BURKINA - FASO**

Nom de l'auteur : Dieudonné YAMEOGO

Etablissement : Université Scientifique, Technologique et
Médicale de Grenoble

RESUME

Situé entre le Nazino et le Nakambé, le Sud du plateau Mossi connaît un climat de type soudanéen marqué par une pluviométrie en baisse et une évapotranspiration élevée.

C'est un plateau de faible altitude légèrement incliné vers le Sud, sur lequel se dessine un réseau hydrographique variable en densité qui draine toute la région vers les deux principales rivières.

Le substratum est constitué essentiellement des formations éburnéennes et birrimiennes (migmatites, granitoïdes, amphibolites, schistes et micaschistes). Sur ce bâti cristallin se met en place un réseau de fracturation complexe que révèle l'étude des photographies aériennes. Ces fractures jouent un rôle important dans l'infiltration et le stockage des eaux.

La détermination des zones aquifères en vue d'implanter les ouvrages de captage revient à localiser les fractures le long desquelles se mettent en place des nappes discontinues.

La prospection géophysique est la méthode par excellence adaptée à la recherche d'eau en pays cristallin. La productivité hydraulique des ouvrages est dépendante non de leur profondeur mais des conditions hydrogéologiques.

L'étude piézométrique a mis en évidence des zones d'alimentation et des zones de drainage à travers les altérites et les fissures du bed-rock.

L'hydrochimie montre la présence de trois types d'eaux faiblement minéralisées. Le chimisme de l'eau est en relation étroite avec la nature des formations géologiques à travers lesquelles elles circulent et le mode de circulation.

MOTS CLES

Plateau Mossi ; Soudanéen ; Altitude ; Réseau hydrographique ; Substratum ; Fracturation ; Prospection géophysique ; Productivité hydraulique ; Hydrochimie.