



HAL
open science

Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta : étude régionale du bassin versant de la Sissili

Nindaoua Savadogo

► **To cite this version:**

Nindaoua Savadogo. Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta : étude régionale du bassin versant de la Sissili. Géologie appliquée. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1984. Français. NNT : . tel-00764194

HAL Id: tel-00764194

<https://theses.hal.science/tel-00764194>

Submitted on 12 Dec 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.

205. 142
1984
46

double

Scif



205142

1984

46

THESE

PRESENTÉE À

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

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR ES SCIENCES NATURELLES

PAR

Alain Nindaoua SAVADOGO

**GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE
DU SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE-VOLTA**

**Etude régionale du bassin versant de la
Sissili**

SOUTENUE LE 20 MARS 1984
DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN



- | | | |
|--------------------|---------------------------------|------------|
| R. BARBIER | Professeur émérite USMG | Président |
| J. SARROT-REYNAULD | Professeur USMG | Rapporteur |
| B. BLAVOUX | Professeur Université d'Avignon | |
| J.C. FOURNEAUX | Maître-Assistant USMG | Examineurs |
| R. MICHEL | Professeur USMG | |

Titre de l'ouvrage :

**GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE
DU SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE-VOLTA
Etude régionale du bassin versant de la Sissili**

Nom de l'auteur : Alain Nindaoua SAVADOGO

Etablissement : Université Scientifique et Médicale de Grenoble

RESUME

Les formations cristallines de Haute-Volta sont stériles à l'état sain, et les régions qu'elles occupent n'ont pour réservoirs aquifères que les couches d'altérites, les filons de quartz et la frange fissurée du substratum.

— *L'étude régionale* du bassin versant de la Sissili et celle de nombreux autres secteurs des régions du socle permettent d'aborder les problèmes de mode de gisement, de réalimentation, de la prospection et de l'exploitation des eaux souterraines des formations cristallines.

— *Le bassin versant de la Sissili* est occupé par des migmatites recoupées par des amphibolites, des granites et des dolérites. Migmatites et granites ont un chimisme voisin de celui des granites calco-alcalins communs. Les âges isotopiques supérieurs à 3000 Ma, obtenus au K/Ar sur les minéraux, indiquent que les migmatites, les amphibolites et les granites orientés appartiennent au Libérien. Les dolérites sont panafricaines.

— *Les données des images des satellites, des photos aériennes et de terrain* permettent d'identifier les mégastructures ouvertes et drainantes. Celles-ci induisent des perméabilités faibles en dehors de leurs zones broyées. Elles s'accompagnent de poches d'eau plus ou moins étendues, séparées par des seuils.

— *La réalimentation des nappes superficielles et profondes* s'effectue par infiltration à partir de zones préférentielles et circulation à travers les altérites et la roche fissurée.

— *Les eaux se minéralisent* en fonction de leur distance de percolation et de la nature des formations traversées.

— *Les concentrations* en chlorure augmentent avec les difficultés de circulation. Les teneurs en tritium montrent que les précipitations rechargent les nappes même dans les régions nord recevant moins de 500 mm d'eau par an.

— *La localisation des zones broyées* se fait par prospection électrique et électromagnétique. L'influence des fractures sur les courbes de sondages électriques est étudiée.

— *La productivité hydraulique des ouvrages de captage* est liée aux facteurs d'hétérogénéité (fissuration en petit, filon de quartz et composition pétrographique) des roches.

MOTS-CLES

Haute-Volta ; Socle cristallin ; Age isotopique ; Fracturation ; Perméabilité induite ; Eaux souterraines ; Chimie isotopique ; Prospection électrique ; Productivité hydraulique.

THESE

205142

PRESENTÉE À

1984

**L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE 46
DE GRENOBLE**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR ES SCIENCES NATURELLES

PAR

Alain Nindaoua SAVADOGO

GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

DU SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE-VOLTA

Etude régionale du bassin versant de la

Sissili

SOUTENUE LE 20 MARS 1984

DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN



R. BARBIER

Professeur émérite USMG

Président

J. SARROT-REYNAULD

Professeur USMG

Rapporteur

B. BLAVOUX

Professeur Université d'Avignon

J.C. FOURNEAUX

Maître-Assistant USMG

Examineurs

R. MICHEL

Professeur USMG

AVANT-PROPOS

La réalisation en Haute-Volta d'un mémoire scientifique de quelque niveau qu'il soit est toujours une tâche difficile en raison du sous équipement technique. C'est dire que le présent travail n'a pu aboutir que grâce au soutien de nombreuses personnalités et d'organismes auxquels je voudrai exprimer toute ma gratitude.

Les mots me manquent pour remercier le professeur J. SARROT REYNAULD qui après m'avoir accueilli dans son laboratoire depuis 1971, n'a jamais ménagé ni ses efforts, ni son temps pour m'assurer l'appui dont j'avais besoin. En acceptant de partager par deux fois mes conditions de travail sur le terrain, il m'a sans doute donné, par l'exemple, le courage qu'il me fallait pour faire face aux difficultés de parcours.

Je remercie le personnel de l'H.E.R. et celui de la brigade de géophysique en particulier. Merci aussi à la direction du BU.VO.G.MI..

J'ai pu réaliser mes analyses d'eaux et de roches au laboratoire de géologie de Niamey dont je remercie le responsable Ousmane BOUREMA et à l'Institut Dolomieu où j'exprime ma gratitude à G. VIVIER et à son équipe.

Mes remerciements vont également:

aux Professeurs R. BARBIER, R. MICHEL et B. BLAVOUX pour avoir accepté de juger mon travail dont ils ont amélioré le contenu en lisant et en critiquant mon avant projet de mémoire.

à la F.J.S. qui a porté un intérêt à mon travail de recherche en m'accordant une bourse.

à tout les amis de l'Institut Dolomieu et de Grenoble.

Mes derniers mots sont des mots de tendresse pour mon épouse et mes enfants que j'ai souvent quittés et parfois longuement, pour réaliser ce travail.

"L'eau !

Tu n'as ni goût, ni couleur, ni arôme.

Tu n'es pas nécessaire à la vie; tu es la vie.

Tu es la plus grande richesse qui soit au monde

et tu es aussi la plus délicate, toi si pure

au ventre de la Terre"

Antoine de Saint-Exupéry

L'eau est sans doute aujourd'hui encore la denrée de première nécessité dont la recherche fait parcourir à l'homme sahélien le plus fort kilométrage par tête d'habitant sur le globe.

Le but de ce mémoire est de contribuer, en aidant à la compréhension des phénomènes qui régissent le mode de gisement et de circulation de ce minerai, à raccourcir le chemin qui sépare l'homme de son point d'approvisionnement en eau; cette eau indispensable à tout développement et que nous voulons toujours plus abondante et plus potable.

R E S U M E

Les formations cristallines de Haute-Volta sont stériles à l'état sain, et les régions qu'elles occupent n'ont pour réservoirs aquifères que les couches d'altérites, les filons de quartz et la frange fissurée du substratum.

- L'étude régionale du bassin versant de la Sissili et celle de nombreux autres secteurs des régions du socle permettent d'aborder les problèmes de mode de gisement, de réalimentation, de la prospection et de l'exploitation des eaux souterraines des formations cristallines.

- Le bassin versant de la Sissili est occupé par des migmatites recoupées par des amphibolites, des granites et des dolérites. Migmatites et granites ont un chimisme voisin de celui des granites calco-alcalins communs. Les âges isotopiques supérieures à 3000Ma, obtenus au K/Ar sur les minéraux, indiquent que les migmatites, les amphibolites et les granites orientés appartiennent au Libérien. Les dolérites sont panafricaines.

- Les données des images des satellites, des photos aériennes et de terrain permettent d'identifier les mégastructures ouvertes et drainantes. Celles-ci induisent des perméabilités faibles en dehors de leurs zones broyées. Elles s'accompagnent de poches d'eau plus ou moins étendues, séparées par des seuils.

- La réalimentation des nappes superficielles et profondes s'effectue par infiltration à partir de zones préférentielles et circulation à travers les altérites et la roche fissurée.

- Les eaux se minéralisent en fonction de leur distance de percolation et de la nature des formations traversées.

- Les concentrations en chlorures augmentent avec les difficultés de circulation. Les teneurs en tritium montrent que les précipitations rechargent les nappes même dans les régions nord recevant moins de 500 mm d'eau par an.

- La localisation des zones broyées se fait par prospection électrique et électromagnétique. L'influence des fractures sur les courbes de sondages électriques est étudiée.

- La productivité hydraulique des ouvrages de captage est liée aux facteurs d'hétérogénéité (fissuration en petit, filon de quartz et composition pétrographique) des roches.

MOTS CLES : Haute-Volta, socle cristallin, âge isotopique, fracturation, perméabilité induite, eaux souterraines, chimie isotopique, prospection électrique, productivité hydraulique.

=====

INTRODUCTION

Nous avons été appelé depuis 1974, en association avec des équipes diverses, à trouver des solutions aux problèmes d'alimentation en eau potable des hommes mais aussi du bétail en Haute-Volta par l'exploitation des eaux souterraines. Nous rappellerons à ce sujet que notre premier mémoire a porté sur l'alimentation en eau du ranch d'embouche de Léo en projet, dont nous avons mené les études en participant parallèlement au premier projet "Urgence Sahel" qui équipa en forages d'eau 33 villes et gros villages situés au Nord du 13ème parallèle.

La période dans laquelle s'inscrit la présente étude est surtout marquée par un déficit pluviométrique qu'accompagne un assèchement de nombreux points d'eau de surface, mais aussi celui de maints ouvrages de captage d'eau souterraine, consécutif à une baisse généralisée des niveaux piézométriques interannuels.

L'intense activité de terrain que nous menions pour retrouver cette eau qui disparaît 8 mois par an sous nos pieds s'est accompagnée depuis 1975 d'une analyse des différentes observations et investigations que nous faisons tant sur la géologie des régions étudiées que sur les outils employés.

C'est cette analyse qui fait l'objet de ce mémoire qui veut être une contribution à un essai de synthèse et de critique de nos travaux de recherche entrepris pendant ces dix dernières années dans les régions à substratum cristallin de Haute-Volta. Nous tenterons de répondre à certaines questions qui dès 1975 se sont posées à nous comme celles relatives:

- à l'ancienneté de certaines eaux souterraines indiquée par leur teneur en tritium;
- au mode de gisement des eaux souterraines;
- à la géométrie et au mode d'alimentation des nappes;
- à la variabilité difficilement prévisible de la production hydraulique des ouvrages de captages.

Nos interventions se situant essentiellement au niveau des études d'implantation des ouvrages de captage, nous analyserons également les méthodes de recherche mises en oeuvre par nous même (photo-interprétation, utilisation d'indices biologiques, méthode électrique des résistivités) ou par d'autres équipes dans les régions occupées par les formations cristallines en Haute-Volta.

Nous traiterons de toutes ces questions en nous aidant des données recueillies sur toute l'étendue des formations du socle, mais en nous appuyant singulièrement sur les études géologiques et hydrogéologiques du bassin versant de la Sissili.

L'exposé comprendra quatre parties:

1/ Une description générale des formations du socle cristallin de Haute-Volta;

2/ L'étude géologique et hydrogéologique du bassin versant de la Sissili que terminera une étude chimique et isotopique des eaux de ce dernier bassin, mais aussi d'autres régions et notamment de celles du Nord du pays, qui s'est révélée intéressante et utile dans la recherche des réponses aux questions sus-indiquées;

3/ La description critique à partir de nombreux exemples des méthodes d'études, de prospection et d'exploitation des eaux souterraines des formations du socle cristallin;

4/ Enfin un essai de synthèse des données recueillies sur l'hydrogéologie des régions cristallines de Haute-Volta, telles qu'elles ressortent des facteurs étudiés.

Nous apporterons donc un certain nombre de résultats nouveaux dans le domaine de la géologie du Sud de Haute-Volta, encore peu connu, mais surtout un très grand nombre de données nouvelles sur l'hydrogéologie des formations cristallines dont nous mènerons l'interprétation en tenant le plus grand compte du contexte géologique dans lequel se produisent les circulations aquifères.

I -- APERÇU SUR LA GEOGRAPHIE ET LA GEOLOGIE DU SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE-VOLTA

I.1 APERÇU GÉOGRAPHIQUE DU SOCLE

I.2 APERÇU SUR LA GÉOLOGIE DU SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE-VOLTA

1.1- APERCU GEOGRAPHIQUE DU SOCLE

1.1.1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE

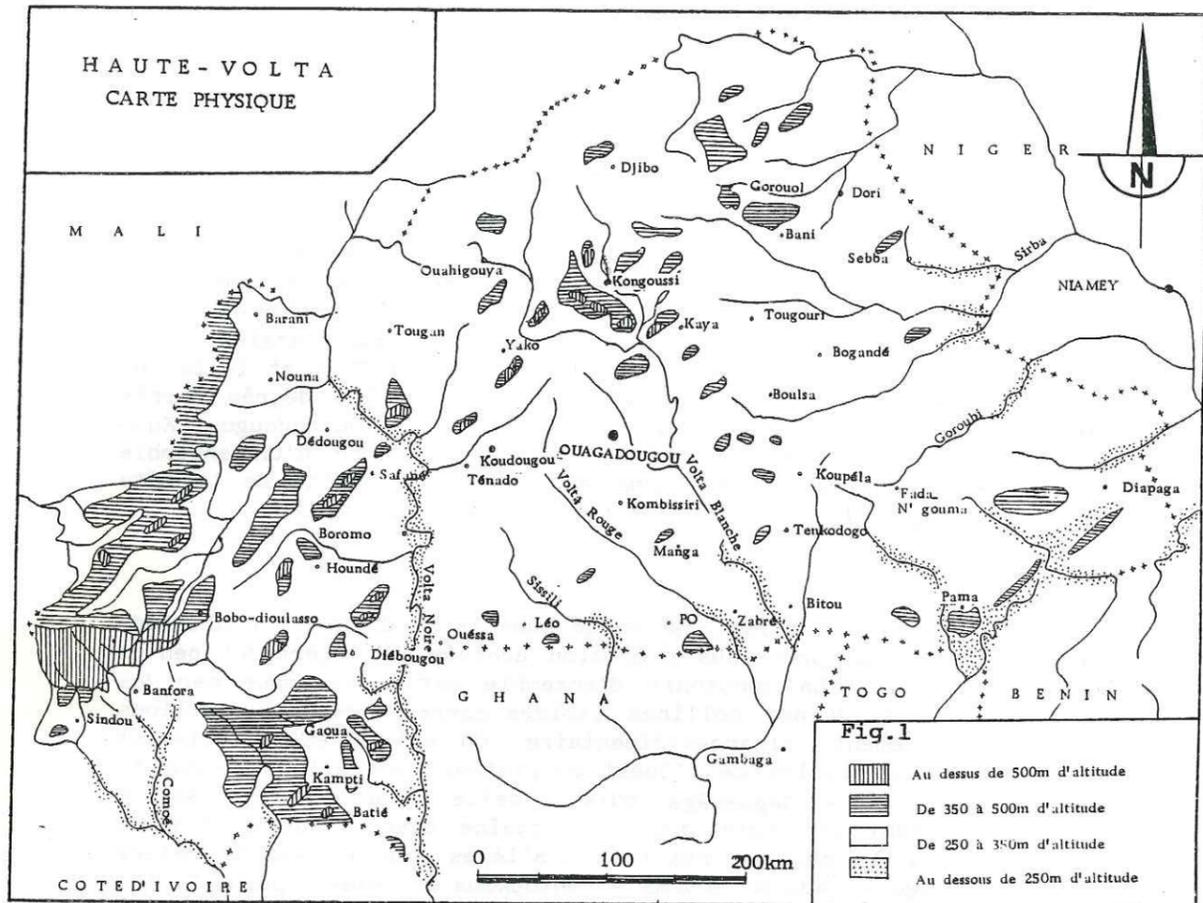
Les formations cristallines occupent plus de 80% de la superficie du territoire voltaïque. Leurs limites Ouest et Nord correspondent à une ligne en forme d'un S étiré allant de Sindou à Tambao et passant par Banfora, Bobo-Dioulasso, Diedougou, Tougan, Thiou et Diguel. Entre cette ligne et la frontière avec le Mali, le socle est recouvert en discordance par des formations sédimentaires. Il disparaît également au Sud-Est sous les dépôts de la falaise du Gobnangou qui s'étalent entre Pankankanti, Arly - Kabougou et la frontière avec le Togo et le Bénin. Les formations du socle occupent donc sans partage les degrés carrés de Gaoua, Léo, Pô, Tenkodogo, Fada-N' Gourma, Boulsa, Ouagadougou, Kou-dougou Kaya et Sebba. Elles constituent la partie nord d'un ensemble plus vaste occupant l'Ouest du Ghana et la quasi totalité de la Côte d'Ivoire (voir figure 7) désigné sous le nom de dorsale de Léo.

1.1.2. LE RELIEF

Le socle cristallin forme une vaste pénéplaine de 300 m d'altitude moyenne résultant d'un processus d'érosion achevée et légèrement pentée du Nord vers le Sud. La monotonie d'ensemble est interrompue par des chaînes de collines ou des collines isolées correspondant aux sillons éburnéens à comblement volcano-sédimentaire. On notera essentiellement les deux chaînes parallèles de l'Ouest du plateau Mossi allant de Kampti à Toma et de Batié à Séguénéga puis celle allant de Kongoussi à Garango interceptant en angle droit la chaîne discontinue s'étendant de Manga à Sebba à laquelle restent parallèles les lignes de relief Tiébélé - Tenkodogo - Fada-N' Gourma - Hantoukoua et Pama-Diapaga. Toutes ces collines culminent à moins de 600 m d'altitude. C'est la planéité du relief qui explique l'absence quasi totale de sources dans les régions du socle cristallin de Haute Volta. La source de Koumbri est la seule de tout le plateau mossi.

1.1.3. HYDROGRAPHIE

Les eaux du socle cristallin sont drainées au Nord, au Nord-Est et à l'Est par les affluents du Niger et de la Pendjari. Le centre, le Sud et l'Ouest cèdent leurs eaux aux trois Volta (Volta noire, Volta blanche et Volta rouge) et à la Sissili. Cette dernière n'est d'ailleurs qu'un affluent de la Volta rouge qu'elle rejoint en territoire ghanéen. Seules la Comoé qui draine le Sud-Ouest et la Volta noire, alimentées par les sources émergeant du plateau gréseux de Bobo-Dioulasso, ont des débits pérennes. Les autres cours d'eau sont souvent perchés par rapport aux nappes et s'assèchent vite après la saison des pluies laissant çà et là un chapelet des marés ou des lacs dont les plus importants sont ceux de Kongoussi, Bourzanga, Dem, Oursi, Dori, Markoye, Darkoye, Tingrela, Séguénéga. Depuis ces vingt dernières années de nombreuses digues ont été construites pour créer des retenues d'eau de surface qui ont une grande importance, tant pour l'alimentation du bétail que pour les cultures maraîchères irriguées. De ces ouvrages, les plus remarquables sont ceux de Moghtégo, Bazéga, Bagaré, Ouahigouya, Fada-N' Gourma, Tapoa, Manga Djibo, Dablo, Tougouri, Yalogo.



1.1.4. CLIMATOLOGIE

Les régions du socle cristallin, comme du reste toute la Haute-Volta, connaissent un climat de type soudanéen caractérisé par l'alternance de deux saisons très contrastées: une saison sèche et une saison de pluies. Le rythme saisonnier est commandé par une influence alternée des vents sahariens et des moussons océaniques.

1.1.4.1- Les sous-zones climatiques

Dans le détail, certains auteurs distinguent deux sous-zones climatiques: l'une nord soudanéenne, située au Sud du 14ème parallèle et l'autre sahélienne couvrant la région au Nord du 14ème parallèle. Dans la zone nord-soudanéenne, on peut distinguer: une courte saison pluvieuse (15 mai - 15 juin) avec des orages violents et espacés et une saison de pluies abondantes et continue qui commence vers le 15 juillet et dure jusqu'en fin septembre. Ces deux saisons sont séparées par un mois plus sec (15 juin - 15 juillet). Si cette saison sèche n'apparaît pas sur les graphiques où l'on a l'habitude de présenter les hauteurs de pluie par mois (du 1er au 30), son incidence sur les cultures méritait qu'on la signalât. En effet, pour les régions du plateau mossi, lorsque cette saison intervient après de bonnes pluies bien réparties, permettant une bonne germination et pousse des semis, elle favorise un bon désherbage et laisse présager de bonnes récoltes si les pluies sont régulières jusqu' en fin septembre. Par contre, si la petite saison sèche survient avant une bonne prise de semis, elle entraîne un mauvais étalement de la mise en semis et aussi souvent de mauvaises récoltes sur des pieds clairsemés et d'âges différents de mil appelés à murir en même temps, car les variétés cultivées sont souvent photosensibles.

La sous-zone sahélienne

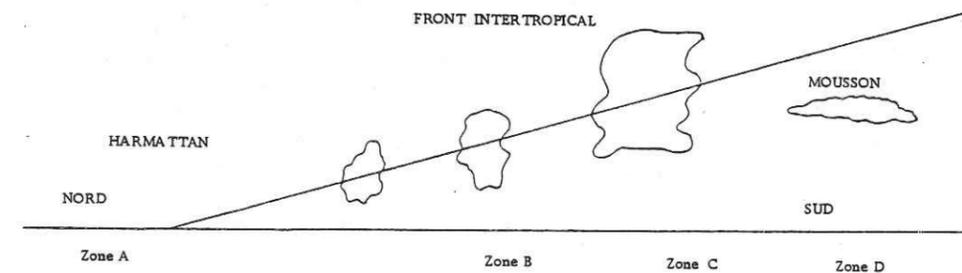
Elle connaît ses pluies à partir de Juillet et avec un maximum de précipitations en Août comme dans la zone nord-soudanéenne.

1.1.4.2. Mécanisme de l'alternance saisonnière

- La saison sèche est liée à l'Harmattan, vent chaud et sec soufflant sur toute la Haute-Volta d'Octobre à Mars et du Nord-Est vers le Sud Ouest. De Novembre à Février, l'Harmattan est relayé par l'alizé boréal, vent frais et même froid soufflant dans le même sens que l'Harmattan.

- La saison des pluies: à partir de Mars, le Sahara surchauffé devient une zone de basses pressions aspirant les masses d'air océanique. C'est la mousson qui se glisse sous l'Harmattan dont elle est séparée par un plan incliné du Sud vers le Nord. Ce plan qui est appelé "Front intertropical - F.I.T." fait la navette entre la côte et le Sud du Sahara: en Janvier, le F.I.T. est à Bouaké (au Nord de la Côte d'Ivoire), il atteint Tombouctou en Août et reprend ensuite le chemin de la Côte d'Ivoire (Fig. 2).

On constate donc que toutes les régions de la Haute-Volta sont à un moment donné de l'année intéressées par un des quatre stades définis par G. ROUGERE, et liées au dispositif mousson-harmattan. Le climat va donc dépendre de la progression des divers stades du F.I.T., de la durée et de l'ampleur des manifestations pluviales qui lui sont liées.



SCHEMA DU DISPOSITIF MOUSSON-HARMATTAN

- Zone A Domaine exclusif de l'harmattan
- Zone B Secteur de turbulence, orages locaux
- Zone C Zone optimale des pluies
- Zone D Domaine exclusif de la mousson

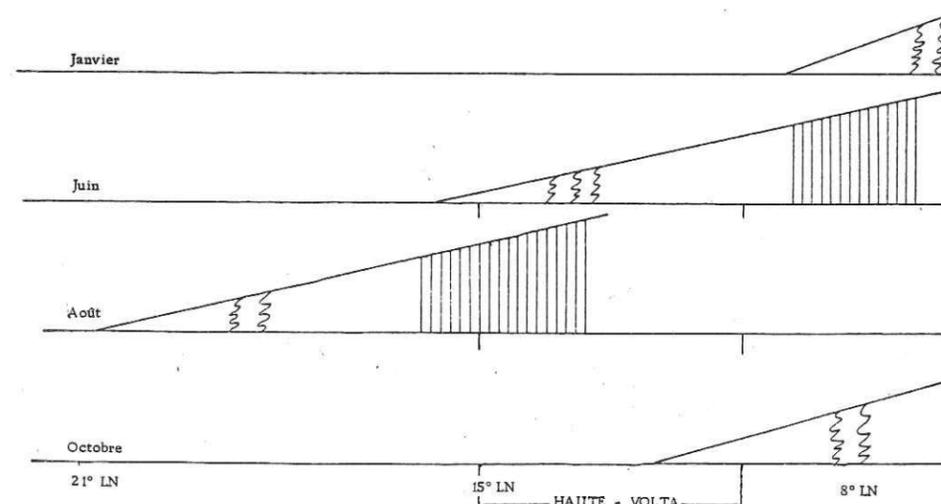


Fig. 2 SCHEMA DU DEPLACEMENT ANNUEL DU "FRONT INTERTROPICAL" ET DES MANIFESTATIONS PLUVIO-ORAGEUSES QUI S'Y ATTACHENT

- Orages locaux
- Pluies

Les hauteurs des précipitations annuelles: diminuent du Sud-Ouest au Nord-Est, passant de 1 300mm à Ouangolodougou à 400mm à Gorom-Gorom, puis à 350 mm à Markoye. La période dans laquelle se situe notre étude est caractérisée par une baisse généralisée des précipitations annuelles que permettent de voir les cartes des isohyètes des 2 décennies consécutives 1961-1970 et 1971-1980. Ce phénomène qui se traduit par une désertification progressive très remarquable dans le Nord du pays s'accompagne sur le plan hydrogéologique d'une baisse généralisée des niveaux piézométriques d'étiage des nappes, les quantités d'eau infiltrées^{no} compensant plus les prélèvements par évapotranspiration. Une des conséquences du déficit pluviométrique devient alors la dénoyade de la cuirasse latéritique qui se trouve être la partie la plus productive des horizons supérieurs du profil d'altération.

La répartition de la température est beaucoup plus nuancée que celle des précipitations. En effet, s'il fait généralement plus chaud au Nord qu'au Sud, c'est également au Nord qu'on connaît aux périodes fraîches de l'année (Décembre-Janvier) les températures les plus basses. Il en résulte que si l'on considère la moyenne des températures de l'année, l'écart entre la température à Niangologho et celle de Markoye n'est que de deux degrés Celsius. L'effet de continentalité est donc peu marqué.

C'est du point de vue humidité relative que le contraste entre le Sud et le Nord apparaît plus nettement. Elle est en effet toujours plus importante à Niangologho qu'à Markoye. C'est certainement les effets conjugués de la température et de l'humidité relative qui font que l'évaporation annuelle mesurée au bac colorado passe de 2037,3 mm à Niangologho à 2995,1 mm à Dori. Sans qu'elle n'ait jamais fait l'objet d'une étude comparative entre le Sud et le Nord, on peut dire que l'évapotranspiration évolue dans le même sens que l'évaporation, étant donné qu'elles sont liées toutes les deux aux mêmes facteurs.

Tableau 1

Moyennes des précipitations - période 1971-1980 (en mm)

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total	Nombre de pluies
Batié	3,6	10,4	41,7	72,8	140,6	110,8	211,9	188,8	201,7	104,8	3,7	7,1	1097,9	77
Banfora	1,3	9,4	16,7	48,8	104,9	111,0	228,6	225,6	171,9	67,3	4,6	2,5	992,5	68
Bobo-Dioulasso	2,0	3,8	20,3	45,5	92,5	116,6	191,8	246,3	168,7	56,7	4,5	0,7	949,4	85
Léo	2,2	1,1	14,1	34,5	97,7	104,4	191,1	261,3	156,5	53,0	0,3	3,0	912,20	70
Pô	1,4	0,2	10,2	26,3	86,2	103,9	168,8	204,2	150,2	53,1	1,2	2,7	808,4	57
Gao	0,1	tr	6,6	29,7	60,0	110,9	181,5	244,9	137,1	27,0	2,9	0,3	801,6	64
Thyrou	0,1	tr	8,6	28,5	51,2	94,0	167,8	218,3	147,9	50,4	1,1	4,8	772,7	64
Ouagadougou Ville	0,2	1,4	3,2	36,2	65,6	120,2	176,5	241,4	129,5	30,9	1,5	0,4	807,0	63
Ouahigouya	0,2	tr	3,3	12,6	20,9	81,7	152,0	170,2	98,9	27,6	tr	0,3	567,7	57
Djibo	1,1	0	0,9	6,8	19,5	24,2	133,3	144,9	60,5	18,8	0	0,1	410,1	31
Arbinda	0,1	0	5,2	7,1	19,6	46,6	128,6	126,2	52	17,8	0	0,4	403,6	38
Doù	tr	0,4	2,3	7,1	22,2	64,8	131,6	137,4	64,7	15,8	tr	tr	446,3	45
Gorom-Gorom	tr	0,3	0,2	6,1	16,9	52,2	101,6	117,1	44,8	16,4	0,10	tr	355,7	34
Markoye	tr	0,4	1,1	4,5	11,3	44,5	110,0	111,6	49,9	10,3	0	tr	343,6	32

Tableau 2

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Moyenne annuelle
Niangologho	29	30	45	57	65	72	76	80	78	70	51	37	58
Gaoua	27	26	37	55	67	74	79	81	80	73	48	35	57
Bobo-Dioulasso	22	20	32,3	45	59,7	72	77,7	81	77,7	67,7	43,3	31,3	52,3
Léo	20	24	31	46	53	67	76	80	77	58	37	27	50
Boromo	23,3	19,7	27,7	40,3	55,3	66,3	73,7	78,3	77,3	64,7	41,7	28,3	49,7
Ouagadougou-Aéro	26	22	26	37	51	61	71	76	74	59	36	30	48
Kaya	23	19	23	30	45	57	69	77	70	53	30	25	43
Ouahigouya	23	21	21	28	40	54	67	72	69	50	30	27	42
Dori	26	24	22	26	37	48	62	67	64	45	31	28	40
Markoye	17	14	13	16	29	41	54	62	53	33	18	19	31
Fada N'Gourma	24	21	28	40	54	64	74	81	80	66	39	30	60
Diapaga	18	16	21	34	52	61	70	78	75	57	30	23	45

Fig. 3 MOYENNES DES PRECIPITATIONS MENSUELLES EN mm POUR LA PERIODE 1971 - 1980

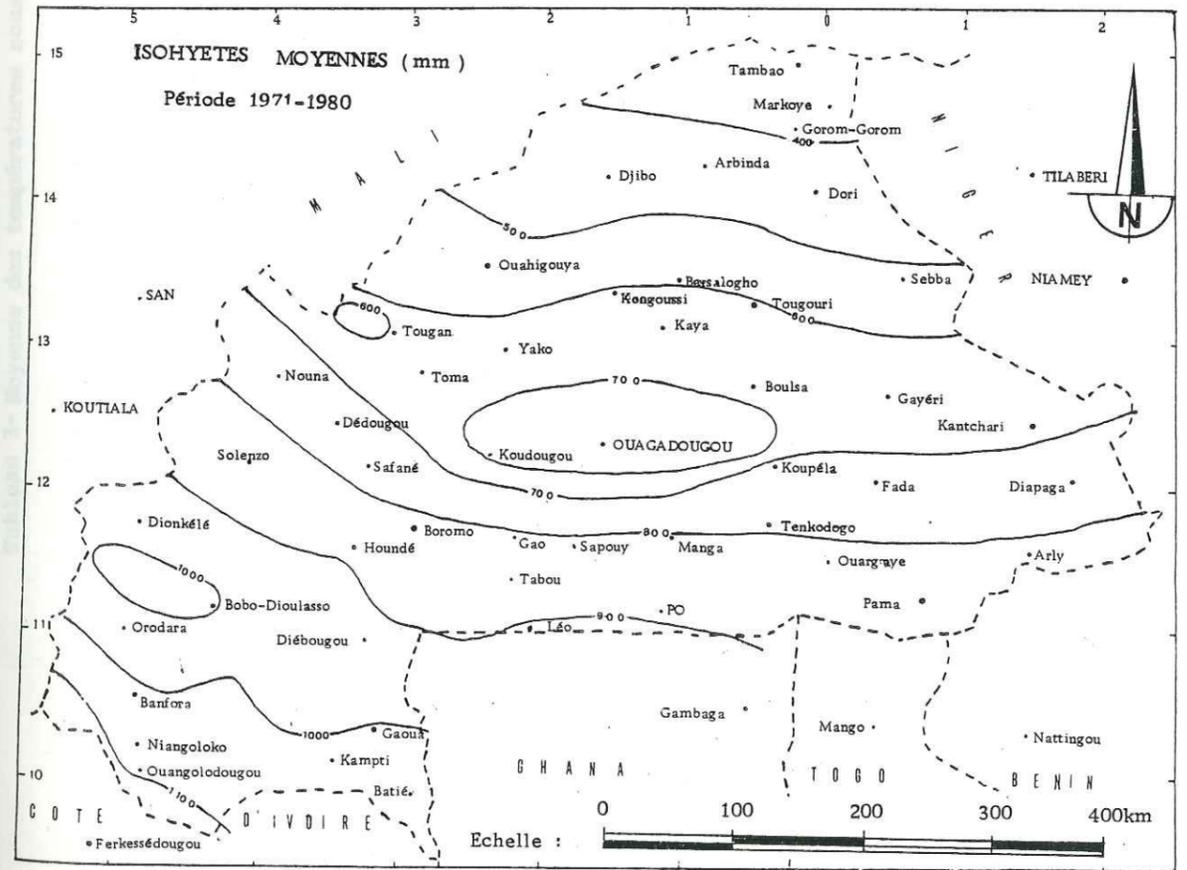
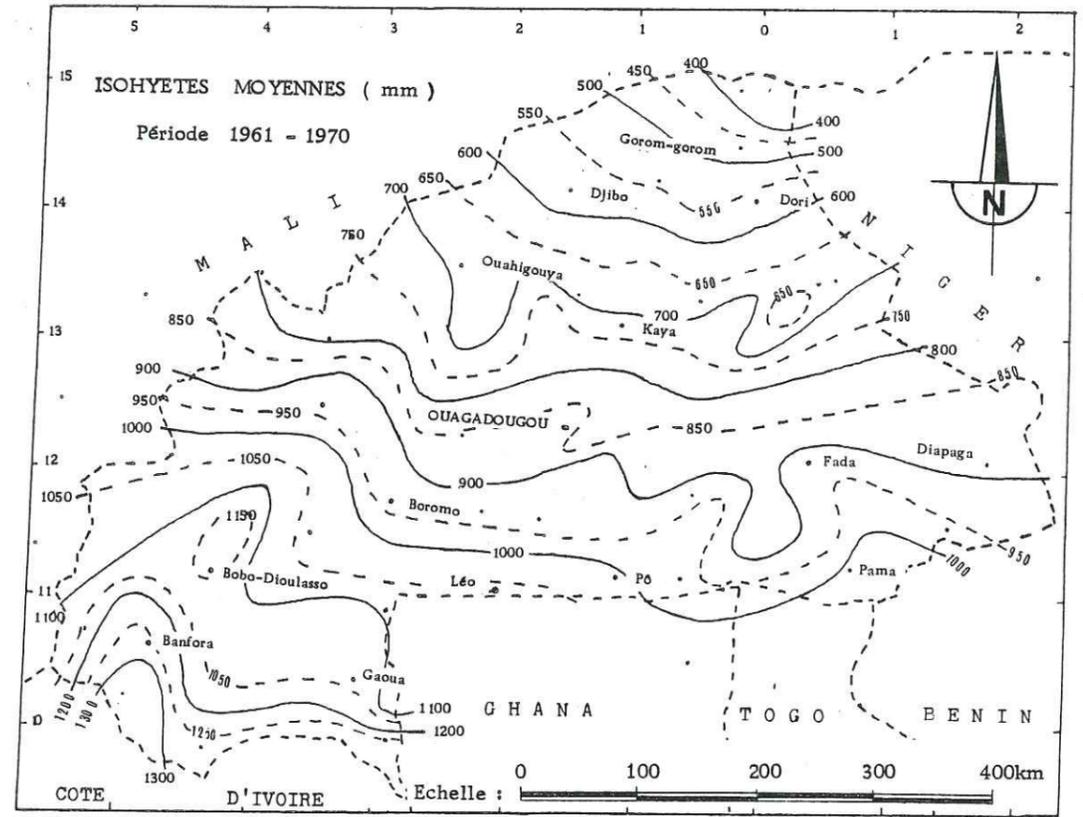
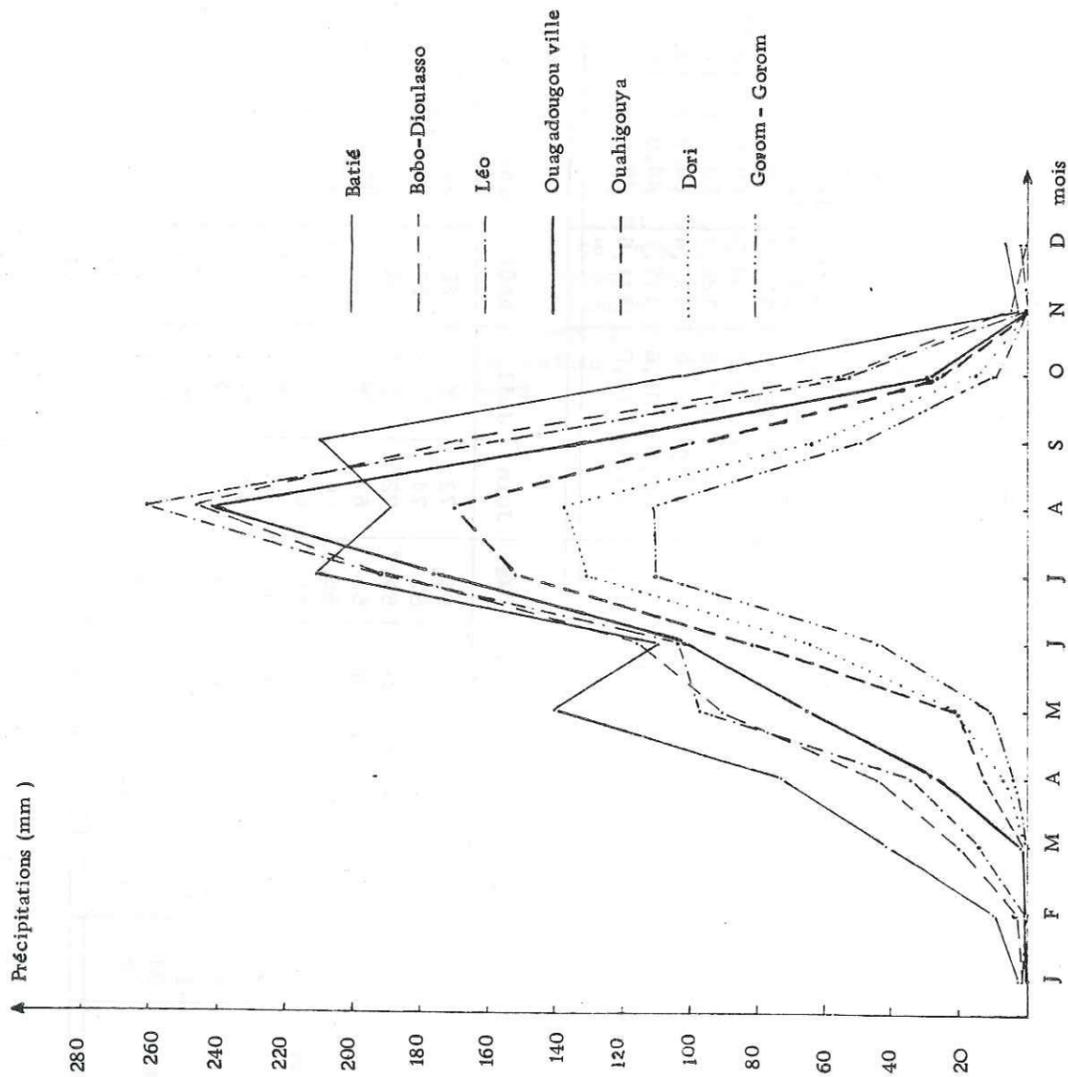


Fig. 4

Tableau 2 - Moyennes des températures minimales / maximales (en °C)

	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Moyenne annuelle
Niangologho	18,8 33,9	21,3 35,9	22,9 36,2	23,6 35,6	22,9 33,8	21,6 31,4	21,1 29,8	21,0 29,5	21,0 30,4	21,2 32,4	19,8 33,9	18,3 33,4	21,1 33,0
Gaoua	19,0 34,5	21,6 36,7	24,0 37,8	24,4 35,9	23,4 33,8	22 31,5	21,3 29,6	21,2 29,6	21,0 30,9	21,4 33,3	19,9 35,2	18,6 34,1	21,5 33,6
Bobo-Dioulasso	19,0 32,9	21,4 35,1	23,7 36,2	24,5 35,9	23,4 34,1	21,9 31,6	21,0 29,7	20,9 29	20,9 30,3	21,50 32,9	20,3 33,8	18,7 32,7	21,4 32,9
Léo	18,4 34,6	20,7 36,8	23,5 37,5	24,7 37,5	24,0 35,3	22,3 32,40	21,6 30,3	21,2 29,8	21,0 31,1	21,3 33,4	18,9 35,4	17,6 34,1	21,3 34,0
Boromo	16,8 33,9	19,4 36,4	23,3 38,4	25,6 38,4	25,0 36,5	23,3 33,8	22,1 31,1	21,7 30,5	21,6 31,8	21,8 35,0	18,0 35,7	16,6 33,8	21,3 34,6
Ouagadougou-ville	15,7 34,0	18,0 36,5	22,4 38,6	25,4 39,2	25,9 37,2	24,1 34,1	22,8 31,7	22,3 30,9	23,5 32,2	23,1 35,5	18,6 36,0	15,9 33,9	21,4 35,0
Kaya	16,9 31,8	19,6 35,1	22,9 37,8	25,4 39,1	24,9 38,1	22,8 35,3	22,0 32,3	21,4 31,0	21,9 32,2	23,2 36,2	20,3 35,1	17,5 32,4	21,6 34,7
Ouahigouya	16,3 33,3	17,8 36,0	22,3 38,7	25,5 40,5	26,7 39,8	25,1 37,1	23,3 33,6	23,2 32,8	22,8 34,1	22,8 37,5	18,7 36,3	16,3 33,5	21,7 36,1
Dori	14,4 32,9	16,5 36,1	21,2 39,0	25,0 41,6	27,5 41,0	26,4 38,6	24,2 35,1	23,6 34,5	23,9 35,8	23,5 39,2	17,7 36,5	14,8 33,4	21,6 37,0
Markoye	14,2 31,7	16,1 34,8	20,9 38,2	24,7 40,9	27,3 41,1	26,5 39,0	24,7 35,8	23,6 34,3	23,8 36,5	22,6 38,8	18,2 35,8	14,9 32,2	21,5 36,6
Fada N'Gourma	17,0 33,9	19,6 36,5	23,6 38,5	25,6 39,2	25,0 36,9	23,3 33,9	22,1 31,4	21,6 30,3	21,4 31,7	21,5 35,3	18,0 35,6	16,8 33,8	21,3 34,8
Diapaga	15,4 33,8	18 36,8	22,5 38,9	25,1 39,5	24,9 36,6	25,7 34,0	22,3 31,1	21,9 30,1	21,8 31,7	21,8 35,4	17,7 36,0	15,9 33,9	21,1 35,2

20

Tableau 3- Moyenne des températures sous-abri - Période 1971-1980 (en °C)

	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Décembre	Moyenne annuelle
Niangologho	26,3	28,6	29,6	29,6	28,3	26,5	25,5	25,5	25,7	26,8	26,9	26,9	27,1
Gaoua	26,7	29,1	30,6	30,2	28,5	26,7	25,5	25,4	25,9	27,3	27,6	27,6	27,5
Bobo-Dioulasso	25,9	28,2	29,9	30,2	28,7	26,6	25,7	24,9	25,6	27,1	27,0	27,0	27,1
Léo	26,3	28,6	30,6	31,1	29,7	27,4	26,0	25,5	25,9	27,4	27,2	27,2	27,6
Boromo	25,4	28,0	30,8	32,0	30,8	28,5	26,6	26,1	26,7	28,4	26,9	26,9	28,0
Ouagadougou-ville	24,9	27,3	30,6	32,3	31,6	29,1	27,3	26,6	27,3	29,3	27,3	27,3	28,2
Kaya	24,4	27,6	30,6	32,0	31,6	29,0	27,3	26,2	27,0	29,7	27,8	27,8	28,2
Ouahigouya	24,5	27,0	30,9	33,0	33,2	31,1	28,5	27,8	28,4	30,2	27,5	27,5	28,9
Dori	23,6	26,3	30,2	33,0	34,3	32,4	29,7	29,0	30,1	31,4	27,1	27,1	29
Markoye	23	25,5	29,5	32,8	34,2	32,7	30,2	28,8	30,0	30,8	27,0	27,0	29
Fada N' Gourma	25,4	28,1	31	32,4	30,7	28,6	26,7	26	26,6	28,3	26,8	26,8	28
Diapaga	24,6	27,4	30,7	32,3	30,7	28,8	26,7	26,0	26,7	28,6	26,8	26,8	28
Evaporation moyenne (en mm) au Bac A (Colorado)													TOTAL
Niangologho	223,8	235,8	238,9	182,0	186	141,2	122,1	113,0	118,4	142,2	151,5	182,4	2037,3
Bobo-Dioulasso	295,5	310,0	336,6	292,7	250,6	190,1	145,4	121,8	129,1	163,5	221,3	261,0	2717,6
Fada N'Gourma	245,1	262,5	314,2	320,5	287,4	222,6	173,6	136,5	135,9	179,1	210,3	225,4	2712,5
Ouagadougou	259,1	276,6	339,4	329,7	311,2	255,1	211,2	170,9	172,3	219,0	237,4	236,1	3017,9
Ouahigouya	230,8	232,6	287,3	279,7	266,5	220,0	173,5	148,6	157,5	197,7	223,1	211,8	2629,1
Dori	227,8	244,1	319,4	323,0	320,5	285,2	222,2	182,2	192,7	237,5	222,6	217,9	2995,1
Evaporation moyenne (en mm) à l'évaporomètre PICHE													TOTAL
Gaoua	230,8	234,8	234,5	163,9	118,1	79,0	61,6	51,3	50,4	83,4	160,0	198,6	1666,4
Léo	430,1	409	364,8	267,9	187,8	121,0	87,8	62,6	61,9	103,9	240,3	291,2	2628,0
Ouaga ville	229,0	241,2	279,0	238,8	180,0	118,1	78,9	58,6	68,8	136,0	188,1	209,1	2025,6
Diapaga	250,3	268,4	311,2	274,2	201,7	136,7	89,0	57,9	58,1	116,6	187,4	216,7	2168,2

21

Tableau 4

1.2- APERÇU SUR LA GÉOLOGIEDU SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE-VOLTA

En raison de l'usage fréquent que nous ferons de certains termes et de l'évocation de formations géologiques, ainsi que de noms d'étages propres au bouclier ouest africain, nous commencerons notre exposé en donnant un aperçu sur la géologie du socle cristallin de Haute-Volta. Cet aperçu se veut une synthèse brève de travaux existants, dont notamment ceux de J. DUCELLIER-1963, de G. HOTTIN et O.F. OUEDRAOGO-1975, de E. P. GAMSONRE-1975 et de B. TAGINI-1971.

1.2.1- INTRODUCTION

Le continent africain est occupé par quatre importants cratons (le craton ouest africain, le craton nilotique (hypothétique), le craton du Congo et enfin le craton du Kalahari) séparés les uns des autres par des zones mobiles plissées et rajeunies (fig.5).

La Haute-Volta occupe avec la Côte d'Ivoire le centre sud du craton ouest africain généralement désigné sous le nom de bloc Baoulé-Mossi ou dorsale de Léo. (fig.5)

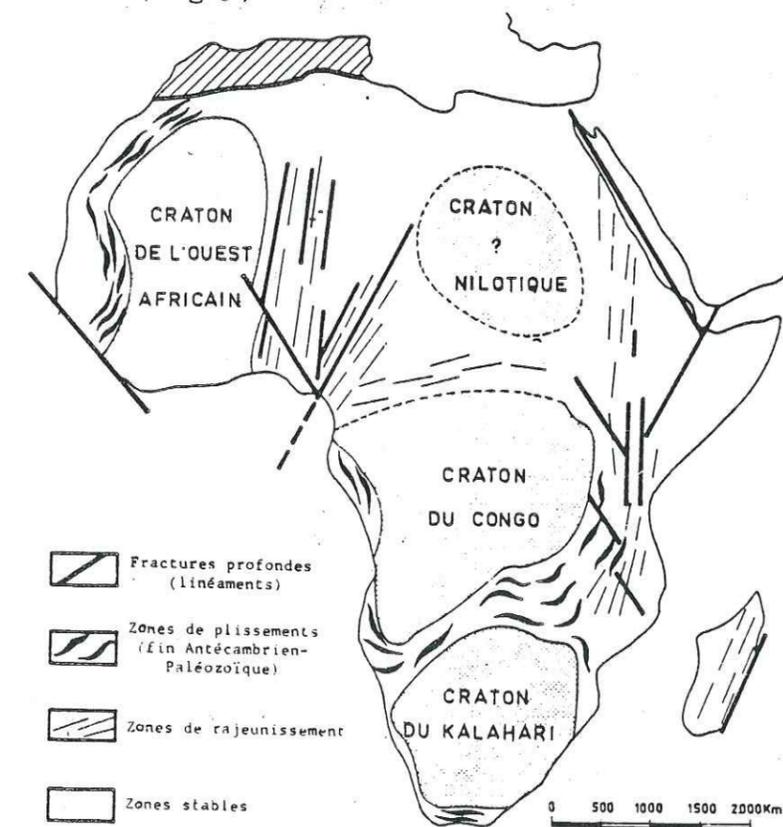


Fig.5 — Structure d'ensemble de l'Afrique. [G. Rocci, 1965]

On peut résumer la géologie de la Haute-Volta en évoquant sommairement ses deux composantes géologiques essentielles: l'une cristalline et précambrienne et l'autre sédimentaire d'âge précambrien supérieur à éocambrien et tertiaire. En effet, plus de 80 % de la superficie du territoire voltaïque sont constitués de formations cristallines recouvertes en discordance sur toute la frontière avec le Mali (c'est-à-dire à l'Ouest, au Nord-Ouest et au Nord, ainsi que sur la frontière avec le Niger, le Bénin et le Togo à l'Est) par des dépôts sédimentaires (fig.7)

Nous retiendrons pour traiter de la géologie du socle cristallin de Haute-Volta, trois groupes de formations:

. les noyaux granito-migmatitiques, les formations volcano-sédimentaires épimétamorphiques des sillons et enfin les roches plutoniques.

1.2.2 - LES FORMATIONS GRANITO-MIGMATITIQUES

Elles comprennent des gneiss diversifiés, des leptynites et migmatites leptynitiques, des migmatites à biotite et amphibole, des migmatites gneissiques à biotite, et migmatites et granites indifférenciés.

1.2.2.1. LES FORMATIONS GNEISSIQUES DIVERSIFIÉES

On les retrouve sous forme de nombreux septas diversifiés dans les migmatites. Leur importance est de ce fait sous-estimée sur les cartes à petites échelles (1/1000 000 par exemple). On note cependant la présence de quelques ensembles gneissiques de plusieurs dizaines de km² dans l'Oudalan dans la région de Sebba et dans celle de Tenkodogo.

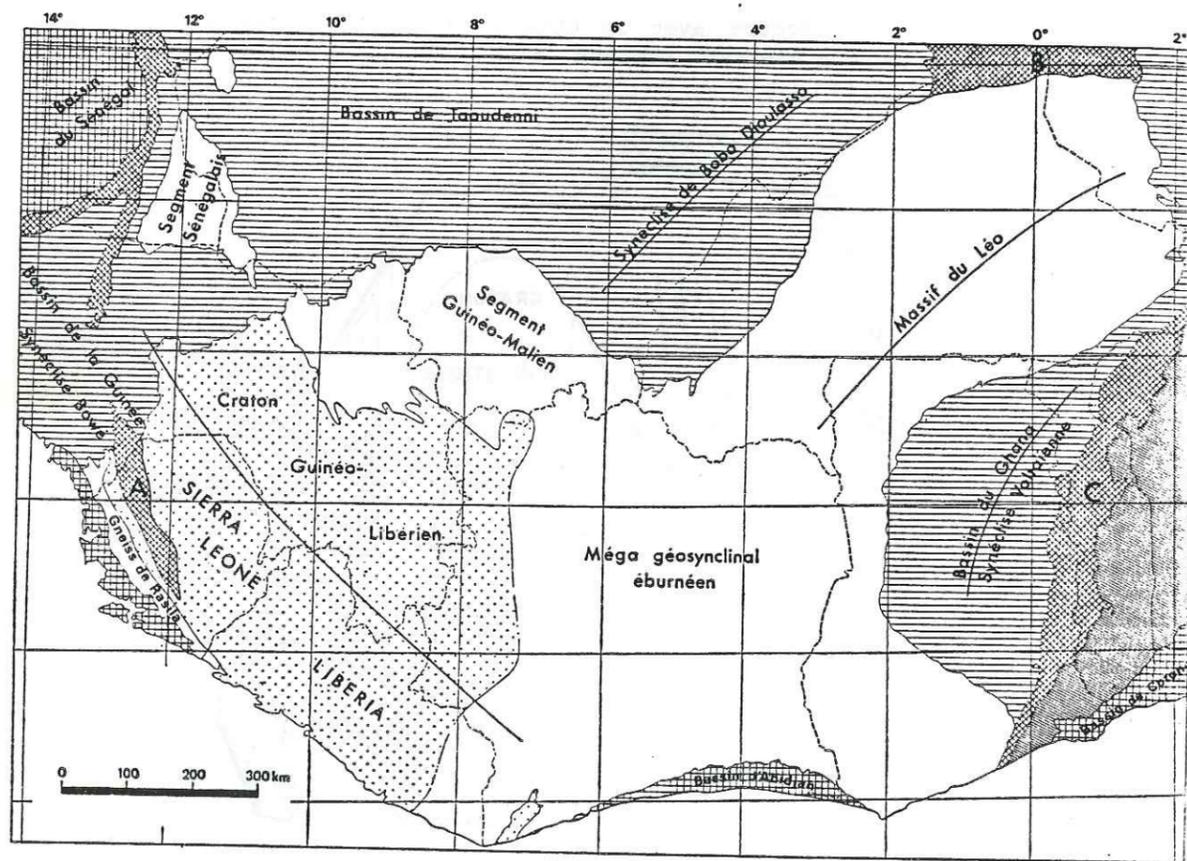


Fig.6

Schéma d'ensemble du bouclier éburnéen (libéro-ivoirien).
D'après B. Tagini, 1965 (1966)

1. Megagéosynclinal éburnéen; 2. Craton ancien

guinéo-libérien; 3. Craton mobile dahoméen; 4. Bassins côtiers;
5. Couverture tabulaire de plate-forme; 6. Chaînes plissées:
A. Rockellides-Falémides, B. Nigérides, C. Chaîne d'Atacora.

. Dans l'Oudalan, les gneiss correspondent dans les "formations de Gouba" à des faciès schisteux et micaschisteux dont la paragenèse gneissique n'est révélée qu'au microscope. Quelques faciès de schistes graphiteux, ferrifères et manganésifères, leur sont associés ainsi que des skarns.

. Dans le degré carré de Sebba, les formations gneissiques sont à amphibole ou à biotite-amphibole, avec des intercalations quartzitiques, à grenat sillimanite ou disthène, à magnétite ou manganésifères.

. Les septas gneissiques de Tenkodogo constituent de petits îlots fortement laminés, concentrés dans les migmatites à amphibole bordant les sillons de Youga au Sud-Est de Zorgho.

1.2.2.2- LES LEPTYNITES ET MIGMATITES LEPTYNITIQUES

On ne les rencontre que dans les régions situées à l'Est et au Nord-Est du môle de Ouagadougou. Au Nord-Est, elles se présentent sous forme de lentilles d'extension kilométrique dispersées dans les migmatites des régions de Markoye, Gorom-Gorom, Saouga, Tin-Agadel.

Les affleurements de Sebba, Fada-N'Gourma, Diapaga et Tenkodogo constituent eux des masses très importantes (de 20 à 30 km sur 50 à 100 km d'extension). Ce sont des roches claires, massives, à grain fin, légèrement planaires dépourvues de biotite, mais avec de nombreux grains de magnétite et de hornblende hastingsitique.

1.2.2.3- MIGMATITES A BIOTITE , MIGMATITES A BIOTITE-AMPHIBOLE

Deux importants panneaux de migmatites à biotite ou plus rarement biotite-amphibole sont connus à l'Ouest du pays: panneau de Sideradougou Mangadora et panneau de Gourcy. Ces ensembles à septas de gneiss rubanés ont une composition granodioritique à quartzodioritique, avec quartz et oligoclase-andésine dominants, biotite brune, épidote, allanite et sphène. Le microcline qu'on retrouve dans les faciès acides est myrmékitique et souvent interstitiel.

Les migmatites à amphibole et biotite amphibole. Elles forment à l'Est du pays d'importants panneaux cotoyant parfois les migmatites leptynitiques. Elles ont une composition granodioritique à monzonitique avec microcline perthitique (20 %), quartz et oligoclase (40 %) dominants, associés à la hornblende verte, épidote et biotite rares.

1.2.2.4- MIGMATITES ET GRANITES INDIFFERENCIÉS

La plus grande partie des espaces intersillons correspond à une pénélaine à recouvrement sableux arénitique ou latéritique, avec des affleurements épars et inégalement répartis de migmatites hétérogènes et de granites calco-alcalins. S'il est vrai que la rareté des affleurements n'autorise pas une cartographie précise de ces secteurs, l'importance spatiale des domaines occupés par ces formations de migmatites et de granites indifférenciés explique beaucoup plus l'absence à ce jour de travaux de cartographie détaillée de ces zones que l'impossibilité d'y différencier des faciès cartographiables.

1.2.3- LES FORMATIONS VOLCANO-SÉDIMENTAIRES ÉPI- À MÉSOMÉTAMORPHIQUES DES SILLONS

Par fracturation du bati constitué des roches précédemment décrites se sont individualisés des sillons de direction N.NE à NE dominante à l'Ouest et à l'Est du "môle" de Ouagadougou-Léo et W-NW dominante à la périphérie nord du même môle.

Le matériel de remplissage de ces sillons est d'origine volcano-sédimentaire et comprend:

- un groupe métavolcanique et volcano-sédimentaire basal avec laves et pyroclastes, métasédiments associés et des intrusions subvolcaniques de diorites ou microdiorites quartziques;
- un groupe métasédimentaire terminal avec des faciès grossiers de grès et de grauweekes.

1.2.3.1- LE GROUPE METAVOLCANIQUE ET VOLCANO-SÉDIMENTAIRE BASAL

1.2.3.1.1. Laves et pyroclastes

Dans cet ensemble G. HOTTIN et O.F. OUEDRAOGO, regroupent:

- Des volcanites basiques, basaltes et andésites à structure microlitique plus ou moins porphyrique et à texture fluidale, massive, vacuolaire avec présence de pillow-lavas (ex: feuille de Ouahigouya de GAMSONRE, 1975). Ces laves métamorphisées dans l'épizone, et plus rarement dans le faciès amphibolite à épidote ont donné des metabasaltes, méta-andésites, mais aussi des amphibolites schisteuses à trémolite-actinote, albite, chlorite, épidote, carbonates. Des faciès d'agglomérats et de brèches sont fréquemment associés à ces laves basiques dont la puissance est de 10 à 100 mètres.

- Des faciès grenus de diorites ou de gabbros formant des sills ou des massifs parfois bien individualisés de plusieurs dizaines de kilomètres de diamètre. Ces formations se rencontrent surtout à l'Est et au Nord-Est du pays: régions de Pama, Diapaga, Bouroum, Yalogo, Sebba.

- Des faciès microgrenus formant des sills (microgabbros, dolérites) ou correspondant à des différenciations à contours flous (microdiorites principalement, dans les laves andésitiques).

- Des faciès ultrabasiques: ce sont des péridotites serpentinisées et des pyroxénolites qui se présentent sous forme de corps lenticulaires stratiformes associés aux laves dans les régions de Ouga-Yarsé, Korsimoghokaya, Bogandé, Boulsa et Poura.

- Des formations volcano-sédimentaires comportant des tufs neutres dominants et des grauweekes basiques associés à des laves diversifiées et à des tufs dacitiques à rhyodacitiques, voire rhyolitiques. Sur ces formations reposent d'épais niveaux tuffacés fins, à caractère sédimentaire marqué: tuffites quartzieuses, tufs cinéritiques, schistes tuffacés plus ou moins argileux, parfois varvés.

- Les séquences de laves diversifiées jusqu'aux termes acides (dacites, rhyodacites et rhyolites) et de pyroclastes acides bien développées seraient rares en Haute-Volta. Elles n'ont été rencontrées que dans la série de Tiefora (bordure est du sillon de Banfora) dans les régions de Kaya-Goren et de Fada-N' Gourma, mais aussi plus accessoirement dans les sillons de Poura. Par contre, dacites et rhyolites sont des termes fréquents. Elles se présentent sous forme de coulées de laves esquilleuses noirâtres, souvent vésiculaires, à quartz exprimé, de puissance décamétrique.

Les laves et les pyroclastes ont été généralement affectées par un métamorphisme régional de degré épimétamorphique à paragenèse de basse température à albite - chlorite - épidote - calcite, soit albitophyre au sens large. Cette paragenèse albitique apparaît cependant secondaire

dans les termes basiques (basaltes à oligoclase) qui montrent des plagioclases automorphes saussuritisés à résidus fréquents de basicité diverse (andésine-labrador). Par contre, dans les termes différenciés à tendance acide (dacitique à rhyolitique) de composition sodique, le plagioclase dominant est de l'albite ou plus rarement albite-oligoclase.

Aux études partielles du chimisme de ces laves de sillons réalisées sur les unités de Pama (Haute-Volta), Haute-Comoé et Katiola (Côte d'Ivoire) il convient d'ajouter les études plus récentes de I. YACE sur le volcanisme burnéen dans les parties centrale et méridionale de la chaîne précambrienne de Fettekro en Côte d'Ivoire réalisées en 1976.

Ces études ont montré que les laves basiques (basaltes, microgabbros doléritiques, appartiennent essentiellement à la série des tholéites, alors que les termes différenciés (andésites à rhyolites) se placent dans la série calco-alcaline sensu lato mais avec, dans une même unité, des caractères divergents qui permettent de voir que des termes différenciés de la série des tholéites coexistent avec des termes de la série calco-alcaline sensu stricto.

Du point de vue pétrogénétique I. YACE (1976) pense que: "un magma basaltique calco-alcalin peut donner des rhyolites par différenciation, mais en assez faible proportion. Etant donné l'importance des termes acides, le seul phénomène de différenciation ne peut suffire. Il faut envisager l'intervention d'un magma sialitique hybridant le magma basaltique, c'est-à-dire:

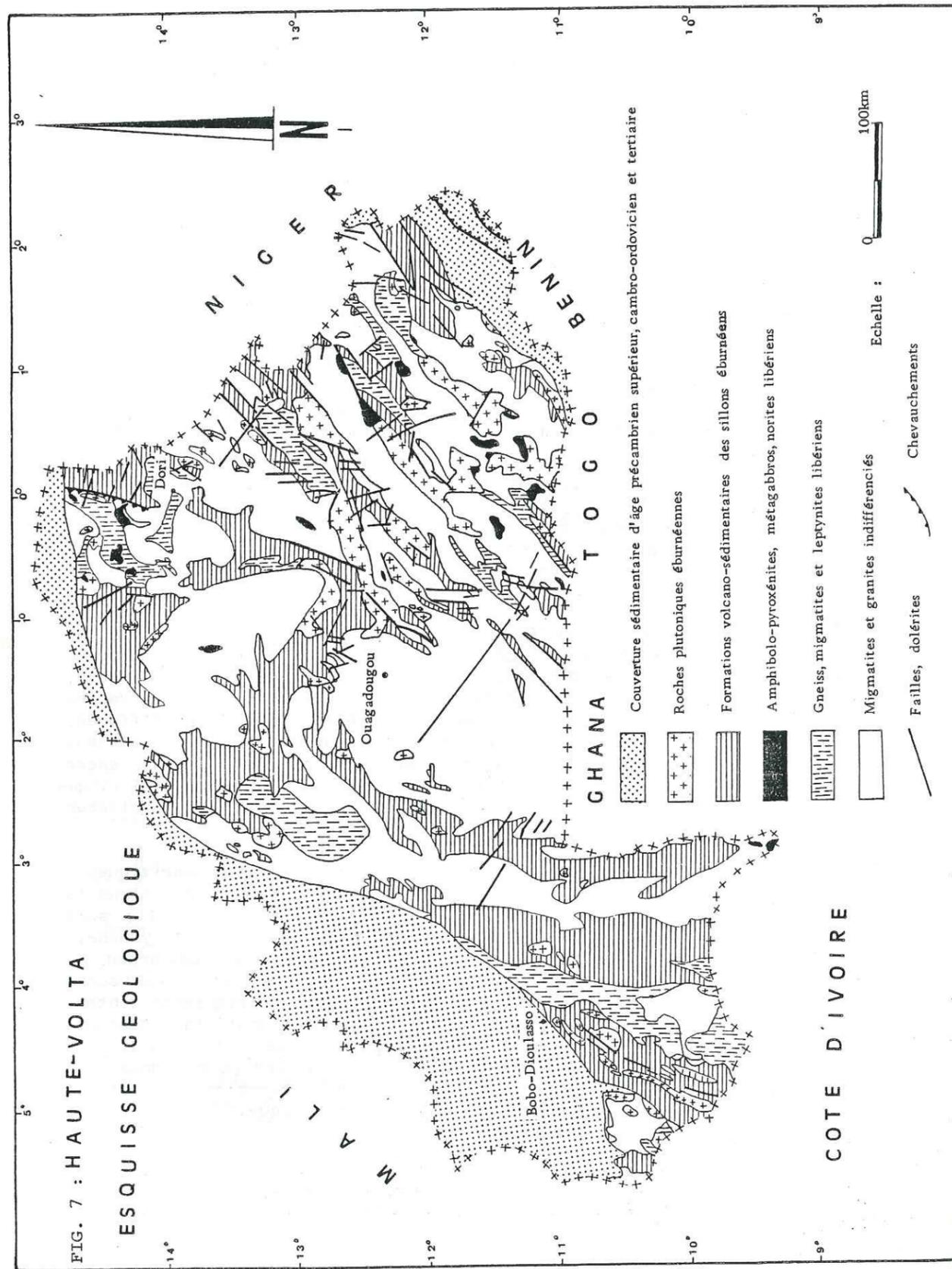
- 1/ deux tendances évolutives allant des gabbros aux rhyolites en passant par les dolérites, basaltes, andésites et dacites;
- 2/ un magma (sinon deux) d'origine basaltique, mantélique;
- 3/ un magma d'origine crustale anatectique;
- 4/ donc une évolution pétrogénétique complexe (avec au moins deux magmas originels)?

1.2.3.1.2. Les métasédiments associés

Des sédiments chimiques (jaspes et quartzites jaspoïdes, niveaux manganésifères quartzieux ou schisteux, schistes et quartzites ferrifères), carbonés (métaquartzites à méta-ampélites) et détritiques de faciès variés (méta-arkoses à métagrauweekes plus ou moins conglomératiques, grès tuffacés, schistes sériciteux et pyriteux, schistes argileux et argiles quartzieux varvés et fins) sont associés aux laves et aux pyroclastites. Ces séquences métasédimentaires intercalaires sont plus sensibles à l'altération latéritique que les laves ou les tufs qui les encadrent. De ce fait leur épaisseur est mal connue et leur importance souvent sous-estimée.

1.2.3.1.3. Intrusions subvolcaniques de diorites ou microdiorites quartziques

A Gongondy, Dienemera, Goren et Wayen Sud de petits massifs intrusifs de diorites ou microdiorites quartziques ont pu être décrits. Ils sont intéressants parce qu'ils sont minéralisés en cuivre et en molybdène, mais aussi parce que leur datation par la méthode potassium-argon (2 300 Ma environ) a permis de préciser l'âge des principales émissions de laves auxquelles ils sont associés et dont ils sont pratiquement contemporains, bien qu'y étant intrusifs. Ces intrusions dont la structure varie de grenue, à lattes de plagioclases automorphes pour les termes dioritiques, à microgrenue porphyrique et granophyrique ont pour composition minéralogique: plagioclase (oligoclase à andésine), hornblende, biotite, quartz, apatite, ilménite et un peu de feldspath potassique.



1.2.3.2. GROUPE METASEDIMENTAIRE TERMINAL

Ce sont des formations détritiques de comblement que l'on retrouve dans la zone axiale des grands sillons linéaires du Sud-Ouest (Banfora, Gaoua, Batié), soit plus ou moins largement étendues dans les unités du pourtour du môle de Ouagadougou (Ouahigouya, Djibo, Dori, Sebba, Diapaga), aux frontières avec le Mali et le Niger soit, plus accessoirement encore, en affleurements résiduels dans les unités internes (Fada-N'Gourma, Basiéri, Boulsa, Youga, Pama).

Ces sédiments détritiques grossiers à très fins, à intercalations charbonneuses fréquentes, plus rarement calcifères (para-amphibolites, schistes amphiboliques) ont été décrits par M. ARNOULD (1961) et B. TANGINI (1962) en Côte d'Ivoire dans des sillons prolongeant vers le Sud ceux de Banfora et ceux de Houndé, comme étant des flyschs. Notons que cette qualification de flyschs s'applique ici à un groupe métasédimentaire qui débute par des faciès grossiers de grauwaques et de grès conglomératiques, de grès tuffacés contenant des galets des roches volcano-sédimentaires sous-jacentes (laves, quartzites, jaspes, schistes). Les formations grésograuwaqueuses dont l'épaisseur à l'affleurement varie de quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres passent rapidement au sommet et latéralement à des schistes argileux plus ou moins quartzeux, à intercalations quartzitiques ou gréseuses réduites et parfois à stratification entrecroisée. Les schistes argilo-gréseux dominants présentent communément un faciès de sédimentation rythmique d'échelle décimétrique à centimétrique: succession de bandes centimétriques plus ou moins quartzes, granoclassements, faciès varvés à rubanement millimétrique.

1.2.4. LES ROCHES PLUTONIQUES

1.2.4.1. LES FORMATIONS BASIQUES

Dans les formations migmatitiques et de granites migmatitiques indifférenciées que nous avons décrites ci-dessus, on rencontre des septas d'ortho-amphibolites et d'amphibolo-pyroxénites schisteuses ou massives; des métagabbros plus ou moins différenciés (métagabbros noritiques mélanocrates à diorites et microdiorites quartziques).

Décrits seulement en massifs importants à la pointe sud de Batié à la frontière avec le Ghana et la Côte d'Ivoire, les septas basiques sont abondants dans l'Oudalan ainsi qu'à l'Est (bassin versant de la Komienga) et au Sud-Est (région de Tenkodogo - Zabré).

1.2.4.2. LES PLUTONITES COMMUNES AUX NOYAUX MIGMATITQUES ET AUX SILLONS

Nous avons déjà, en parlant des laves et pyroclastites, fait cas de roches grenues en massifs ou sills (diorites, gabbros, ultramafites) qui leur étaient associées et pratiquement contemporaines, ainsi que de petits corps circonscrits de microdiorites et microdiorites quartziques (type Diénémera, Gongondy, Goren, Wayen) pénécotemporains des laves différenciées datées de 2 300 Ma environ). Les autres types de plutonites peuvent se répartir en trois groupes:

- un complexe granodioritique à tonalitique d'origine profonde en intrusions plus ou moins diapiriques, localisé dans les zones bordières des grands sillons (Banfora, Houndé, Kiembara, Tenado, Korsimogh);
- un complexe prédominant de granodiorites et de granites de types divers (mésocrates à amphibole ou amphibole-biotite, à leucocrates à biotite rare ou biotite muscovite), particulièrement bien développé dans les secteurs de Thiou, Pissila Sud, Boulsa, Koupéla, Tenkodogo, Fada-N'Gourma et Nord-Est Pama.

- un complexe à tendance alcaline d'origine profonde (granodiorites, granites, syénites) associé à des venues basiques (ultrabasites, gabbros et diorites, avec en particulier le complexe des gabbros vanadifères de Tin-Edia dans l'Oudalan) et à des formations volcaniques à sub-volcaniques (granophyres et rhyolites dans l'Oudalan et l'Est de l'unité de Djibo). Les roches de ce complexe sont concentrées au Nord-Est (Oudalan) et au S.SE (région Pama-Diapaga). Quelques massifs sont connus ailleurs (Wayen, Zoungou, Sadba, Yabo).

1.2.4.2.1. Le complexe granodioritique à tonalitique

Les principaux massifs de ce complexe sont concentrés dans les régions du Sud-Ouest, du Centre et du Nord-Ouest.

- Dans le Sud Ouest, onze massifs principaux ont été cartographiés dont ceux de Tingréla, Koutoura et Léraba, alignés sur la bordure ouest du sillon de Banfora (terminaison nord en territoire voltaïque du grand sillon ivoirien granitisé de Ferkessédougou), cinq autres dans le bâti migmatitique adjacent à l'Ouest, et trois enfin dans les metabasites du sillon de Houndé, avec notamment le massif de Koumbia.

- Dans le centre Ouest et le Nord du môle de Ouagadougou, une dizaine de massifs jalonnent les marges du sillon en arc allant de Tenado à Korsimogho en passant par Kiembabara, Ouahigouya Arbolé et Séguénéga). Quatre massifs sont remarquables dans ce secteur par leur extension: Kiembra, Kossouka, Arbolé et enfin Niogotendga (sud de Korsimogho). Le massif de Saria est intrusif dans les migmatites.

Quelques massifs intrusent également le sillon Dano-Boromo et les migmatites à l'Ouest et au Nord de Pô. On connaît également des granodiorites au Nord Est (à Sebba puis au Nord-Est et Sud-Ouest de cette localité).

Les faciès pétrographiques des massifs varient, selon les régions, des termes mésocrates riches en enclaves basiques (amphibolo-biotitiques) à des termes à tendance leucocrate, homogènes (granodiorites ou granites tonalitiques). L'orthogneissification liée aux phases orogéniques postérieures varie depuis les termes schistosés d'orthogneiss granodioritiques épimétamorphiques jusqu'aux termes équants. Quelques exemples:

- Le massif de Tingrela correspond à une granodiorite mésocrate à hornblende, rétrotransformée à texture planaire. La foliation d'ensemble qui est Nord-Ouest, est légèrement discordante sur les métasédiments du sillon de direction N-S à N-NE. Le plagioclase est un oligoclase légèrement antiperthitique, fortement saussuritisé (séricite et épidote); le feldspath potassique est un microcline perthitique poecilitique; la hornblende hypidiomorphe est rétrotransformée en trémolite, chlorite et épidote. On note encore la présence de quartz interstitiel abondant à extinction roulante, de biotite chloritisée rare, de sphène, d'épidote, de zircon et d'apatite.

- Les massifs de Koutoura et de Léraba ont des faciès de granite ou de granodiorite leucocrate à quartz à tendance hypidiomorphe, microcline, parfois albitisé, oligoclase subautomorphe saussuritisé et séricitisé, biotites chloritisées, muscovite-séricite. La texture est planaire blastomylonitique, avec une schistosité conforme à celle des métasédiments adjacents. Des galets de la granodiorite de Koutoura ont été identifiés dans les conglomérats de base des métasédiments.

- Le massif de Koumbia est un massif circonscrit intrusif dans les formations du sillon dont il contient de nombreuses enclaves. Son faciès dominant est celui d'une granodiorite leucocrate à texture équante. Les indices de rétroformation se limitent à des zones de fracturation soulignant en général les limites du massif. L'intensité de cette rétroformation est comparable à celle trouvée dans les puissantes laves basiques encaissantes elles-mêmes peu transformées.

- Le massif de Kiembra comporte selon E.P. GANSONRE deux faciès: . un faciès grenu de base correspondant à une roche grenue, mésocrate, bien orientée suivant une direction N 28-30°, sécante avec celle des formations du sillon, et renfermant des enclaves de roches basiques ou de gneiss à grenats; . un faciès feldspathisé résultant d'une microclinisation irrégulière du faciès de base lors d'une phase de granitisation. Comme le faciès de base, le faciès feldspathisé renferme des enclaves basiques fusiformes et des enclaves gneissiques incomplètement assimilées. Les porphyroblastes de microcline se développent d'autant plus que la granodiorite est recoupée par des filons et des dykes de granite leucocrate.

- Le massif de Kossouka - Ses plus gros affleurements sont connus entre Bakou-Tiblega et Gambo. L'échantillon du puits de l'école de Kossouka montre un granite clair orienté et composé de quartz, orthose, oligoclase, hornblende, sphène, biotite (brune et ordinaire), apatite..

- Le massif de Niogotendga est essentiellement constitué par un granite akéritique ou une granodiorite leucocrate à hornblende, à texture équante, massive, chloritisée et saussuritisée, à nombreuses enclaves microgrenues amphibolitiques.

1.2.4.2.2. Granites syn à tardi-tectoniques

Ce sont des granites calco-alcalins, avec une évolution générale dans le temps depuis des termes granodioritiques ou de granite à biotite amphibole, suivis de termes granitiques communs à biotite, prédominants jusqu'à des termes potassiques à biotite-muscovite, ou leucocrates avec, pour ceux présumés être les plus tardifs d'entre eux, un gisement à caractère intrusif tardi-tectonique, net. C'est dire donc que les textures de ces roches vont varier depuis des faciès fortement planaires hétérogènes jusqu'aux termes équants massifs.

Granodiorites, granites à biotite-amphibole

C'est au Sud-Ouest, dans le sillon de Banfora, que les granodiorites qui y constituent quatre grands massifs sont les plus abondantes. La roche dominante qui a une texture plus ou moins fortement planaire, concordante avec la schistosité des métasédiments encaissants est une granodiorite porphyroïde, plus rarement un granite à amphibole, à plagioclases automorphes zonés avec microcline, biotite brun-vert, amphibole, épidote, chlorite, apatite, sphène, zircon, ilménite et magnétite. Les enclaves des schistes du sillon sont fréquentes et parfois l'effet du métamorphisme de contact se traduit par un développement d'andalousite.

A la bordure du sillon (à cheval entre métavolcanites basiques et acides et le bâti granito-gneissique) existent des granodiorites à contours intrusifs nets, texture équante au centre des massifs qui contiennent de nombreuses enclaves énallogènes de laves.

Des granodiorites similaires ont été identifiées dans le degré carré de Sebba où elles forment cinq massifs; on peut en rapprocher les roches composées d'un mélange de termes granodioritiques et de granites à biotite-amphibole du Centre Est et du Centre Sud Est (Boulsa, Koupéla, Tenkodogo, Fada-N'Gourma, Pama).

Granites à biotite, parfois à muscovite

Ces faciès prédominants, plus homogènes et plus leucocrates que les précédents sont très répandus dans la moitié est du pays (régions de Piéla, Weogtenga, Zorgho, Tenkodogo, Tangaye, Diabo, Yanmbi Fada-N'Gourma, Kouaré, Ouagaye et Metogoma).

Les granites de Piéla et de Weogtenga qui englobent les granodiorites de Boulssa ont une direction d'allongement nord-est en concordance à l'échelle régionale avec la foliation des migmatites. Ce sont des granites homogènes et clairs (gris à roses) à grain fin à moyen, à tendance monzonitique (microcline et oligoclase) à biotite et parfois rare muscovite, équants à légèrement planaires.

A Piéla, la muscovite apparaît concentrée dans les faciès schisteux en bordure du massif.

Tandis que le granite de Zorgho, intrusif dans les formations du sillon, est d'un faciès homogène à biotite et à muscovite (rare); le massif de Tenkodogo-Tangaye, Diabo-Yanmbi est hétérogène et correspond à une association de faciès porphyroïdes de granite à biotite et parfois à amphibole avec nombreux septas et enclaves de granodiorites (région de Tangaye-Diabo) et de granite à grain fin plus ou moins riche en biotite et magnétite (région de Yanmbi).

Les massifs de Kouaré, Ouargaye et Métagoma, dans le degré carré de Pama, sont des massifs nettement intrusifs dans les migmatites, présentant des faciès homogènes à grain fin ou moyen de microcline perthitique, albite, oligoclase, biotite abondante (formant parfois des cumulats fusiformes ou des enclaves en bordure des migmatites). Des filons de pegmatites et d'aprites de puissance décimétriques parcourent ces massifs.

Des faciès de granites à biotite ont été identifiés dans les régions de Fada-N' Gourma-Diapaga, mais aussi au Nord de Ouahigouya, où GAMSONRE les décrit sous appellation de panneaux de gneiss plagioclasiques de Thiou qu'il dit avoir des affinités avec la granodiorite de Béringa dont on a déjà parlé.

Granites à biotite et muscovite, pegmatites et aprites

Ce sont des granites dits de type Ferké définis par ARNOULD en 1961, comme étant des roches à texture blastomylonitique, leucocrates à quartz onduleux albite-oligoclase, microcline, micas flexueux, myrmékite, apatite, zircon et tourmaline commune. A ces granites sont étroitement liées des pegmatites à muscovite et tourmaline et à minéralisation caractéristique de columbo-tantalite, cassitérite et béryl pierreux.

Ces granites sont connus en Haute-Volta au Sud-Ouest (région de Ouangolodougou) au Centre-Ouest (Nord Tenado), au Sud-Est (au Nord de Tiébélé, au Centre-Est (Sud Zorgho) et enfin au Nord-Est (degré carré de Sebba).

Granites calco-alcalins en massifs circonscrits

Ce sont des massifs plus ou moins étendus de granites équants, leucocrates, à caractères calco-alcalins. Ils ont été identifiés dans les régions de Po-Tiébélé, Kaya-Goren et à Zogoré au Sud-Ouest de Ouahigouya.

1.2.4.2.3. Complexe alcalin ou à tendance alcaline

Ce sont des roches évoluant des termes granitiques à tendance alcaline à des faciès évolués de granites hypovolcaniques et de granophyres franchement alcalins. Ces formations sont connues surtout dans l'Oudalan et dans les régions de Pama-Diapaga.

Dans l'Oudalan où les principaux massifs sont ceux de Yalanga, Arbinda, Guesselnay et Pétoy, le granite de Déou peut être pris comme représentant le type alcalin: c'est une roche grenue homogène à gros grain riche en quartz associé à du microcline perthitique, de très rares cristaux d'albite-oligoclase interstitiels, quelques paillettes d'hastingsite, biotite et stilpnomélane, allanite et fluorine.

Les granophyres qui peuvent passer à des faciès microgranitiques apparaissent sous forme de bordure figée, subvolcanique auréolant la plupart des intrusions granitiques.

Dans la région de Pama-Diapaga où les massifs s'alignent en bordure de la falaise du Gobnangou (massifs de Diebiga, Tin-Dangou, Samboini, Arly, Bouabou et Fouanbouandi) celui d'Arly peut être pris comme type. C'est un granite équant, homogène, sombre, parfois porphyroïde, à quartz et microcline perthitique prédominants, albite-oligoclase parfois zonés, biotite brune rare, sphène, zircon, fluorine.

Les syénites de Wayen et de Zoungou, les granites alcalins de Sadba et de Yabo (bordure sud du sillon Kaya-Goren) sont à inclure dans les formations du complexe alcalin.

Les gabbros vanadifères de type Tin-Edia

Ils sont connus surtout dans l'Oudalan où ils forment des massifs intrusifs dans les gneiss et les migmatites. Ce sont des gabbros noritiques, à ségrégations lenticulaires de magnétite vanadifère.

Ils sont grenus, porphyroïdes ou bréchiques, exempts de toutes transformations rétro-morphiques et constitués de labrador, augite et hypersthène magnétite, hornblende brune, phlogopite, parfois rare quartz interstitiel.

1.2.5. STRATIGRAPHIE ET EVOLUTION GEOLOGIQUE DU SOCLE CRISTALLIN

Nous sommes ici en présence de formations métamorphosées et d'intrusions magmatiques diverses où jusqu'ici aucun fossile n'a été retrouvé. Nous allons donc avoir une stratigraphie qui s'appuiera surtout sur les datations géochronologiques, les rapports intrusifs-encaissants et les identités de faciès.

Les datations sont rares (moins d'une vingtaine sur tout le territoire).

Ce fait va nécessairement conduire à un travail d'extrapolation audacieuse, sinon tendancieuse, car ne reposant que sur des identités de faciès elles-mêmes quelquefois contestables.

Il est maintenant admis par la quasi totalité des géologues travaillant en Haute-Volta que l'essentiel de l'histoire géologique du socle s'est opérée au cours de deux mégacycles orogéniques principaux: l'orogénèse libérienne et l'orogénèse éburnéenne. Le problème reste de savoir quelles sont les formations qui reviennent à chacune des deux orogénies, surtout lorsqu'on s'adresse aux venues magmatiques dont la succession n'est pas encore certaine, quand bien même il demeure acquis qu'elles appartiennent à une des orogénies.

On aurait un cycle libérien qui se déroulerait entre 2700 et 2300 Ma auquel succéderait le cycle éburnéen de 2300 à 1500 Ma, avec des phases paroxysmales respectives à 2300-2600 et 2100-1800 Ma.

1.2.5.1. LES FORMATIONS LIBERIENNES DE HAUTE VOLTA

A la suite de nombreux auteurs dont M. ARNOULD et J. DUCCELLIER notamment G. HOTTIN et O.F. OUEDRAOGO rattachent au Libérien les gneiss, les leptynites les diverses migmatites, les migmatites et granites indifférenciés, mais aussi certaines formations basiques (amphiboles, pyroxénolites, métagabbro-noritiques) intrusives dans les migmatites.

ARNOULD classe les migmatites dans le Libérien (antécédemment désigné par Antébirrimien ou par Précambrien D par HOTTIN et OUEDRAOGO) en avançant cinq principaux arguments.

- 1/ Elles ont une grande analogie de faciès avec les migmatites du Dahomeyen du Dahomey (Bénin) et du Togo;
- 2/ Leur degré de métamorphisme est beaucoup plus intense que celui de l'ensemble des séries à faciès birrimien (éburnéen);
- 3/ Au sein du grand massif hétérogène de Dabakala (Côte d'Ivoire), le panneau de migmatites de la Comoé, qui couvre plus de 500 km² et dont l'architecture tectonique est très régulière, se trouve en discordance angulaire de 90° avec les séries du Haut N'Zi à faciès birrimien (éburnéen); celle-ci est orientée NNE-SSW ou NS, avec

des pendages verticaux ou subverticaux dirigés vers l'E. Les migmatites, dans la région de contact, sont orientés E-W ou WSW-ENE avec des pendages de 30 à 50° vers le Sud. Une étroite langue de granite alcalin à deux micas s'intercale entre les deux formations et masque les rapports exacts, mais la discordance cartographique jointe à la très forte différence d'intensité du métamorphisme ne laisse guère de doute quant à l'antériorité du panneau de migmatites par rapport à la série du Haut N'Zi;

4/ En plusieurs points dans divers massifs, l'orientation tectonique des migmatites est oblique par rapport à l'orientation générale NNE-SSW des séries type Comoé.

5/ Enfin, aucun des divers massifs de granite ne donne une auréole de migmatites.

Le rattachement des intrusions basiques amphibolo-pyroxénolites et métagabbros noritiques s'est fait à partir d'une seule et unique datation au potassium-argon sur une amphibolite de l'extrême sud du pays (Sud de Batié).

1.2.5.2. LES FORMATIONS EBURNEENNES

Les formations plissées et métamorphosées lors de l'orogénèse libérienne ont été arasées, puis fracturées suivant deux systèmes de directions principales N-NE à NE, N 60° W à N 80° W donnant ainsi naissance à des sillons intracratoniques envahis par la mer dans lesquels vont se dérouler les différentes phases du cycle éburnéen.

. Vers 2170 Ma: phase tectonomagmatique précoce marquée par la mise en place d'intrusions granodioritiques à tonalitiques et dépôt de formations volcano-sédimentaires. Nous retrouvons ici les laves et pyroclastites les métasédiments associés et les intrusions subvolcaniques de diorites ou microdiorites quartziques que nous avons eu à décrire et à localiser.

. Entre 2170 et 2100 Ma ont lieu les dépôts des formations sédimentaires du groupe terminal que l'on ne retrouve plus que dans la zone axiale des sillons les plus importants.

. Entre 2100 et 1950 Ma s'exercent les phases majeures de l'orogénèse éburnéenne qui viennent plisser et métamorphiser les formations des sillons. Une granitisation syn-à tardi-tectonique qui affecte aussi bien les sillons que le bâti libérien (qu'il régénère) marque autour de 2000 MA le paroxysme de cette orogénèse.

. Puis viennent se mettre en place les granites post-tectoniques à caractère alcalin entre 1 800 et 1 750, voire 1 500 MA.

Ceci est un résumé de la succession des événements proposée par G. HOTTIN et O.F. OUEDRACGO; celle que nous donne E.P. GAMSONRE ci-après comporte quelques variantes.

1. Avant 2 300 Ma . socle antébirrimien
2. 2 300- 2 170 Ma . fragmentation en horsts et grabens du socle antébirrimien
. phase principale de volcanisme basique
. mise en place des diorites et microdiorites quartziques;
- 3/ Autour de 2 170 Ma . mise en place des granodiorites d'origine magmatique sialitique profonde;
- 4/ Autour de 2 100 Ma . phase tectonique responsable de l'orientation des minéraux des granodiorites suivant la direction N 27 - 30° E;

5/ 2 100 - 2 000 Ma.

6/ 2 000 Ma.

7/ entre 2 000 et 1 800 Ma

8/ Depuis 1 800 Ma.

. migmatisation responsable des granites "gris" et des migmatites, celle-ci affectant principalement le matériau déjà métamorphique d'âge antébirrimien des horsts et les sédiments précoces birrimiens.

. phase principale de la sédimentation gresopélique birrimienne.

. épimétamorphisme général birrimien.

. mise en place des granites leucocrates, cette granitisation entraînant la microclinisation des granodiorites et la recristallisation silico-potassique de caractère métasomatique des granites "gris" et des migmatites.

. Début de la mise en place des dolérites non métamorphisées (dolérites "récentes" de certains géologues).

Notre étude n'a pas pour but principal l'étude pétrographique ou stratigraphique de tout le socle cristallin de Haute-Volta. Néanmoins en confrontant les différentes échelles stratigraphiques, le moins qu'on puisse dire est que l'unanimité est loin d'être acquise sur la nature et la succession des événements surtout, pour ce qui concerne les formations éburnéennes. Si l'on admet, par ailleurs, l'existence d'une orogénèse libérienne qui devrait elle aussi avoir ses migmatites, mais surtout ses granites tardifs, le problème de savoir quels sont parmi les granites ceux qui reviennent à l'orogénèse libérienne n'est point élucidé. La stratigraphie par similitude de faciès nous apparaît trop audacieuse et un recours aux datations radiochronologiques est indispensable.

Si dans les régions comme les Alpes dont la géologie est bien connue, des collines que l'on nous a accoutumés à appeler liasiennes sont maintenant attribuées au Dogger, il est à prévoir que les études géologiques détaillées du socle cristallin de Haute-Volta amèneront dans le moyen terme bien des géologues à modifier de fond en comble leur échelle stratigraphique.

1.2.6. APERÇU TECTONIQUE

L'architecture profonde du socle cristallin de Haute-Volta résulte des effets souvent conjugués des deux orogénèses libérienne et éburnéenne.

1.2.6.1- L'OROGENESE LIBERIENNE

Ses effets ont été pour la plupart du temps repris et voilés par l'orogénèse éburnéenne. Quelques grandes structures demeurent cependant identifiables, c'est le cas notamment:

- des structures synclinales complexes du gneiss de la série de Gouba dans l'Oudalan;
- de celles des môles granito-gneissiques de la région d'Oursi et de la moitié sud du degré carré de Dori;
- et des structures d'ensemble E-W des granites, migmatites et leptynites libériens de Fada-N'Gourma et de Diapaga, recoupées à l'échelle régionale par les structures Nord-Est de l'Eburnéen.

Dans le reste du pays, l'extension généralisée des altérites recouvrant les migmatites et granites migmatitiques du Libérien ne permet que des observations fragmentaires n'autorisant plus des interprétations d'ensemble. De plus, blastomylonitisation et recristallisation des granito-gneiss et des formations éburnéennes sur les bordures immédiates des sillons entraînent une accordance commune dans les régions de l'Ouest (Gaoua, Tougan) et de l'Est (Garango, Sebba) où les directions de foliation coïncident.

1.2.6.2. L'OROGENESE EBURNEENNE

Le cycle orogénique éburnéen débute par un stade de fracturation du bâti libérien suivant deux directions principales:

- une direction N-NE (prédominante sur la bordure ouest du môle de Ouagadougou) à franchement NE (prédominante cette fois à l'Est du bloc de granites et de migmatites indifférenciés de Ouagadougou);
- une direction N 80° W à N 60° W, bien marquée au Nord du môle de Ouagadougou (région de Ouahigouya, Séguénéga, Kaya, Boulsa, bordure sud de l'unité de Djibo, axe Bouroum) et de manière plus atténuée dans les autres secteurs soulignant des interruptions ou des décrochements caractéristiques sur les bordures des unités éburnéennes (secteur sud de Poura, zone de Diébougou et Est Gaoua).

L'intrusion des dykes doléritiques tardifs se fait suivant ces principales directions.

La fracturation donne naissance à des sillons à évolution subsidente différente selon les régions et dont le comblement se fait par des volcano-sédiments.

Après une phase tectonique légère et précoce, marquée par des intrusions de granodiorites (phase abronienne que définit TAGINI en Côte d'Ivoire en 1971), les volcano-sédiments sont recouverts par les formations du groupe sédimentaire terminal, et l'ensemble subit entre 2 100 et 1 950 Ma., les phases tectoniques majeures de l'orogénie éburnéenne:

Le socle en sort plus ou moins régénéré; les séries éburnéennes métamorphisées dans l'épizone, ou rarement dans la mésozone, sont fortement plissées pour donner soit des séries isoclinales à plis serrés et redressés (notamment dans les grands sillons de la bordure ouest du môle de Ouagadougou) soit des séries tectonisées (contacts faillés, chevauchements, écaillages), soit encore des structures complexes plus ou moins étroitement moulées en accordance aussi bien sur les noyaux externes du socle libérien que sur les masses de roches plus résistantes internes.

Nous retiendrons pour exemples quelques structures remarquables mises en évidence:

- accident de la bordure occidentale de l'unité de Dori, incliné vers l'Ouest et faisant chevaucher le socle sur les formations éburnéennes.
- en 1947, M. BUCHESTEIN et Y. MULLER ont émis l'hypothèse d'un écaillage du socle ou des formations éburnéennes charriées du Nord vers le Sud sur un autochtone éburnéen dans la bordure Nord-Est de l'unité de Kaya.

En dehors de quelques fracturations et rejeux accompagnés d'émissions doléritiques probables, la partie du socle qui nous intéresse est demeurée stable depuis 1 700 Ma.

Nous allons aborder le problème de la fracturation du socle en adoptant comme méthode d'approche l'analyse fréquentielle des linéaments tracés à partir de la vue satellite au 1/1 000 000 par Carlo TRAVAGLIA en 1979.

1.2.6.3. Analyse fréquentielle des directions linéamentaires

Sur un total de 1008 linéaments dénombrés sur l'ensemble du socle cristallin se sont individualisés trois directions principales:

- . Nord 30 à 40° Est,
 - . Nord 10 à 20° Ouest
- et 40 à 50° Ouest,

mais avec respectivement cependant des pourcentages faibles de 11,07, 10,89 et 9,03.

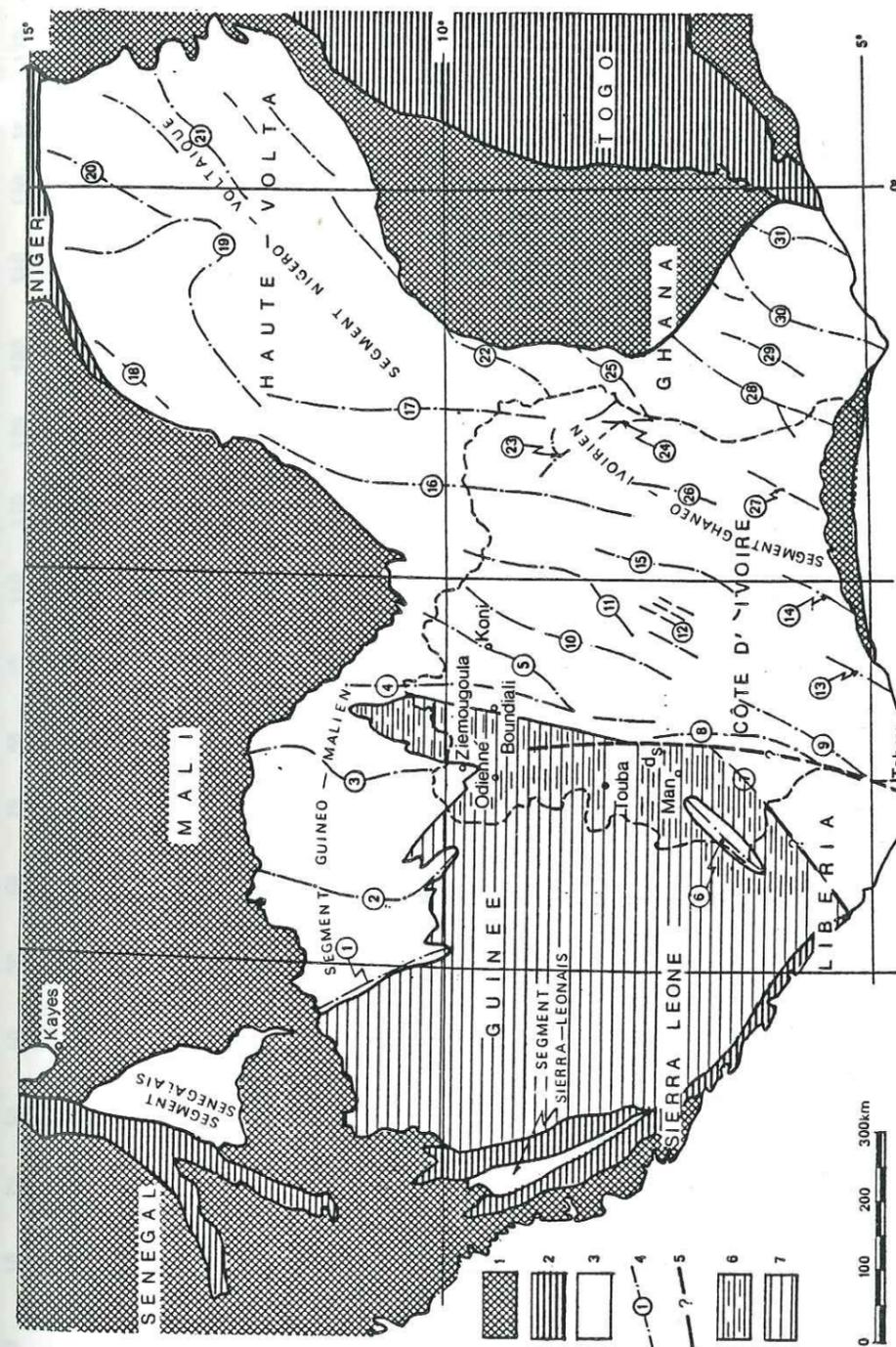


Fig. 8 - COMPLEXES FONDAMENTAUX DU MEGACYCLE EBURNEEN. SEGMENTS TECTOGÉNIQUES (au sud du 15ème parallèle). ORGANISATION STRUCTURALE DU GEOSYNCLINAL EBURNEEN.

1. Formations de couverture de la plateforme épi-éburnéenne.
2. Zones circumstructurales.
3. Géosynclinal éburnéen éburnéenne.
4. Axe d'intragéosynclinal.
5. Discontinuité du Sassandra (prolongée d'après WILSON, 1968).
6. Semi-platforme éburnéenne.
7. Socle épilibérien.
8. Désignation des intragéosynclinaux: 1. de Kouroussa 2. du Gouala. 3. du Baoulé. 4. de la Bagoé. 5. de Diakouala. 6. de Toulepleu. 7. Fo-Trou. 8. de Nigré. 9. Hana-Lobo. 10. du Haut Bandama. 11. du Haut Nzi. 12. du Yaouré. 13. de Louge-Kounoukou. 14. du Go. 15. de Fétéko. 16. de la Haute-Comoé. 17. de la Haute-Comoé. 18. d'Ouahigouya. 19. de Kongoussi. 20. de Dori. 21. de la Sirba. 22. Dokurupe-Nangodi. 23. des monts Boutourou. 24. de Bondoukou. 25. de Banda. 26. de Bon-gouanou. 27. de la Mf. 28. Afémas-Bibiani. 29. Mansu-Kwanta. 30. de Tarkwa. 31. de Kibi.

B. Tagini (1971)

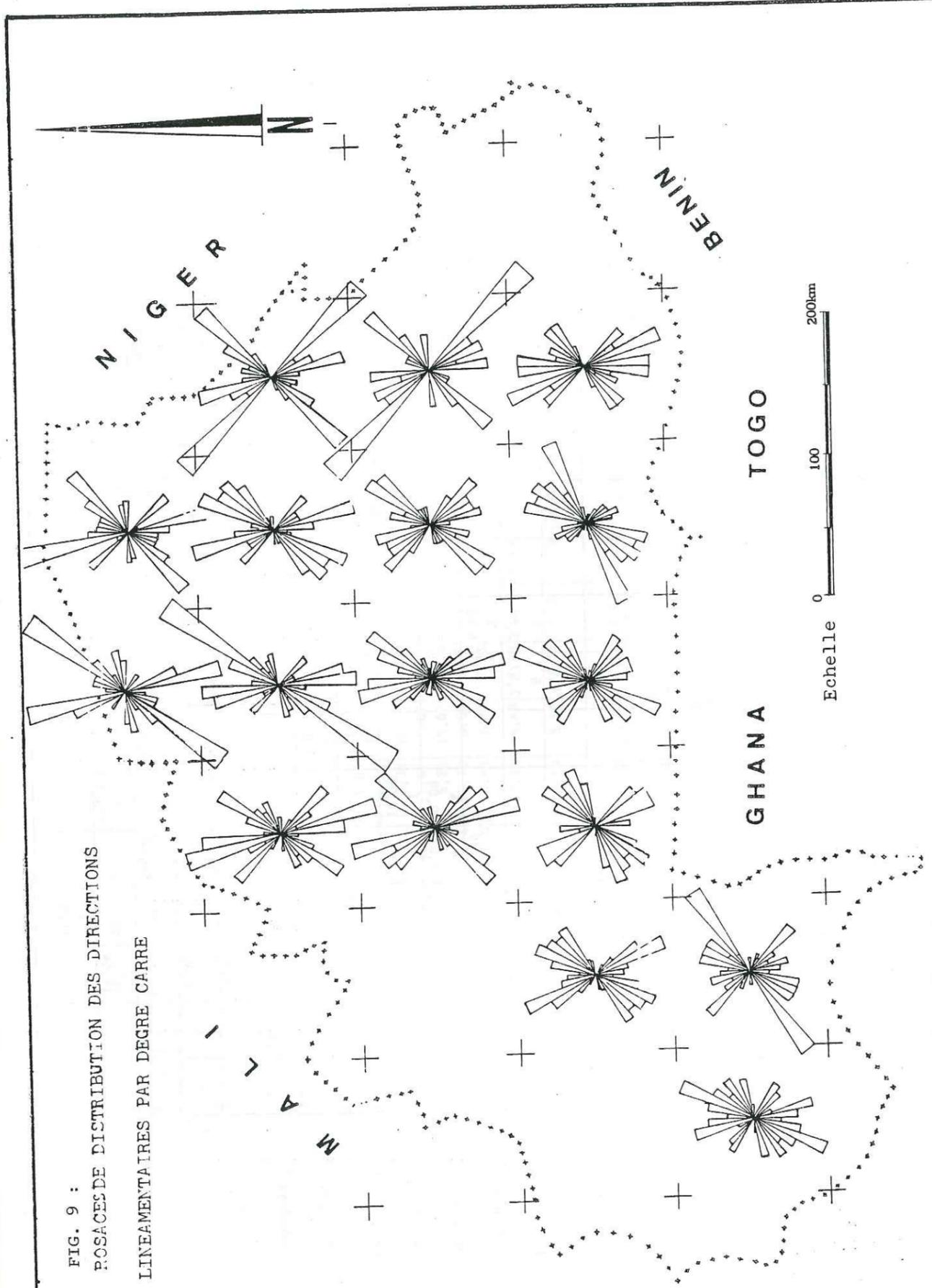


FIG. 9 :
ROSAEED DE DISTRIBUTION DES DIRECTIONS
LINEAMENTAIRES PAR DEGRE CARRE

COTE D'IVOIRE

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
Image satellite du B.V. Sissili 1/200 000	3,41	2,45	2,45	3,0	6,68	15,94	21,59	1,77	0	0	0	0	1,23	13,22	20,98	5,45	4,09	0,82	
Ranch de Léo au 1/50 000	0,28	0,56	0,85	1,41	4,23	11	10,1	9,58	12,39	12,11	8,73	8,45	5,92	6,76	4,51	1,41	0,28	0	
Environs Pô au 1/50 000	2,22	1,67	5,56	4,44	7,22	11,67	5,56	3,89	1,11	6,11	3,89	8,33	11,47	7,78	4,44	7,78	3,89	2,78	
Fissures à l'affleurement B.V. Sissili	7,91	6,51	3,26	4,65	3,72	6,51	3,26	12,09	5,12	3,72	1,86	9,30	5,12	4,65	12,09	5,58	1,86	2,79	
Foliations - B.V. Sissili	8,57	22,86	10	4,29	5,71	1,43	2,86	8,57	5,71	0	2,86	2,86	1,43	1,43	5,71	1,43	0	0	
Directions des filons	19,05	0	4,76	9,52	9,52	0	0	9,52	0	0	14,29	0	4,76	0	4,76	9,52	0	14,29	
Degré carré Léo	0	0	7,81	10,94	7,81	9,38	10,94	7,81	1,56	1,56	0	1,56	0	9,38	10,94	10,94	3,125	6,25	
Degré carré Pô	1,12	4,49	13,48	5,62	10,11	5,62	7,87	2,25	1,12	1,12	2,25	3,57	8,99	7,87	2,48	7,87	7,87	6,74	

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
Linéaments B.V. Sissili 1/200 000																				
3																				
3,41							2?													
Ranch de Léo 1/50 000e							21,53													
2																				
11,0																				
Environs de Pô 1/50 000																				
4																				
5,56																				
Directions Foliation																				
1																				
22,88																				
Directions des filons																				
3																				
1																				
19,05																				
9,52																				
Fractures B.V. Sissili																				
6																				
4,65																				
7,91																				
1																				
20,98																				
3																				
6,76																				
3																				
7,78																				
3																				
9,52																				
3																				
12,01																				

Tableau 6 - DISTRIBUTION DES PICS FREQUENTIELS DE DIRECTIONS LINEAMENTAIRES PAR DEGRE CARRE OU PAR REGION

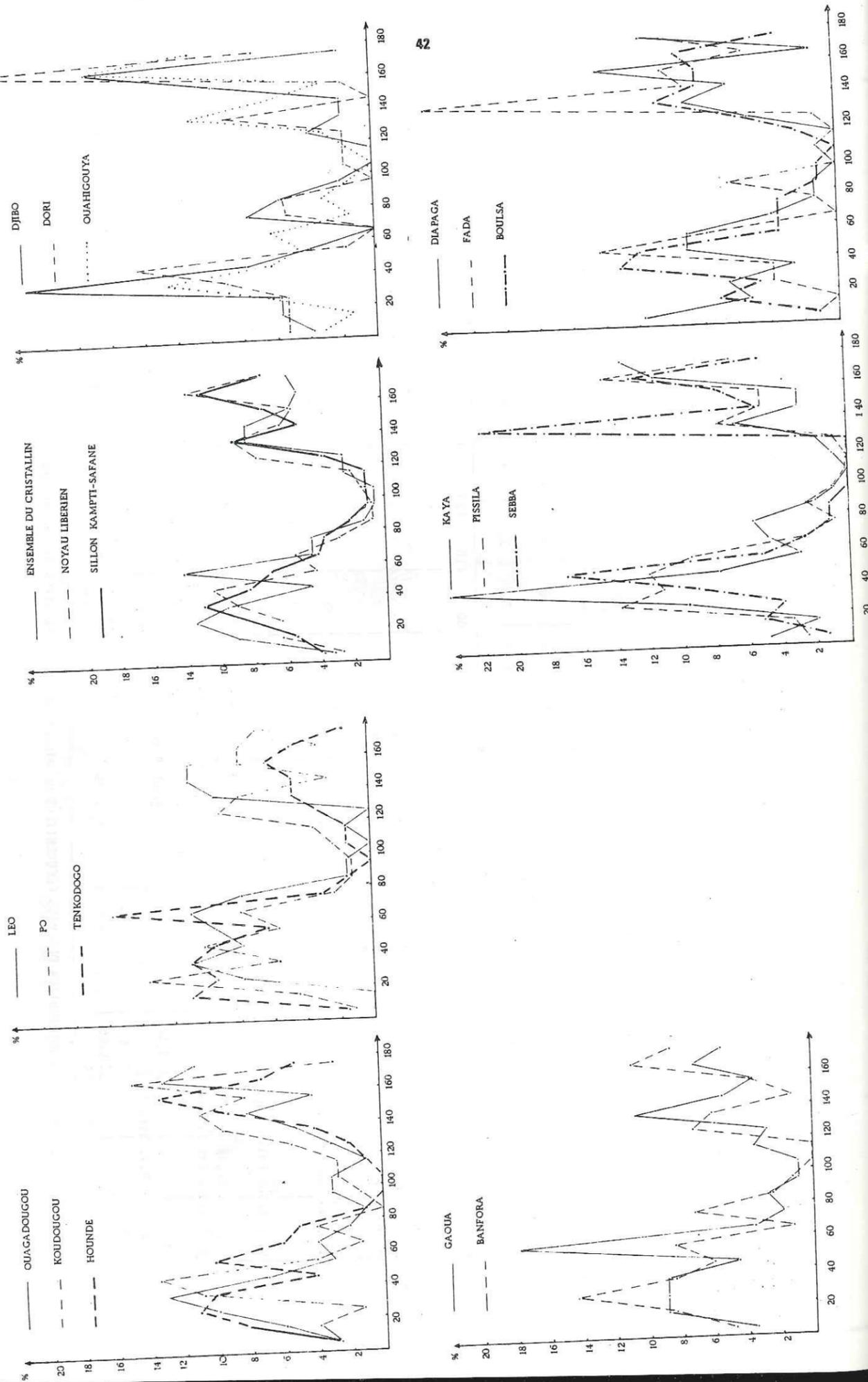


Fig. 10

Il ressort néanmoins que dans une prise en compte des linéaments dans leur ensemble toutes les directions apparaissent et ce avec des pourcentages supérieurs à 1. Il apparaît donc nécessaire de faire une analyse sectorielle, afin de voir comment s'expriment les différentes directions linéamentaires en fonction des régions. Nous allons pour cela faire une analyse fréquentielle par degré carré et par zone géologique.

L'analyse par degré carré

Les rosaces de distribution des directions linéamentaires ainsi que les graphes correspondant au tableau, font apparaître de nombreux pics fréquentiels qui peuvent se regrouper autour des directions, N 20°, N 40°, N 70°, N 140° et N 160°. Le tableau donne le numéro d'ordre des pics et leur pourcentage respectif dans un même degré carré ou dans une région donnée. Généralement, et pour une région donnée ne se différencient que trois ou quatre pics.

Analyse par zone géologique

Prenons pour zones d'étude le môle granito-migmatitique libérien de Ouagadougou et le sillon éburnéen Kampti-Safané. Le premier présente trois pics importants N 40-50°, N 130-140°, N 169-170°, puis un quatrième très réduit N 60-70°. Le sillon éburnéen montre trois importants pics N 20-30°, N 50-60° et N 130-150°. En dehors de la direction N 130-150°, les pics sont différents pour les deux domaines géologiques. Ce fait explique bien que lorsque nous prenons en compte un degré carré qui est un espace arbitraire n'ayant aucune signification géologique, il apparaît des hétérogénéités de distribution liées à celles d'ordre géologique existant au sein du degré carré. Mais plutôt qu'une hétérogénéité géologique des degrés carrés, c'est la géotectonique de l'ensemble du cristallin qui peut aider à comprendre la distribution des pics.

Nous avons déjà eu à donner les directions dans lesquelles le bâti libérien s'est fracturé pour donner naissance aux sillons éburnéens.

Lorsque nous considérons l'organisation d'ensemble du "géosynclinal" éburnéen que donne B. TAGINI (1971), on constate que les sillons intracratoniques changent de direction depuis le Sud Ouest ivoirien vers le Nord-Est de la Haute Volta, et ceci par l'intermédiaire de discontinuités:

- discontinuité de la Léraba au linéament de St Paul (Ghana);
- discontinuité de Bamako (Mali) à partir de laquelle les directions NNE-SSO deviennent N-S;
- discontinuité de la Volta Rouge, de Lamakara (Togo), Koudougou (Haute-Volta), San (Mali), à partir de laquelle les directions deviennent NE-SO et NO-SE.

Les discontinuités partagent le bouclier Baoulé-Mossi en trois blocs structuraux:

- bloc A ou bloc Baoulé caractérisé par des sillons NNE-SSW;
- bloc B ou bloc de Léo caractérisé par des sillons d'orientation NS;
- et bloc C ou bloc mossi, dont les sillons éburnéens présentent deux directions NE-SW et NW-SE.

L'ensemble du socle cristallin de la Haute-Volta appartient aux deux derniers blocs.

Or au niveau de la distribution des directions linéamentaires, les pics fréquentiels sont les suivants: N 40° (NE-SO); N 140° (NE-SO), N 160° (NNE-SSO), C'est-à-dire des directions propres aux blocs C et A; tandis que celles N-S caractéristiques du bloc B n'apparaissent que rarement dans les degrés carrés de Koudougou, Boulsa, Diapapaga, Tenkodogo si on l'assimile aux pics N 0 - 20°, ou dans les degrés carrés de Kaya, Fada N' Gourma, Léo dans le sillon éburnéen Kampti-Safané quand on l'identifie aux pics N 170°-N 180°.

On voit bien en considérant l'ensemble du socle cristallin que les directions linéamentaires correspondent bien à celles des sillons éburnéens, à celles des failles régionales mises en évidence et aux directions des intrusions doléritiques.

L'analyse de la distribution des directions linéamentaires vue de satellite au 1/1000 000, il ressort que l'on peut retrouver au niveau d'un document de ce type la multiplicité des directions tectoniques caractéristiques du socle voltaïque.

Cette caractéristique est liée à la conjugaison des effets des orogènes libérienne et éburnéenne. En effet, selon B TAGINI, si les directions tectoniques du socle libérien sont proches de la direction éburnéenne générale, on aura un style dit ivoirien caractérisé par des "intragéosynclinaux" rectilignes et unidirectionnels auquel on oppose un style dit voltaïque caractérisé par des sillons désordonnés surtout curvilinéaires très arqués, et multidirectionnels dus au fait que les directions tectoniques libériennes étant très différentes des directions éburnéennes, les structures de la dernière orogénèse se moulent sur les noyaux anciens (structures curvilignes) ou remplissent les fossés ouverts dans le socle (structure en palme ou en doigts de gant).

Signalons pour terminer qu'au niveau de la quasi totalité des graphes de distribution des directions linéamentaires apparaît entre N 90 et N 120° une lacune où l'on ne retrouve pas de linéaments. Cette remarque aura son importance en prospection au sol, car l'adoption de la direction N 110° pour les profils de traîné électrique ou de magnétométrie permettrait de recouper quelle que soit la région toutes les classes de linéaments existants si la lacune constatée n'est pas seulement liée au sens de balayage du satellite que l'on sait être Est-Ouest.

1.2.6.4. MOBILITÉ RELATIVE DES COMPARTIMENTS DU BEDROCK FISSURÉ

Avec le cycle éburnéen ont pris fin les grands mouvements tectoniques ayant affecté le socle cristallin de Haute-Volta. L'ancienneté de ces mouvements (1 400 Ma) auxquels ont succédé les phases d'érosion qui ont conduit à une pénéplanation généralisée des formations du socle, laisse entrevoir une certaine stabilité de ce bloc cristallin. Mais si dans l'ensemble l'immobilité est le trait marquant de cette région appartenant au bouclier ouest africain, celle-ci est quelquefois perturbée par des rejeux locaux se produisant au niveau des compartiments du socle fissuré, ainsi:

- A Bollé (sous préfecture de Barsalogo) la foration au marteau fond de trou sur une faille repérée par traîné électrique dut s'arrêter suite à un rejeu local de compartiments suivi d'une ouverture des lèvres jusqu'à la surface entraînant ainsi des pertes énormes de pression d'air.

- Un tel phénomène de rejeu à l'ouverture devait être la cause d'un sondage électrique tronqué que nous avons réalisé dans la vallée de la Bougouriba en mars 1978: dans les 15 premiers mètres on constata une absence totale de courant dans la direction perpendiculaire à la fracture et une fois dans la nappe les circulations reprurent. C'est ce que nous qualifions d'effet d'écran et dont nous reparlons dans le chapitre réservé à la géophysique.

- A Bar (sous-préfecture de Solengo) en zone de socle recouvert de formations sédimentaires des mouvements de cette nature amenèrent le débordement d'un puits traditionnel situé sur la fracture. Nous n'avons cependant pas noté comme dans le cas de Bollé une fissuration de la cuirasse

latéritique présente. Ce qui fait penser que le rejeu s'est produit profondément et sans intéresser la couverture. Le débordement du puits indique ici un rejeu de compression.

- Les rejeux locaux se traduisent aussi quelques fois par des secousses sismiques légères (Kossouka, Bougué en Juillet 1965).

Donc figé dans son ensemble le socle cristallin de Haute-Volta connaît des rejeux locaux de ces compartiments fissurés.

Nous avons écrit ces lignes sur la mobilité des compartiments fissurés du bedrock avant les importants tremblements ayant affecté la Guinée les 22 et 24 Décembre 1983. Ces événements qui viennent après d'autres manifestations sismiques, mais de moindre importance comme celles de la Mauritanie (1971) et du Mali (1976) remettent en cause la notion même de stabilité d'ensemble donnée pour être une des caractéristiques principales du bouclier ouest africain, bien qu'aucune explication ne leur soit encore trouvée.

CONCLUSION

La géologie du socle cristallin de Haute-Volta est diversifiée. Les études qui amèneront à une connaissance et à une compréhension de la nature et de la succession des événements ayant affecté les formations du socle n'en sont qu'à leur début. C'est la raison pour laquelle, lors de notre étude hydrogéologique du bassin versant de la Sissili, nous aborderons les points de vue géologique et géochronologique de cette partie sud du môle granito-magmatitique de Ouagadougou que limitent à l'Ouest, au Nord et à l'Est les sillons éburnéens de Batié-Hondé-Yako, de Kongoussi et de Manga.

II . ETUDE REGIONALE DU BASSIN VERSANT DE LA
SISSILI

2-1 APERÇU SUR LA GÉOGRAPHIE DU BASSIN VERSANT
DE LA SISSILI.

2-2 GÉOLOGIE DU BASSIN VERSANT DE LA SISSILI.

2.1- APERCU SUR LA GEOGRAPHIE DU BASSIN VERSANT DE LA SISSILI

2.1.1. INTRODUCTION

Situé au Sud du territoire voltaïque, le bassin versant de la Sissili, qui couvre une superficie de 6 120 km², sépare les eaux de la Volta Noire de celles de la Volta Rouge. La Sissili n'est d'ailleurs qu'un important affluent de ce dernier fleuve dans lequel il se jette en territoire ghanéen.

Le bassin versant de la Sissili est entièrement compris entre les longitudes 1° et 2°30' Ouest et les latitudes 11° et 12° Nord. Il est donc à cheval entre les degrés de Léo et de Pô. SAGATSKY désigne par l'appellation Tenkodogo Ouest la région à laquelle appartient le bassin de la Sissili sur les feuilles 1/500 000 .

2.1.2. LE RELIEF

La Sissili coule sur un plateau monotone, très peu accidenté et légèrement incliné du Nord vers le Sud. Le cours de la rivière qui est orienté Nord Sud entre Thyou et Tabou devient Nord-Ouest - Sud-Est entre Tabou et la frontière avec le Ghana. Dans ce pays, le cours de la Sissili reprend encore sa direction nord-sud.

Du point de vue morphologie, on peut distinguer deux parties dans le bassin versant de la Sissili: une partie nord à relief peu contrasté avec d'abondantes cuirasses latéritiques dissimulant un bedrock qui n'affleure que rarement, une deuxième partie aux cuirasses décapées ne laissant subsister que des buttes témoins cotoyées alors par de nombreux dômes granitiques. Ce phénomène est lié à l'érosion régressive du cours d'eau, et il est donc logique que les hauts sommets du Nord situés autour de Thyou soient constitués de buttes latéritiques, alors que ceux du Sud sont des dômes de substratum dénudés.

C'est néanmoins au Sud qu'on rencontre le plus haut sommet du bassin versant de la Sissili constitué par le dôme de granite rose de Pichikalia avec 439 mètres d'altitude.

2.1.3. LE RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

La Sissili prend naissance au Nord-Est du village de Thyou sous le nom de Koutiala. Entre Thiou et Tabou, elle reçoit l'Assipio, son principal affluent de rive droite grossi par la Kaboutola. Puis vient encore s'y jeter en rive droite, la Boufora, avant qu'elle ne recueille, en rive gauche, les apports de Dewevele et Mazinga. Un aspect remarquable du réseau hydrographique est la disparité de sa densité entre la partie nord du bassin (avec 0,277 km/km²) et sa partie sud-est (0,380 km/km²). Nous en donnerons une explication plus loin.

2.1.4. LA VÉGÉTATION, LA FAUNE

Le bassin versant de la Sissili présente une végétation de type savane arbustive avec un tapis de hautes herbes parsemé de grands arbres. La densité de la végétation croît vite du Nord au Sud où on peut même parler de forêt claire.

La faune très variée du bassin versant est composée essentiellement d'éléphants, bubales, hypotraques, cynocéphales, singes roux, de plusieurs variétés de biches (guibs harnachés, biches cochonnes, etc.), de phacochères et de quelques lions.

La région connaissait avant les années 1975 deux fléaux qui sont à la base de son sous-peuplement (la densité de la population était ici inférieure à 20 habitants/km², alors qu'elle dépassait les 60 habitants/km², dans certains secteurs du plateau Mossi): la maladie du sommeil et l'onchocercose ou la cécité des rivières. La première était déjà en régression, mais le fait important est le travail d'éradication de l'onchocercose entrepris par l'OMS, et qui se fait par l'élimination des simulis qui sont les mouches vecteurs de la maladie. Ces mouches ont maintenant presque toutes disparu rendant aisés les jaugeages des rivières, au cours desquels de nombreux opérateurs de l'H. E.R. ont attrapé par le passé l'onchocercose. L'assainissement a rendu possible l'occupation des zones fertiles par des populations (peulhs et mossi surtout) chassées du Nord par la longue sécheresse qui sévit depuis 1973.

Un fait lié au repeuplement est celui du déboisement intensif. Il y aurait lieu, si l'on ne veut pas voir s'installer rapidement une sahelisation de la région d'ordonner et de planifier les coupes de la végétation. Ce qui ne peut se faire sans un encadrement et une formation adéquats des migrants qui jusqu'ici sont abandonnés à eux-mêmes, dès lors que leurs déplacements ne s'effectuent pas sous l'égide de l'autorité de l'aménagement des vallées des Volta.

2.1.5. LE CLIMAT

2.1.5.1. LA TEMPERATURE

Son évolution est régulièrement suivie à Léo où la météorologie nationale dispose d'une station vieille de plus de 40 ans. Nous ne donnerons dans les tableaux qui vont suivre que les moyennes des températures journalières, mais aussi celles de leurs minimas et maximas. Ces données permettent de voir les limites entre lesquelles varie la température en fonction des périodes de l'année.

Tableau 7- Moyenne des températures sous abris (°C.)
Période 1971-1980

	J	F	M	A	Mai	Juin	Juil.	Août	S	O	N	D
Température minimale TN	18,4	20,7	23,5	24,7	24	22,3	21,6	21,2	21,0	21,3	18,9	17,6
$\frac{TN + TX}{2}$	26,3	28,6	30,5	31,1	29,7	27,4	26,0	25,5	25,9	27,4	27,2	25,8
Temp. max. TX	34,6	36,8	37,5	37,5	35,3	32,4	30,3	29,8	31,1	33,4	35,4	34,1

On remarque que si l'écart journalier entre les températures maximale et minimale est souvent important; les températures maximale et minimale qu'on enregistre aux mêmes heures de la journée varient dans des limites étroites (7 à 8 °C.)

2.1.5.2. L'HUMIDITE ET L'EVAPORATION

Contrairement à la température, l'humidité relative varie beaucoup au cours de l'année, en raison bien sûr de l'existence alternée d'une saison humide et d'une saison sèche.

Moyenne de l'humidité relative sous abri (%)
Période 1971-1980

Tableau 8

Heure	J	F	M	A	Mai	Juin	Juil.	Août	S	O	N	D	Année
08	26	27	41	61	72	79	86	90	87	56	49	34	59
12	17	27	27	40	52	63	71	74	70	57	27	21	46
	18	17	25	37	48	60	70	75	73	61	34	27	45

L'évaporation qui varie en sens inverse de l'humidité relative est également mesurée à la station de Léo à l'évaporimètre PICHE. Pour l'ensemble du bassin versant de la Sissili, on peut dire que l'évaporation varie entre les données de la station de Léo au Sud et celles de la station de Koudougou au Nord, que nous regroupons dans le tableau ci-dessous:

Tableau 9

Evaporation mesurée à Léo et à Koudougou en mm

	J	F	M	A	Mai	Juin	Juil.	Août	S	O	N	D	Année
Léo	430,1	409,0	364,8	267,9	187,8	121,0	87,8	62,6	61,9	103,6	236,2	292,2	2625
Koudougou	318,2	326,4	347,9	274,9	297,7	136,0	93,8	63,8	66,7	130,9	240,3	270,5	2567

2.1.5.3. LES VENTS

Le bassin versant de la Sissili connaît les mêmes vents (Harmattan, Alizé, Mousson) que le reste du territoire de la Haute-Volta. L'importance de la couverture végétale atténue les effets de l'Harmattan et rend le climat plus doux qu'à Ouagadougou toute l'année durant.

LES FACTEURS DU BILAN HYDROLOGIQUE

Nous avons pu les évaluer lors de notre étude de 1973-1975 (SAVADOGO A., 1975). Dans ce qui va suivre, nous ne ferons que rappeler les traits essentiels du bilan.

2.1.5.4. LES PRECIPITATIONS

Les équipements de mesures pluviométriques n'ont pas pu être étoffés par rapport au dispositif mis en place en 1974. Nous pensons néanmoins que la distribution géographique des stations maintenues est telle qu'elle permet d'avoir une bonne appréciation des précipitations sur l'ensemble du bassin versant de la Sissili. Les mesures des précipitations ont été effectuées en effet, aux stations de Léo, Pô, Sapouy, Gao et Thiou.

Tableau 10

Moyenne pluviométrique (en mm)
Période 1971-1980

	NJ	J	F	M	A	Mai	Juin	Juil.	Août	S	O	N	D	Total
Léo	70	2,2	1,1	14,1	34,5	97,7	104,4	191,1	261,3	156,5	53,0	0,3	3,0	919,2
Pô	57	1,4	0,2	10,2	26,3	86,2	103,9	168,8	204,2	150,2	53,1	1,2	2,7	808,4
Sapouy	59	0,6	0	12,2	32,0	60,2	95,2	172,0	239,6	143,3	47,7	0,8	2,2	805,8
Gao	64	0,1	0	6,6	29,7	60	110,9	181,5	244,9	137,1	27	2,9	0,3	801,0
Thiou	64	0,1	0	8,6	28,5	51,2	94,0	167,8	218,3	147,9	50,4	1,1	4,8	772,7

Période 1961-1970

	J	F	M	A	Mai	Juin	Juil.	Août	S	O	N	D	Total	N.J
Léo	2,0	7,0	18,9	60,9	100,2	142,9	196,3	303,2	183,8	42,7	6,9	1,5	1066,9	68
Po	1,3	8,7	16,8	50,7	73,8	153,9	204,5	266,1	184,5	40,5	6,9	3,1	1010,8	69
Sapouy	0,4	2,2	16,2	43,7	75,1	121,8	168,4	265,1	171,1	38,9	8,1	4,9	915,9	66

Une comparaison des précipitations de la période 1971-1980 avec celles de la décennie précédente montre que, comme partout en Haute-Volta, la période 1971-1980 est marquée au niveau du bassin versant de la Sissili par une régression générale des hauteurs d'eau pluviale annuelle d'au moins 100 mm par an dans toutes les stations. La moyenne des hauteurs annuelles est néanmoins restée supérieure à 800 mm pour l'ensemble du bassin versant de la Sissili pendant la période 1971-1981.

2.1.5.5. LE RUISSELLEMENT

Nous avons voulu ajouter à la station de Nébou, que nous avons installée en 1974 et qui permettait d'avoir le bilan hydrologique de la Haute Sissili, la station de Kounou dont le but était double: permettre l'établissement d'un bilan global de la Sissili en Haute-Volta, mais aussi une comparaison entre le ruissellement de la Haute et de la Basse Sissili. Chose qui nous était apparue intéressante, eu égard à la différence de densité du réseau hydrographique entre les deux parties du bassin versant. Malheureusement, les difficultés d'accès de la station de Kounou qui est coupée entièrement des grands axes dès la fin du mois de Juin, ont conduit à l'échec de deux tentatives de jaugeage de longue durée.

En trois ans, nous n'y avons obtenu qu'un seul enregistrement complet des hauteurs d'eau grâce au limnigraphe OTT R 20 installé en Mars 1979 (tableau 11)

Le bilan que nous donnerons n'est donc strictement valable que pour la Haute Sissili.

	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre
1		75	108	212	318	122
2		74	106	180	332	120
3		73	104	164	318	120
4		72	103	151	305	122
5		072	105	144	300	120
6		72	123	148	309	119
7		70	156	173	307	117
8		70	165	177	291	115
9		112	150	187	269	113
10		208	128	202	-	111
11		230	116	219	-	110
12		222	111	231	239	109
13		202	110	243	222	109
14		186	109	250	211	109
15		170	108	256	201	112
16		155	108	262	189	112
17		145	129	265	178	110
18		135	154	261	170	109
19		127	147	247	164	108
20		124	148	226	157	107
21		117	182	203	154	106
22		112	172	186	152	105
23		109	171	183	154	104
24		108	200	207	151	104
25		120	193	231	143	104
26		122	180	-	137	105
27		148	185	-	136	107
28		142	199	-	131	109
29	78	123	205	-	127	114
30	77	112	206	275	124	117
31	76		199			113

Tableau 11 Station de Kounou sur la Sissili
Hauteurs d'eau journalières (en cm)- Année 1980

Nous avons réalisé en 1974, 12 jaugeages qui ont permis de tracer la courbe de tarage de la Sissili à Nébou à l'aide de laquelle nous avons établi le barème de la rivière et calculé les volumes d'eau écoulés à travers la section de jaugeage.

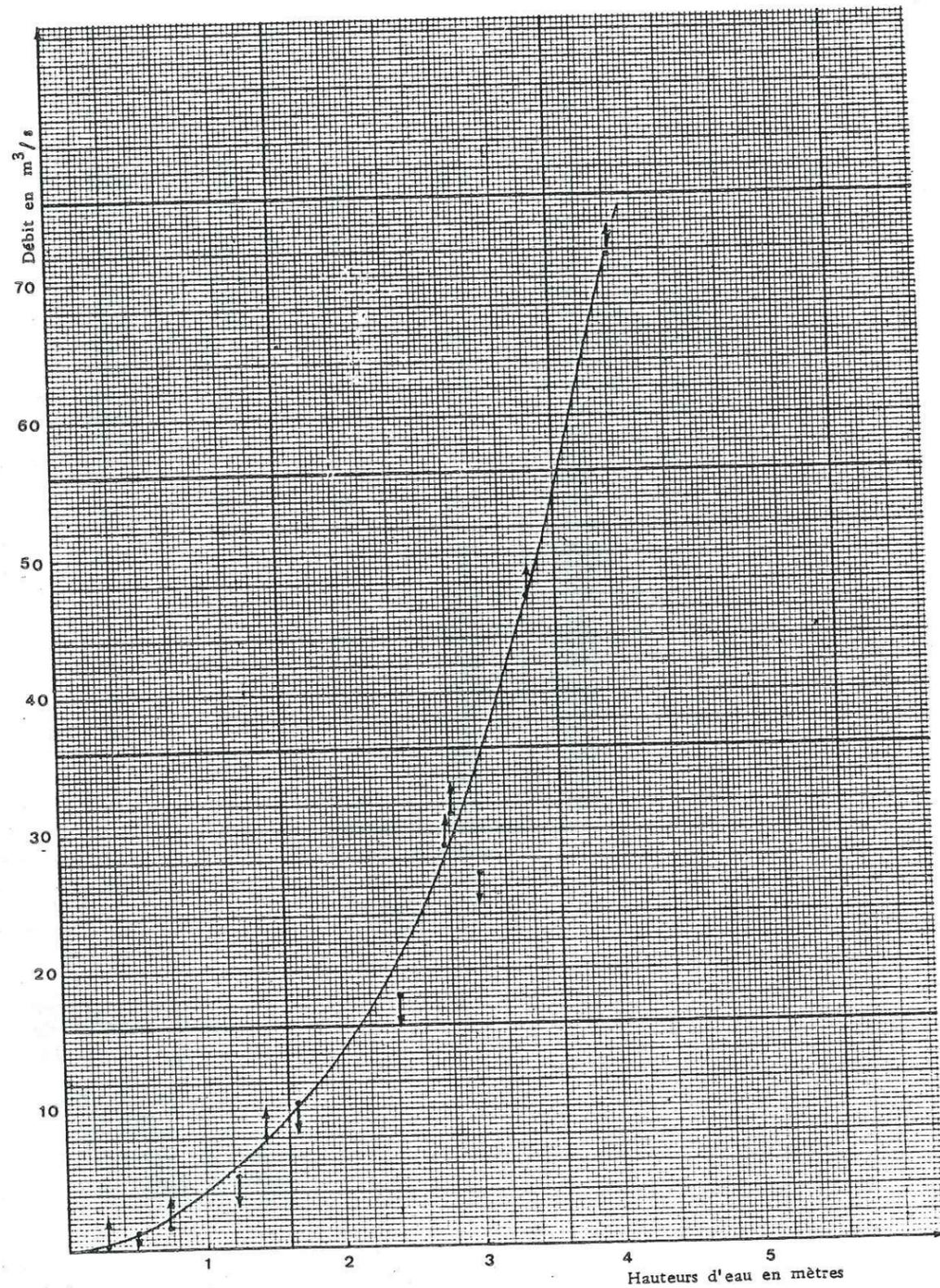


Fig.11

COURBE DE TARAGE DE LA SISSILI A NEBOU

DATE 1974 0. 1. 10

BAREME N° : 4		RIVIERE : SISSILI			STATION : NEBOU			DATE 1974						
H	O	H	O	H	O	H	O	H	O	Q				
0.80	0	0.80	1.44	1.00	4.12	8.65	14.76	22.7	3.00	24.7	3.80	4.00	70.4	4.80
0.70	1	1.44	1.48	1.00	4.20	8.75	14.7	22.9	3.00	24.9	3.80	4.00	70.4	4.80
0.60	2	1.52	1.56	1.00	4.28	8.86	14.9	23.1	3.00	25.0	3.80	4.00	70.4	4.80
0.50	3	1.56	1.60	1.00	4.36	8.96	15.0	23.2	3.00	25.1	3.80	4.00	70.4	4.80
0.40	4	1.60	1.65	1.00	4.44	9.07	15.2	23.4	3.00	25.2	3.80	4.00	70.4	4.80
0.30	5	1.65	1.69	1.00	4.53	9.17	15.3	23.6	3.00	25.3	3.80	4.00	70.4	4.80
0.20	6	1.69	1.73	1.00	4.61	9.28	15.5	23.8	3.00	25.4	3.80	4.00	70.4	4.80
0.10	7	1.73	1.77	1.00	4.69	9.38	15.6	24.0	3.00	25.5	3.80	4.00	70.4	4.80
0.00	8	1.77	1.81	1.00	4.77	9.49	15.8	24.1	3.00	25.6	3.80	4.00	70.4	4.80
	9	1.81	1.85	1.00	4.85	9.59	16.1	24.1	3.00	25.7	3.80	4.00	70.4	4.80
	10	1.85	1.90	1.00	4.94	9.70	16.2	24.5	3.10	25.7	3.80	4.10	75.0	4.80
	11	1.90	1.95	1.00	5.02	9.81	16.4	24.7	3.10	25.8	3.80	4.10	75.0	4.80
	12	1.95	2.00	1.00	5.10	9.93	16.5	25.0	3.10	25.9	3.80	4.10	75.0	4.80
	13	2.00	2.04	1.00	5.18	10.0	16.7	25.2	3.10	26.1	3.80	4.10	75.0	4.80
	14	2.04	2.09	1.00	5.26	10.2	16.8	25.4	3.10	26.2	3.80	4.10	75.0	4.80
	15	2.09	2.14	1.00	5.35	10.3	17.0	25.7	3.10	26.4	3.80	4.10	75.0	4.80
	16	2.14	2.18	1.00	5.43	10.4	17.1	25.9	3.10	26.5	3.80	4.10	75.0	4.80
	17	2.18	2.23	1.00	5.51	10.5	17.2	26.1	3.10	26.6	3.80	4.10	75.0	4.80
	18	2.23	2.28	1.00	5.59	10.6	17.4	26.3	3.10	26.8	3.80	4.10	75.0	4.80
	19	2.28	2.33	1.00	5.67	10.7	17.6	26.6	3.10	26.9	3.80	4.10	75.0	4.80
	20	2.33	2.37	1.00	5.75	10.9	17.8	26.8	3.10	27.0	3.80	4.10	75.0	4.80
	21	2.37	2.42	1.00	5.84	11.0	17.9	27.0	3.10	27.1	3.80	4.10	75.0	4.80
	22	2.42	2.47	1.00	5.94	11.1	18.1	27.2	3.10	27.2	3.80	4.10	75.0	4.80
	23	2.47	2.52	1.00	6.03	11.2	18.2	27.4	3.10	27.3	3.80	4.10	75.0	4.80
	24	2.52	2.56	1.00	6.12	11.3	18.4	27.7	3.10	27.4	3.80	4.10	75.0	4.80
	25	2.56	2.61	1.00	6.21	11.4	18.6	28.0	3.10	27.5	3.80	4.10	75.0	4.80
	26	2.61	2.66	1.00	6.30	11.5	18.7	28.2	3.10	27.6	3.80	4.10	75.0	4.80
	27	2.66	2.71	1.00	6.40	11.7	18.9	28.4	3.10	27.7	3.80	4.10	75.0	4.80
	28	2.71	2.75	1.00	6.49	11.8	19.0	28.6	3.10	27.8	3.80	4.10	75.0	4.80
	29	2.75	2.80	1.00	6.58	11.9	19.2	28.9	3.10	27.9	3.80	4.10	75.0	4.80
	30	2.80	2.84	1.00	6.68	12.0	19.4	29.1	3.10	28.0	3.80	4.10	75.0	4.80
	31	2.84	2.89	1.00	6.77	12.1	19.4	29.4	3.10	28.1	3.80	4.10	75.0	4.80
	32	2.89	2.93	1.00	6.86	12.3	19.5	29.7	3.10	28.2	3.80	4.10	75.0	4.80
	33	2.93	2.98	1.00	6.95	12.4	19.7	29.9	3.10	28.3	3.80	4.10	75.0	4.80
	34	2.98	3.03	1.00	7.05	12.5	19.8	30.2	3.10	28.4	3.80	4.10	75.0	4.80
	35	3.03	3.08	1.00	7.14	12.7	20.0	30.5	3.10	28.5	3.80	4.10	75.0	4.80
	36	3.08	3.13	1.00	7.23	12.8	20.2	30.8	3.10	28.6	3.80	4.10	75.0	4.80
	37	3.13	3.18	1.00	7.32	12.9	20.3	31.1	3.10	28.7	3.80	4.10	75.0	4.80
	38	3.18	3.23	1.00	7.42	13.0	20.5	31.3	3.10	28.8	3.80	4.10	75.0	4.80
	39	3.23	3.28	1.00	7.51	13.2	20.6	31.6	3.10	28.9	3.80	4.10	75.0	4.80
	40	3.28	3.33	1.00	7.60	13.3	20.8	31.9	3.10	29.0	3.80	4.10	75.0	4.80
	41	3.33	3.38	1.00	7.70	13.4	21.0	32.2	3.10	29.1	3.80	4.10	75.0	4.80
	42	3.38	3.43	1.00	7.81	13.6	21.2	32.5	3.10	29.2	3.80	4.10	75.0	4.80
	43	3.43	3.48	1.00	7.91	13.7	21.4	32.8	3.10	29.3	3.80	4.10	75.0	4.80
	44	3.48	3.53	1.00	8.02	13.8	21.6	33.0	3.10	29.4	3.80	4.10	75.0	4.80
	45	3.53	3.58	1.00	8.12	14.0	21.7	33.3	3.10	29.5	3.80	4.10	75.0	4.80
	46	3.58	3.63	1.00	8.23	14.1	21.9	33.6	3.10	29.6	3.80	4.10	75.0	4.80
	47	3.63	3.68	1.00	8.33	14.2	22.1	33.9	3.10	29.7	3.80	4.10	75.0	4.80
	48	3.68	3.73	1.00	8.44	14.3	22.3	34.1	3.10	29.8	3.80	4.10	75.0	4.80
	49	3.73	3.78	1.00	8.54	14.4	22.5	34.4	3.10	29.9	3.80	4.10	75.0	4.80
	50	3.78	3.83	1.00	8.65	14.6	22.7	34.7	3.10	30.0	3.80	4.10	75.0	4.80

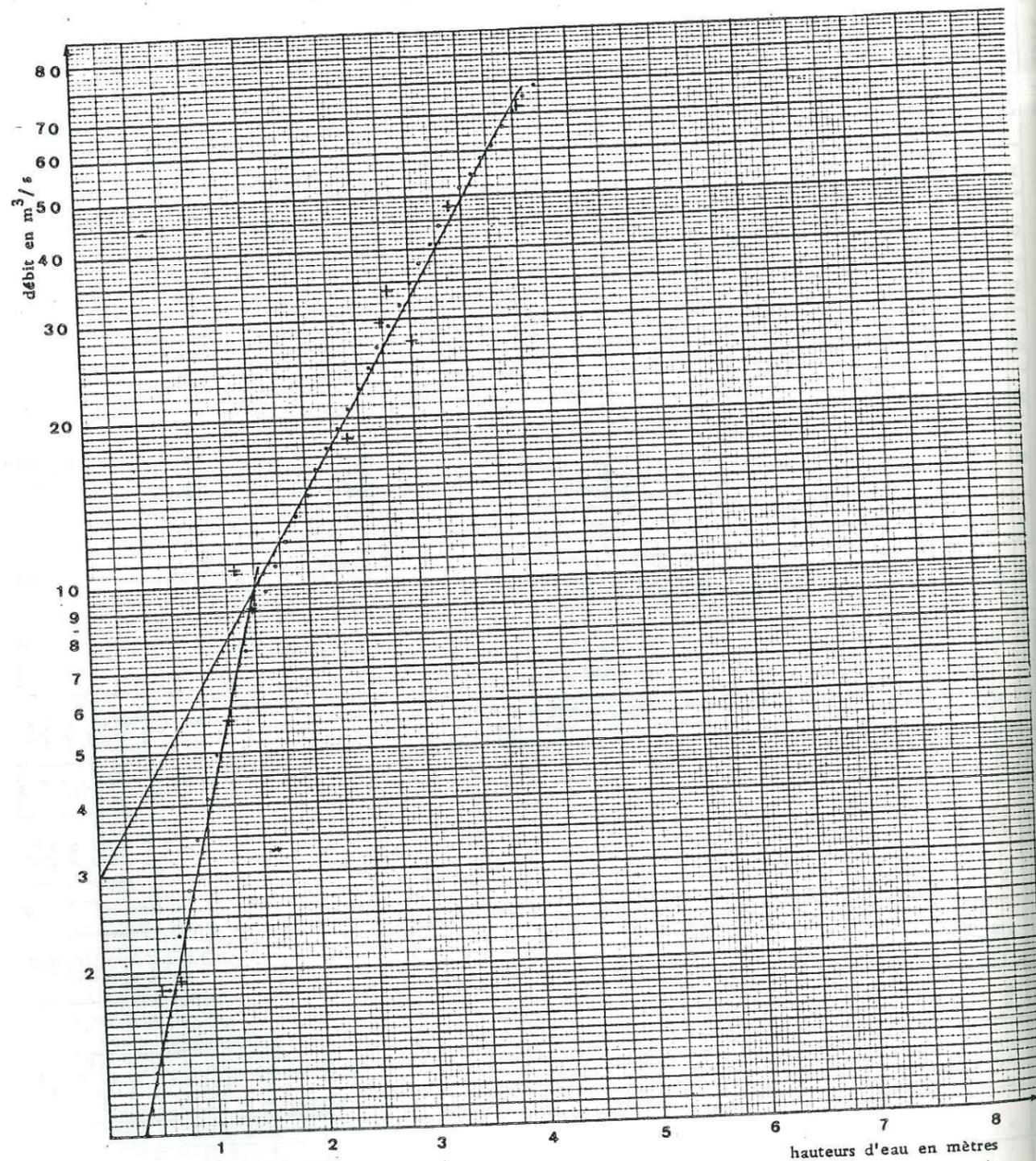


FIG. 12 : RELATION ENTRE LES HAUTEURS D'EAU ET LE DEBIT A LA STATION DE NEBOU

Tableau 13 - Jaugeages d'étalonnage réalisés au pont de Nébou en 1974

Numéro du jaugeage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hauteur d'eau à l'échelle en mètres	0,71	1,46	1,23	1,67	0,52	0,26	2,80	2,74	3,38	4,05	3,00	2,40
Débits en m ³ /s	1,925	9,02	5,68	10,54	1,85	0,76	33,8	29,52	47,44	72,00	27,20	18,32
Dates	01/07	02/08	03/08	05/08	08/08	10/08	15/08	15/08	16/08	17/08	19/08	20/08

L'allure parabolique de la courbe obtenue nous avait donné l'idée de reporter les données des jaugeages sur diagramme semi-logarithmique. L'opération a donné deux droites dont il convient de rappeler les équations, car l'emploi généralisé des calculatrices programmables rend leur utilisation plus aisée que celle du barème ou de la courbe de tarage, lorsque l'on veut avoir les débits à partir des hauteurs d'eau.

$$LN = 1,96 x + LN 0,54 \quad \text{pour } 0 \leq x < 1,50 \quad \text{avec un coefficient}$$

$$LN = 0,80 x + LN 3,03 \quad \text{pour } 1,50 \leq x < 5,50 \quad \text{de corrélation commun de } 0,998$$

La Sissili à Nébou-Débits mensuels-Période 1974-1982 (m³/s)

Tableau 14

	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Débit moy. annuel	Débit maxi annuel
1974	0,011	0,039	0,224	6,41	12,50	4,96	0,50	2,03	80,7 m ³ /s
1975	0	0	0,55	1,63	2,64	7,02	0,35	1,02	12,4 m ³ /s
1976	0	0	0,18	0,86	0,80	0,64	1,33	0,366	4,12 m ³ /s
1977	0	1,18	0,68	4,0	31,3	14,8	0,86	4,44	70 m ³ /s
1978	0	0	0,626	2,74	1,21	0,805	0,024	0,455	14,0 m ³ /s
1979	0	0	?	?	4,41	2,76	0,502		13,9 m ³ /s
1980	0	0	-	1,59	5,94	3,71	-		16,7 m ³ /s
1981	0	0	0,8	3,48	8,63	8,24	0,33	1,8	25,5 m ³ /s
1982	0	0	1,088	0,99	2,43	2,10	0,08	0,56	11,4 m ³ /s

Le tableau ci-dessus montre des variations du débit étroitement liées aux précipitations. La rivière étant perchée par rapport à sa nappe, le ruissellement s'identifie ici à l'écoulement et s'arrête dès qu'il cesse de pleuvoir.

Pendant, la saison pluvieuse les débits moyens mensuels varient beaucoup d'un mois à l'autre avec des maxima, situés presque toujours au mois d'Août. Dans ce dernier mois, comme en Juillet et Septembre, et quelquefois en Juin et Octobre, l'écoulement est permanent avec des crues en rapport avec les précipitations journalières.

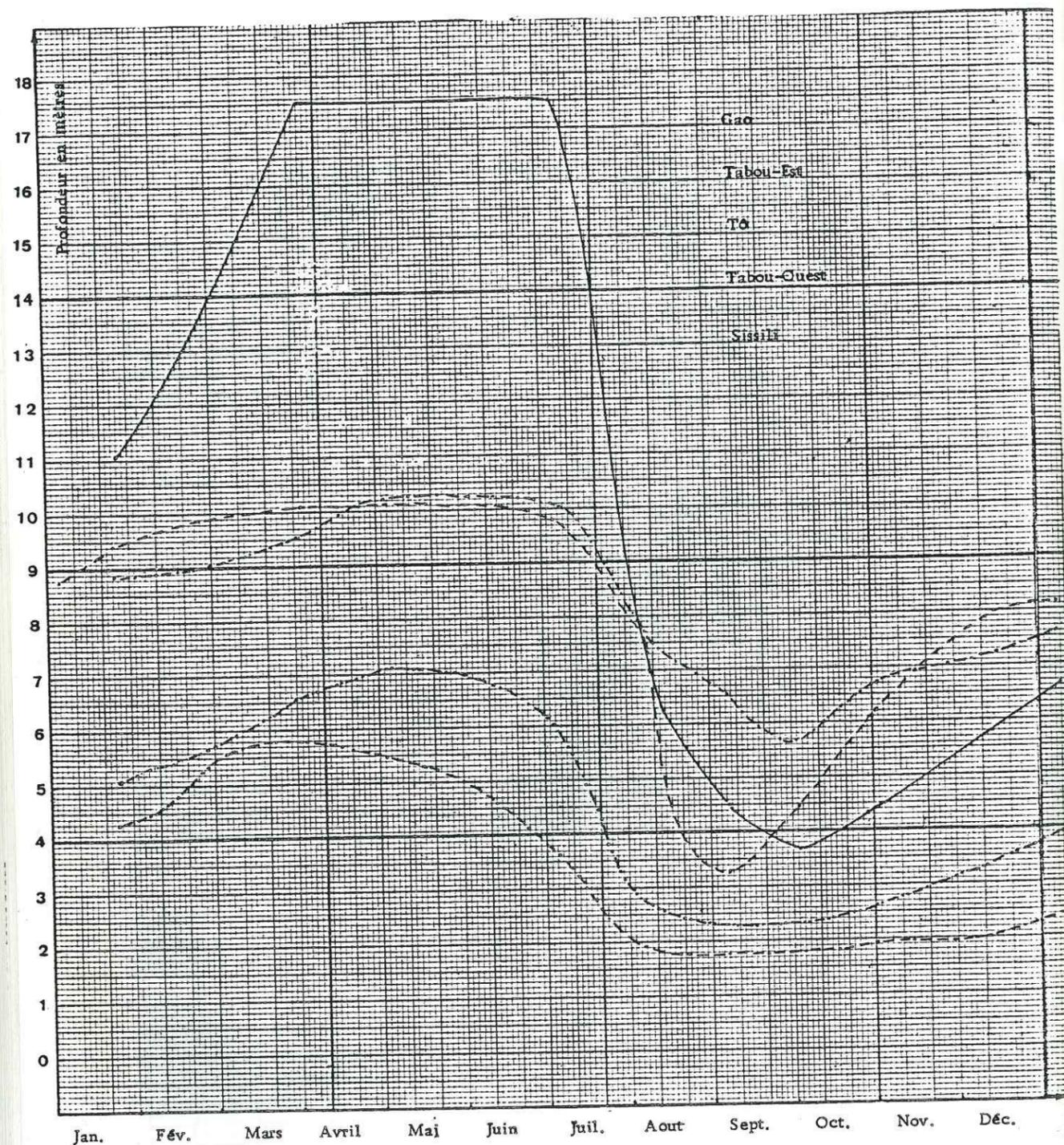


Fig.13 Fluctuations des niveaux piézométriques observées dans le bassin versant de la Sissili en 1974

2.1.5.6. LE DEFICIT D'ECOULEMENT

Les calculs faits à partir de l'écoulement mesuré à la station de Nébou pour la Haute Sissili donnent un déficit d'écoulement égal à 78% des précipitations. Ce qui nous amène, en considérant l'ensemble du bassin versant de la Sissili et sa moyenne pluviométrique calculée à partir des données des cinq stations (Léo, Gao, Thyou, Sapouy, Pô), à 640 mm pour 821 mm de hauteur totale de précipitation moyenne pour la période 1971-1980. Le déficit d'écoulement se répartit bien sûr entre l'infiltration directe, l'évaporation et l'évapotranspiration directes et différées.

L'infiltration se traduit par une remontée des niveaux piézométriques dont nous avons suivi les fluctuations annuelles pendant l'année hydrologique 1973-1974 à Gao, To, Tabou et Sissili (fig. 13).

Les ouvrages suivis se répartissent sur deux secteurs géomorphologiques différents: les bas-fonds (Sissili, Tabou-Ouest) et les interfluves (Gao, To, Tabou-Est). On remarque que les niveaux statiques restent peu profonds dans les zones de bas-fonds toute l'année. Dans les interfluves, même si les niveaux piézométriques remontent à moins de 5 mètres de la surface pendant la recharge, ceux-ci restent toujours plus profonds. Ceci tend à indiquer l'existence d'un gradient d'écoulement des bas-fonds vers les interfluves. C'est du reste ce que confirme la remontée plus tardive dans les interfluves des niveaux piézométriques où les rabattements saisonniers les plus importants sont observés. Si les lits mineurs des marigots sont colmatés leurs berges sont souvent sableuses et correspondent à des lieux où les eaux de ruissellement se concentrent, mais aussi s'infiltrent facilement pour gagner les interfluves en circulant dans les arènes et le substratum fissuré à la faveur des inversions de relief fréquemment observables entre bas-fonds et interfluves.

2.1.5.7. L'EVAPOTRANSPIRATION

Les travaux effectués pendant 10 ans en Afrique occidentale par l'Institut de Recherches Agronomiques Tropicales (I.R.A.T.) ont permis de tester plusieurs formules de calcul de l'évapotranspiration potentielle dont celles de TURC, de BLANEY-CRIDDLE et de WALKER donnèrent des résultats homogènes proches des valeurs mesurées. Nous avons retenu, comme l'a fait le C.I.E.H., la formule de TURC qui s'écrit comme suit:

$$ETP = (I_g + 50) \times 0,40 \frac{t}{t+15} \quad \text{avec}$$

ETP = Evapotranspiration potentielle

I_g = Valeur mensuelle moyenne de la radiation solaire exprimée en petites calories par cm^2 de surface horizontale

t = Température moyenne mensuelle en $^{\circ}C$. en prenant la température à 12 heures

et qui prend la forme suivante lorsque l'humidité de l'air devient inférieure à 50 %:

$$ETP = (I_g + 50) \times 0,40 \frac{t}{t+15} \left(1 + \frac{50 - Hr}{70} \right) \quad \text{avec}$$

Hr = Humidité relative

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

I_{gA} = Energie de radiation solaire en $cal/cm^2/jour$. Elle est donnée par les tables d'Angot et ne dépend que de la latitude du lieu.

h = Insolation relative où h est la durée de l'insolation en heures mesurée à l'héliographe, et H la durée astronomique du jour exprimée dans la même unité. H ne dépend également que de la latitude et sa valeur est donnée par des tables.

. h n'est pas mesuré à Léo et on l'estimera par extrapolation.

A titre indicatif, les valeurs de l'évapotranspiration potentielle calculée à Léo sont les suivantes: (en mm):

J	F	M	A	Mai	J	Juil	Août	Sept	O	N	D	Année
208	207	205	154	157	148	135	116	132	158	167	185	1972

On remarque que bien que très élevée, la valeur de l'évapotranspiration potentielle trouvée est bien inférieure à celle de l'évaporation mesurée à l'évaporomètre PICHE (2628 mm) pour la même période.

Evapotranspiration réelle

En essayant de calculer l'évapotranspiration directe à l'aide des méthodes de calcul proposées par certains auteurs comme LELONG, KACHARSKA-FORKASIEWIEZ ayant travaillé à Parakou (Bénin) et Korogho (Côte d'Ivoire), nous avons abouti à des résultats non concordants avec les données de nos observations et mesures. Tout au plus, avons-nous pu dégager en 1974 les fourchettes de variation de l'évapotranspiration directe.

Evapotranspiration et infiltration directes estimées en 1974 pour le bassin de la Sissili en parlant des observations et des méthodes de calcul de KUCHARKA et FORKSIEWIEZ (Korogo) LELONG (Parakou, 1963); LEE (1942), FEODOROFF et RAF (1962).

Tableau 15

Période	Précipitations	Ecoulement	E.T.D. mini	I.D. maxi	E.T.D. maxi	I.D. mini
du 26/4 au 30/6	162,5	39	?	?	50,5	73
du 1/7 au 30/9	779	151	174	454	383	245
du 26/4 au 30/9	941,5	190	174 + ?	454 + ?	433,5	318

Si l'on applique les formules de TURC et de COUTAGNE qui s'écrivent respectivement:

$$Er = \sqrt{0,9 + \frac{P^2}{2}}$$

avec: P = précipitations annuelles
L = 300 + 25 T + 0,05 T³
T = Températures moyennes annuelles en °C

et

$$Er = P - \lambda P^2 \quad \text{avec: } \lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14T}$$

P = précipitations annuelles en mètres
T = températures moyennes annuelles en °C

(valable pour $\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda}$) on ne peut donc pas l'appliquer aux régions

sahéliennes à précipitations annuelles inférieures à 500 mm).

En considérant la moyenne des précipitations annuelles et des températures du bassin versant de la Sissili (821 mm et 27,5 °C pour la période 1970 - 1980), on obtient les valeurs de 796 mm et 676 mm d'évapotranspiration réelle annuelle. Comme à l'écoulement correspond 22 % des précipitations, soit 181 mm dans ce cas, on voit que la période considérée est déficitaire. Mais en appliquant les mêmes formules à des années que nous savons être excédentaires comme 1974, on trouve toujours des bilans déficitaires.

Toutes les formules utilisées surestiment donc l'évapotranspiration directe. Ceci est essentiellement dû au fait que dans les formules indiquées on néglige une caractéristique importante de notre région qui est l'étalement des précipitations dans l'année.

La profondeur de la nappe ainsi que la nature des altérites qui la recouvrent doivent également influencer l'évapotranspiration.

La bilan global de l'eau du bassin versant de la Sissili est:

P = E + R + I mais peut aussi s'écrire en le considérant comme un bassin sans perte souterraine:

P = E + R + dw avec E = Evapotranspiration réelle en mm
R = Ruissellement annuel en mm
P = Précipitations annuelles en mm
dw = Variation des réserves en mm.

Le mode d'alimentation des nappes, tel qu'il va plus loin ressortir de nos différentes études, ainsi que la géométrie des aquifères, montrent qu'une écriture globale du bilan pour tout un bassin versant grand comme celui de la Sissili présente plus d'intérêt à être comparé à celui d'un bassin de dimensions semblables des régions du Nord, qu'à être utilisé systématiquement dans l'explication des phénomènes locaux d'infiltration et de circulation des eaux. Nous étudierons donc à ce titre de comparaison le bilan hydrologique de Garoual.

2.1.6. DÉFICIT D'ÉCOULEMENT DANS LE BASSIN VERSANT DU GOROUAL. DANS L'OU DALAN

On peut, en étudiant le bilan hydrologique d'un bassin versant dans la région nord de la Haute-Volta (celui de Garoual, par exemple), voir comment les caractéristiques de ce dernier favorisent l'infiltration dans une région où les précipitations sont deux à trois fois inférieures à celles du bassin de la Sissili.

2.1.6.1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE

Le Garoual est un affluent de rive droite du Niger, qui draine le territoire nord-est de la Haute-Volta. Nous considérons ici la partie est de son bassin versant ayant Koriziéna pour exutoire. Elle occupe 2 500 km² dans l'Oudalan et est entièrement comprise entre les longitudes et latitudes 0° - 0° 50' Ouest et 14°10' - 14°40' Nord.

2.1.6.2. PRÉCIPITATIONS

La lame d'eau annuelle que reçoit le bassin versant peut s'obtenir à partir de la moyenne de celles des stations de Dou, Arbinda, Gorom-Gorom, Salmossi, Tassamaka, Saouga, Beldiabé.

Table with 10 columns: Année, DORI, ARBINDA, GOROM, OURSI, SALMOSSI, TASSAMAKA, SAUGA, BELDIABE, Moyenne (mm). Rows show precipitation data for years 1974 to 1980.

Il tombe environ 400 mm de pluie par an. Ce qui nous situe à la limite du seuil en-dessous duquel la courbe établie par d'ARCHAMBAUD et LEMOINE indique qu'il n'existe plus d'infiltration.

2.1.6.3. LE DÉFICIT D'ÉCOULEMENT

La station de Koriziéna est équipée d'un limnigraphe OTTXX dont les enregistrements permettent de calculer les volumes d'eau écoulés.

On remarque que les débits moyens annuels sont faibles (inférieurs à 2 m³/s) et que l'écoulement s'effectue essentiellement de Juillet à Septembre, très peu en Juin, Septembre et rarement en Octobre.

Tableau 16- GOROUAL KORIZIÉNA

NUMERO DE STATION 2015 100J

DÉBITS MOYENS JOURNALIERS EN m³/s (1974)

DÉBITS MOYENS JOURNALIERS EN 1976

Large table showing daily discharge (DEBITS MOYENS JOURNALIERS) in m³/s for each month from JANV to DÉCE. Includes summary statistics like MOY., DÉBIT MAXI. ANNUEL, and DÉBIT MOYEN ANNUEL.

DÉBIT MAXI. ANNUEL 69.7 m³/s
DÉBIT MOYEN ANNUEL 1.88 m³/s

DÉBIT MOYEN ANNUEL 1.79 m³/s
DÉBIT MAXI. ANNUEL 25.4 m³/s

Si nous prenons les données de l'année 1976, on obtient un volume de $5,72 \times 10^3$ m³, soit une lame d'eau écoulee de 23 mm. On a donc un déficit d'écoulement de $413 - 23 = 390$ mm, soit 94% de la hauteur d'eau précipitée.

Il est intéressant de comparer ces éléments du bilan dans l'Oudalan à ceux du bassin versant de la Sissili. Avec 6% de la hauteur d'eau écoulee, contre 22% dans le bassin versant de la Sissili, on voit que les précipitations qui tombent dans le Nord alimentent essentiellement l'infiltration. Même si les prélèvements par évapotranspiration sont très importants, ils n'arrivent pas à entamer la totalité des eaux infiltrées qui vont alimenter les nappes.

Ce bilan explique donc les teneurs en tritium rencontrées dans les eaux souterraines de cette région qui nous ont permis de conclure à l'existence d'un renouvellement saisonnier.

Le taux élevé du déficit d'écoulement dans l'Oudalan s'explique par la morphologie de dunes et de mares caractéristiques de cette région. Dunes et mares constituent autant de pièges pour les eaux de surface, qui alors s'infiltrent pour rejoindre les nappes souterraines, car si le fond des mares est souvent imperméable, leurs berges constituent des zones d'infiltration préférentielle.

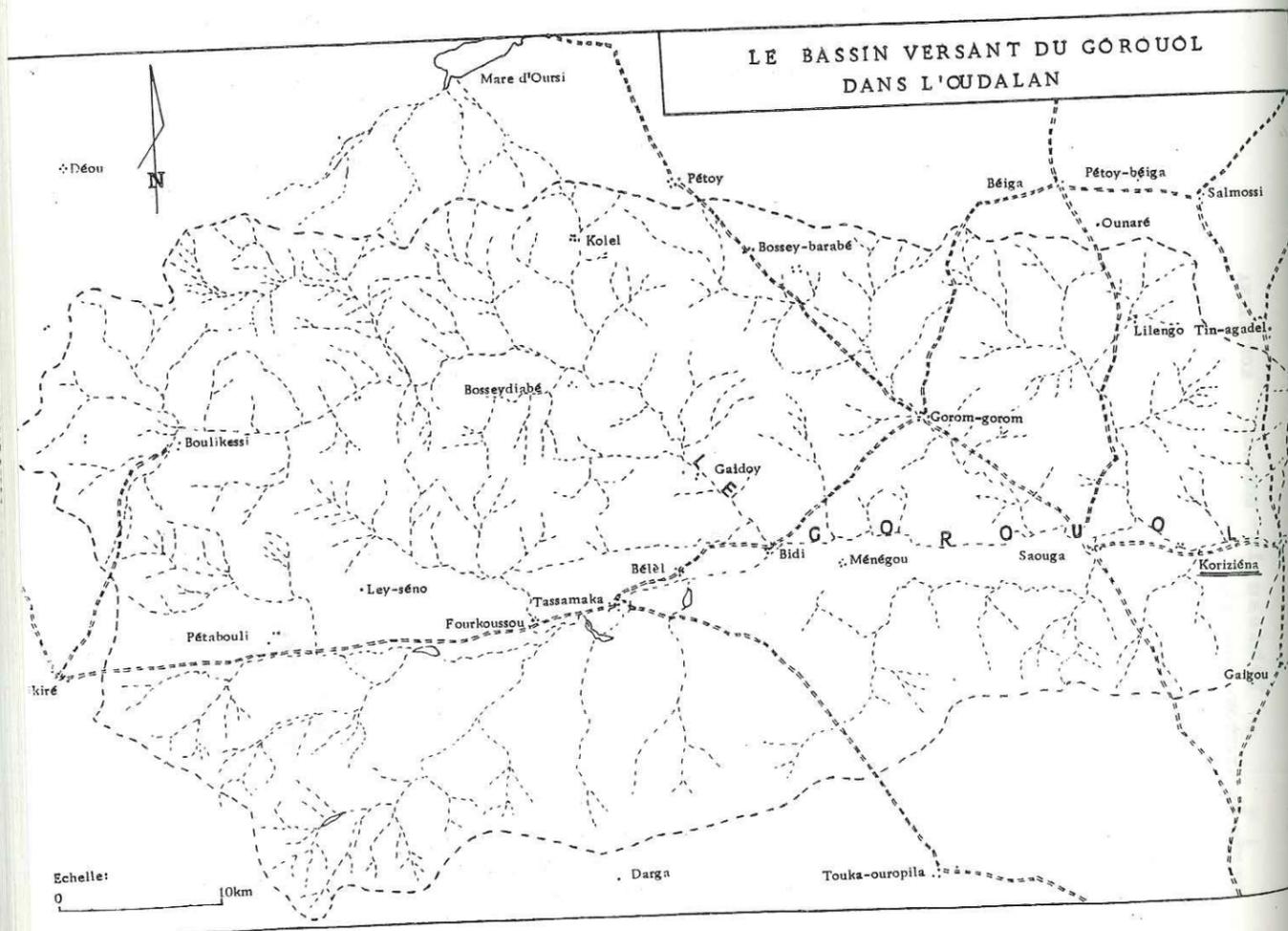


Figure 14

2.2. GÉOLOGIE DU BASSIN VERSANT DE LA SISSILI

2.2.1 - LES TRAVAUX ANTÉRIEURS

Le premier auteur dont l'étude couvrit le bassin versant de la Sissili fut J. SAGATZKY qui le leva de 1933 à 1939, dans le cadre de la carte de reconnaissance de l'A.O.F. au 1/500 000. C'est à ce jour, et malgré sa petite échelle, le document géologique de base le plus important. Il faut toutefois signaler l'existence de deux cartes géologique et photo-géologique, l'une du degré carré de Pô signée L.F. BONARD (1967), et l'autre de la coopération néerlandaise réalisée par J.H. LANGENBERG et F.W. HAARBRINK en 1968. L'une et l'autre de ces deux dernières sont une reprise sans améliorations notables de la carte de J. SAGATZKY.

Si nous ne pouvons prétendre à une virginité du secteur nous avons dû cependant partir d'un fond topographique vide après avoir noté qu'il existait de nombreuses lacunes au niveau des documents existants.

2.2.2. - LES TRAVAUX RÉALISÉS

La première approche de l'étude du bassin fut d'abord photogéologique. Grâce aux photos-aériennes à l'échelle 1/50 000, nous avons pu tracer un dense réseau de linéaments et repérer les principaux affleurements du bassin. Les itinéraires de levé furent dressés en fonction de la distribution des pointements rocheux. Ils nous ont permis de visiter plus de 200 affleurements dont nous avons prélevé des échantillons pour en tirer 303 lames minces et réaliser 32 analyses géochimiques. Les séjours sur le terrain se sont étalés de 1974 à 1982, avec des interruptions liées à des rédactions de mémoire ou de rapports et aux études réalisées sur les autres régions du socle cristallin de Haute-Volta.

2.2.3. - GÉOLOGIE DU BASSIN VERSANT DE LA SISSILI

La Sissili draine en territoire voltaïque une région occupée par trois types de formations cristallines: des migmatites, des granites et enfin des roches basiques et des filons de quartz.

- Les migmatites

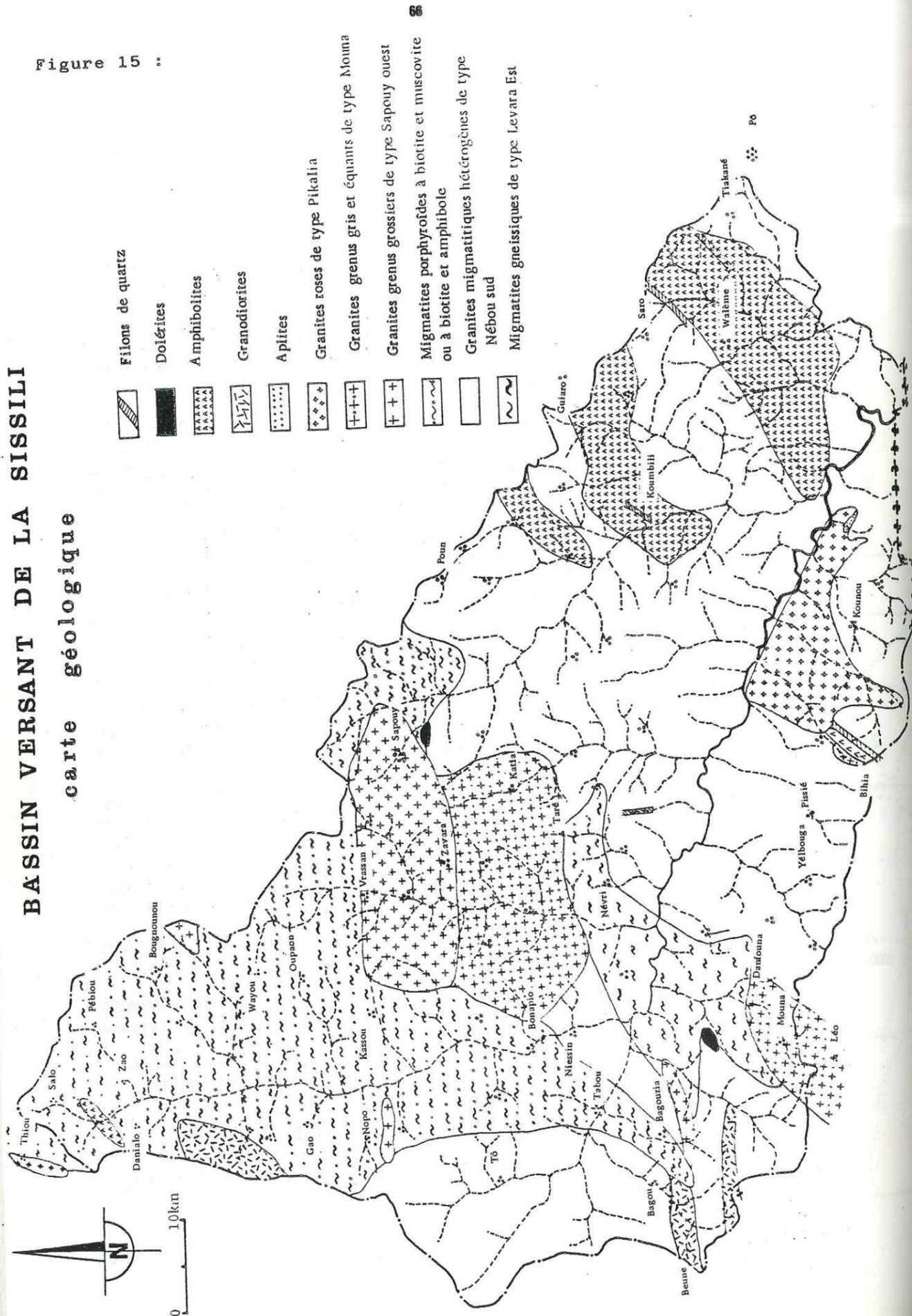
Nous employons le terme "migmatite" comme l'a fait M. ARNOULD (1961) dans le sens élargi que lui a donné C.E. WEGMANN (1935): "c'est-à-dire qu'il recouvre à la fois:

- les mélanges intimes, plus diffus: artérites, nébulites qui sont dépourvus de stratification et de schistosité (J.J. SEDERHOLM, 1926, abstraction faite de l'interprétation génétique);
- les mélanges de gneiss ou de micaschistes et de granites (J.J. SEDERHOLM 1907) dans lesquels les deux constituants peuvent être distingués à l'oeil nu;
- enfin tous les gneiss ayant acquis un faciès essentiellement feldspathique (C.E. WEGMANN, 1935), c'est-à-dire un faciès de gneiss de la catazone (J. JUNG, 1958)"

- Les granites

Ils sont très variés. Nous simplifierons en distinguant seulement trois types principaux que nous décrirons et caractériserons tout en leur associant les noms des localités où ils affleurent.

BASSIN VERSANT DE LA SISSILI
carte géologique



Indépendamment de la distinction pétrographique que nous n'aborderons qu'avec les analyses géochimiques, celle que nous faisons ici, tant au niveau des migmatites que des granites prend surtout en compte l'hydraulicité des formations qui est fonction de leur degré de fissuration lié à leurs texture et structure ainsi qu'à la taille de leurs minéraux constitutifs.

— Les roches basiques et les filons de quartz

Les roches basiques comprennent essentiellement des amphibolites, des granodiorites et des dolérites. Leur mise en place ou celle des intrusifs qui leur succèdent détermine des faciès particuliers d'endo- ou d'exométagmorpisme de contact que nous qualifions de faciès intermédiaires ou faciès de contagion.

Les filons de quartz bien développés sont rares puisqu'on en dénombre quatre dont la longueur excède le kilomètre dans tout le bassin versant de la Sissili.

2.2.3.1. LES MIGMATITES

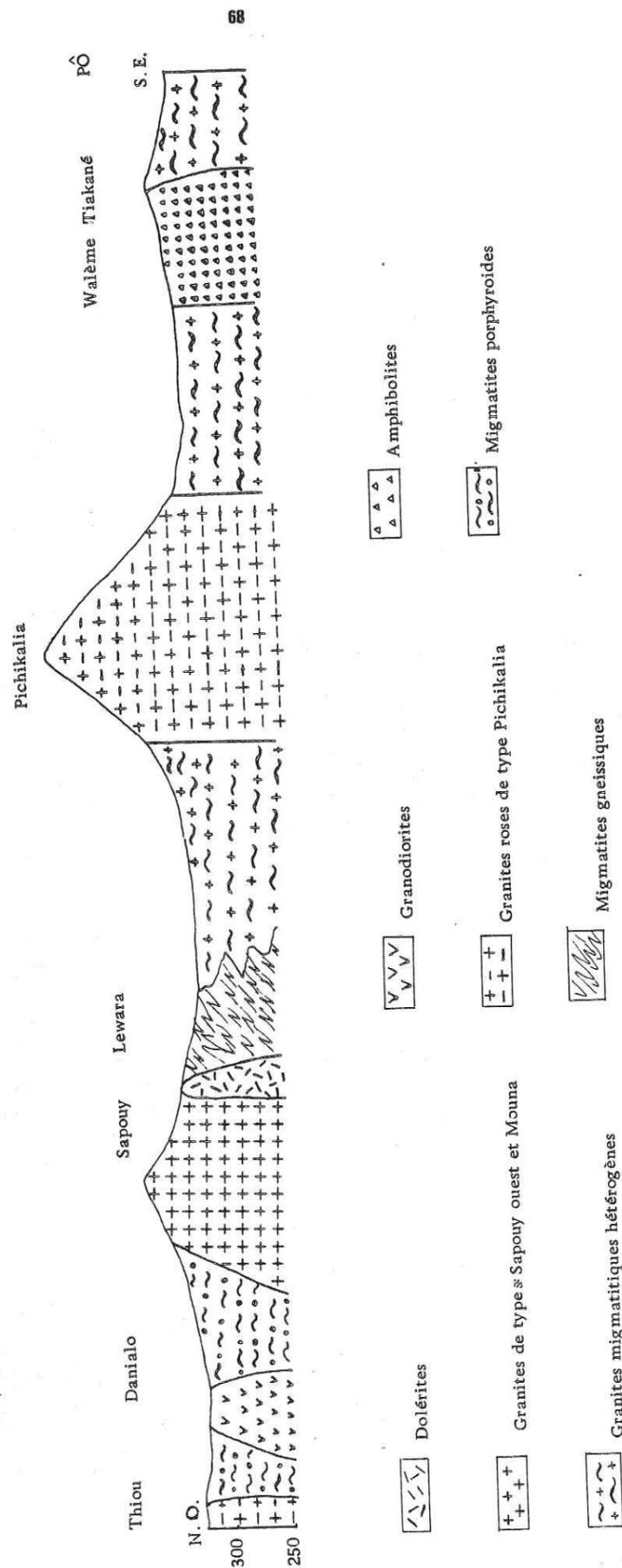
Elles forment l'ossature géologique du bassin versant de la Sissili dont elles occupent plus des 2/3 de la superficie. Comme nous l'avons déjà noté, le terme de migmatite est employé ici au sens large. Nous y regroupons les formations que J. SAGATZKY appelait granito-gneiss, et que d'autres auteurs, dont J. DUCELLIER, qui entendaient mettre plus l'accent sur l'aspect granitique que sur celui du métamorphisme catazonal, ont désignées sous le terme de granites hétérogènes. Elles comprennent ici:

.Des lambeaux de gneiss migmatitiques à foliation nette et à microplis fréquents. Ces derniers sont soulignés par des veines sombres surmicacées et amphiboliques. On peut prendre l'affleurement de Levara-Est comme gneiss-migmatitique type. Ces gneiss affleurent également à l'Est de Kayero, dans la zone 5 du ranch de Léo, à l'Ouest de Bonapio. Dans cette dernière localité, le contraste entre le gneiss et l'important massif de granite subéquant de l'Est vient dénoter le caractère intrusif de ce dernier, bien que la zone de transition gneiss-granite ne soit pas visible.

L'observation en lame mince montre une roche bien orientée à texture cloisonnée avec de gros cristaux souvent automorphes de plagioclases enrobés par du quartz xénomorphe et hétérogranulaire, de la biotite et de rares cristaux de muscovite (souvent secondaire dérivant de l'altération des plagioclases ou de la déferritisation de la biotite; on la trouvera également remplissant les fissures de certains phénocristaux de plagioclases), de sphène, d'épidote et d'apatite. Très rares sont également les cristaux de microcline présents.

.Des granites migmatitiques hétérogènes, qui sont des migmatites de la catazone à foliation fruste à microplis rares, mais à veines surmicacées fréquentes à grain tantôt grossier, tantôt fin. Les affleurements de ces types de granites sont parcourus par des filons de pegmatites dont l'épaisseur peut atteindre le mètre et la longueur plusieurs décimètres. L'affleurement que nous prenons pour caractériser ce type de granite est celui des massifs du sud du village de Nébou. En fait, ces granites partout présents dans le centre du bassin versant constituent les affleurements les plus fréquents. On pourra les décrire, dans la zone 1 du ranch de Léo, à Tachien, à l'entrée ouest du village de Kouneou, etc. Mais le trait marquant de ces granites hétérogènes est moins l'aspect granulaire

FIG. 16 COUPE SCHEMATIQUE MONTRANT LES DIFFERENTES FORMATIONS GEOLOGIQUES DU BASSIN DE LA SISSILI



que celui minéralogique. En effet, quelquefois la granitisation du complexe métamorphique prend un caractère de ségrégation biséquentielle avec l'apparition d'un faciès granitique rose cotoyant un faciès gris. Nous employons le qualificatif d'hétérogène pour désigner ici l'association inextricable sur le même affleurement de la migmatite à foliation nette passant à une migmatite granitique, puis à des séquences granitiques, tantôt roses, tantôt grises. Il arrive qu'une des séquences prenne localement le pas sur l'autre. On a alors l'impression d'avoir un granite homogène du même type que ceux de Sapouy Ouest ou de Pichikalia que nous décrirons plus loin. Un des meilleurs exemples est donné par les affleurements du centre et du sud de la ville de Pô, ou par ceux du village de Pissié dont les pointements ouest, descriptibles à l'oeil comme un granite équant en opposition à la migmatite de l'est, révèlent au microscope une structure cloisonnée commune aux deux affleurements. On peut retenir pour les granites hétérogènes du type Nébou sud l'explication qu'en donne B. BESSOLES (1977) qui pense que ce sont des gneiss métamorphisés dans la catazone et affectés par une anatexie différentielle; celle-ci donnant lieu à une mobilisation de matière granitique qui confère un caractère hétérogène aux affleurements. Cependant on note ici sur le terrain que les faciès biséquentiels occupent le sud-est du bassin versant ainsi que sa partie sud où on voit apparaître des massifs intrusifs orientés de granite rose. Il apparaît dans ces granites roses des enclaves de migmatites et de roches vertes. L'état d'imbrication faciès rose-faciès gris permet de penser que la dualité des séquences tient à une injection dans les migmatites d'un magma riche en potassium qui digère ou emballe simplement ces dernières.

On notera que si dans les faciès roses on remarque une orientation nette, ce qui indique une mise en place syntectonique, on ne retrouve plus les microplis fréquents dans le faciès migmatitique gris. Les affleurements de l'Ouest du village de Prata où l'on voit clairement le granite rose injecter les migmatites illustrent bien les relations faciès rose - faciès gris.

Dans ces domaines de granites migmatitiques hétérogènes, la description minéralogique présente peu d'intérêt. Notons seulement que la composition minéralogique moyenne est la suivante: plagioclase toujours sodique (albite ou oligoclase) quartz, microcline myrmékitique, biotite toujours plus abondante que la muscovite même dans les séquences roses; s'y ajoutent de nombreux minéraux accessoires comme le sphène, l'épidote, l'apatite et très rarement du zircon. La magnétite s'y rencontre parfois en cristaux automorphes. Il est à signaler que le grenat ne constitue pas un minéral fréquent dans ces faciès; il n'apparaît que dans des contextes très particuliers et locaux sur lesquels nous reviendrons. Cette remarque vaut également pour les autres minéraux de métamorphisme caractéristiques.

Le même phénomène a été noté par E.P. GAMSORE (1975) dans les régions éburnéennes de Ouahigouya. Par contre, cet auteur fait remarquer que dans les provinces libériennes de l'Afrique de l'Ouest (région de Man en Côte d'Ivoire, Sula Mountains en Sierra Leone au Libéria) les formations métamorphiques de la mésozone à la catazone renferment des silicates typiques du métamorphisme, (V.MANO-1971, J.CAMIL-1972).

Il pense alors que les remobilisations qui affectent les migmatites et les granites résultent à la fois de fusion anatectique profonde et de percolation de type metasomatique. Une telle hypothèse peut être retenue pour les migmatites et les granites migmatitiques du bassin versant de la Sissili.

. Des migmatites porphyroïdes à biotite et amphibole ou à biotite et muscovite

Il s'agit de migmatites à foliation nette surtout au niveau de l'affleurement et à grain grossier. Certains auteurs les appelleraient nébulites. Elles occupent la partie nord du bassin versant. Le faciès à biotite et amphibole s'étend de Kassou à Thiou, tandis que celui plus leucocrate, à biotite et muscovite, occupe la partie sud entre Kassou et Tabou.

Les yeux de feldspaths gros de 3 à 4 cm émergent d'un fond granitique à grain grossier et assez homogène. Les minéraux constitutifs sont pour la migmatite de Thiou qui représente la variété à biotite et amphibole: microcline et oligoclase myrméktyques, quartz, biotite, hornblende, sphène, épidote, apatite, minéraux opaques. La roche accuse une tendance granodioritique et présente une texture cloisonnée au microscope.

Le faciès leucocrate est à albite ou oligoclase, quartz, microcline myrméktyque, biotite, muscovite rare, sphène, épidote, apatite, minéraux opaques et parfois zircon.

L'affleurement type de ce faciès est celui situé au Sud de Lon sur la piste Lon-Tabou.

2.2.3.2- LES GRANITES

. Les granites grenus grossiers de type Sapouy Ouest

Ils affleurent sous forme de dômes de grandes dimensions ne présentant que très peu de fissures. Ils contiennent du plagioclase sodique (albite), du microcline parfois fortement myrméktyque, quartz, biotite, quelques muscovites, sphène, apatite, allanite et minéraux opaques (magnétite). Ils ont une texture nettement équante, avec de petits cristaux de quartz inclus autant dans les feldspaths que dans la biotite. Tous les affleurements de granite de ce type sont parcourus par des filons de pegmatites d'épaisseur et de longueur variables. Ces granites passent souvent latéralement à des granites migmatitiques à foliation fruste, puis nette.

La paragenèse de ce granite est la même que celle (plagioclase-biotite quartz-magnétite-zircon-sphène) des migmatites de Ouahigouya décrites par GAMSOURE (1975) et qui, selon K.R. MENHERT (1962) (que cite cet auteur), correspond à celle de migmatites plutoniques.

. Les granites gris à grain moyen de type Mouna ou Bonapio

Ils forment également d'importants dômes dont les plus importants sont ceux de Bonapio et de Mouna. Ils sont jonchés de boules dérivant de leur altération. Minéralogiquement, ces granites renferment de l'albite ou de l'oligoclase, du microcline, du quartz, de la biotite et quelques muscovites secondaires auxquelles s'ajoutent comme minéraux accessoires: sphène, épidote, allanite, apatite et minéraux opaques.

On note que si le granite de Mouna qui contient des enclaves de migmatite est équante, celui de Bonapio est suborienté et présente en lame mince une texture cloisonnée. Une certaine orientation est également perceptible au niveau des granites de Boto et de Taré que nous rangeons dans ce groupe des granites gris. Entre le village de Bihia et ses massifs amphiboliques de l'Est affleure un granite gris avec des enclaves de granite migmatitique.

. Les granites roses de type Pikalia

Ils forment à l'Est et au Nord-Est du village de Boala deux petites chaînes presque ininterrompues de collines roses entre lesquelles coule l'affluent Bolo de la Sissili. C'est ici que culminent toutes les cuirasses perchées et les môles granitiques du bassin versant de la Sissili avec le sommet de Pitchikalia qui atteint 439 mètres d'altitude.

Il semble que la couleur rose de ces granites de Pikalia et de Pitchikalia les ait fait longtemps confondre avec les collines de cuirasses latéritiques par les auteurs qui se sont déjà intéressés à la géologie du bassin de la Sissili à travers les feuilles de Tenkodogo Ouest ou de P8.

A ces collines de Pikalia-Pitchikalia succèdent plus à l'Est d'autres massifs de granite rose formant également une chaîne dont l'extrémité est constituée par un massif aplitique.

Les intrusions de granite rose sont nombreuses dans le bassin de la Sissili; citons, en plus de celles déjà évoquées, le granite rose du Nord du village de Thiou dont la route Léo-Sabou suit la limite qui le sépare de la migmatite ocellée à biotite et amphibole affleurant abondamment au Nord Est du village.

Les affleurements qui entourent le petit village de Pro présentent également des venues de granite rose à enclaves de migmatites.

Géographiquement, il convient de noter qu'il y a au niveau du bassin versant de la Sissili une association constante entre les granites roses et les roches basiques. Les granites roses ou les séquences migmatitiques semblables présentent leur plus grande extension dans le Sud-Est du bassin de la Sissili où on remarque l'importance des roches basiques. Les venues de granites roses autant que celles des roches basiques (orthoamphibolites) auxquelles elles sont associées semblent caractériser les bordures du môle granito-migmatitique de Ouagadougou-Léo.

Les relations entre les deux types de formations ne sont pas toujours claires. En effet, si dans le Sud-Est du bassin les granites roses contiennent des enclaves et des panneaux de roches basiques qui permettent de prouver qu'ils leur sont postérieurs, ailleurs les relations chronologiques semblent s'inverser. C'est notamment le cas de l'affleurement du village de Bou où il semble que c'est la venue basique qui envahit l'intrusion pegmatitique qui la coiffe.

Comparaison des migmatites et des granites avec des faciès reconnus dans les pays voisins

Nous n'avons pas jusqu'ici abordé le problème des âges relatifs des différentes formations dont nous parlerons plus loin. Rappelons que dans le Sud-Est de la Haute-Volta ARNOULD (1961) a distingué des migmatites libériennes puis des granites baoulés, et enfin des granites de type Bondoukou. Dans la nouvelle édition de la carte géologique de Haute-Volta au 1/1000 000 HOTTIN et OUEDRAOGO situent les formations du bassin versant de la Sissili dans le Libérien.

Lors des réunions du P.I.C.G. (Programme International de Corrélation Géologique), l'occasion nous a été donnée de voir sur le terrain au Ghana les faciès granitiques qualifiés de type Cape-Coast et Dixcove. Il leur correspond les granites de type Baoulé et de type Bondoukou distingués en Côte d'Ivoire. Dans le bassin versant de la Sissili, on pourrait ranger les divers granites migmatitiques, ainsi que les granites de type Sapouy Ouest parmi les granites Cape-Coast; il en est de même des granites orientés de type Pikalia. Seuls seraient de type Bondoukou, les granites de Mouna, de Bonapio et le granite gris de l'Est Bihia.

2.2.3.3. LES ROCHES BASIQUES

Les Amphibolites

. L'actino-hornblendite de Bihia

Le massif de roches basiques le plus important, quant à son extension à l'affleurement dans le bassin versant de la Sissili, est celui de Bihia Est. Il forme le prolongement vers le Sud de la chaîne de collines roses de Pitchikalia-Pikalia-Kati. Tantôt recouverte de carapace latéritique, tantôt décoiffée, la masse rocheuse sombre apparaît de manière discontinue sur 6 km environ, suivant une direction d'allongement Nord-Est, Sud-Ouest.

La roche est microgrenue, très diaclasée, et semble être un ancien basalte recristallisé dans lequel on reconnaît encore de nombreux phénocristaux fantômes de plagioclase. La roche présente une texture orientée au microscope et contient essentiellement: hornblende, actinote, et andésine.

. Les hornblendites

La texture et la composition minéralogique permettent de distinguer plusieurs variétés:

- La hornblendite de Walème qui est une amphibolite très orientée, schistifiée à fréquents fantômes de phénocristaux de plagioclase. C'est une roche essentiellement formée de hornblende, biotite, quartz, plagioclase épidote et de rares minéraux opaques.

- La hornblendite de Sarro ne contient elle qu'amphibole (hornblende), quartz, plagioclase et épidote. Sa texture est subéquante.

- La hornblendite de Tiakané Ouest contient amphibole et quartz avec d'abondants minéraux opaques. Sa texture est subéquante et sa structure finement microgrenue.

Toutes ces amphibolités ont donc en commun:

- . la présence de hornblende,
- . la structure microgrenue.

Elles se distinguent toutes pourtant les unes des autres par la texture (orientée ou équante), l'abondance relative du quartz et des plagioclases, l'absence ou la présence de minéraux opaques.

Les Granodiorites

Les seuls affleurements de granodiorites vraies et intrusives se situent entre Guénien et Bazilakoa sur l'axe Léo-Sabou. Tous les autres affleurements cartés comme granodioritiques dans la partie sud-est du bassin (environs de Longa-Bou, Beune et Kayérobouga) ne sont en fait que des faciès granodioritiques de contagion résultant d'un effet de métamorphisme de contact lié à des intrusions d'amphibolites que l'on peut d'ailleurs voir pointer au centre des affleurements.

La granodiorite de Guénien-Bazilakoa a une texture orientée et contient: quartz, oligoclase, biotite très abondante, quelques amphiboles (hornblende) de la chlorite fréquente, et comme minéraux accessoires sphène, épidote, apatite et minéraux opaques.

La granodiorite de contamination de Bou montre un faciès grenu orienté avec de gros cristaux automorphes de hornblende, dominante ici par rapport à la biotite, alors que c'est le contraire dans la granodiorite de Guénien.

Les Dolérites

Elles affleurent très mal, aussi, est-il possible que nos différents itinéraires ne nous aient point permis de les repérer toutes. Elles ne constituent pas de reliefs, mais se présentent souvent en un champ de boules de dimensions très variées.

Deux pointements ont été cartographiés:

- . celui de Sapouy Sud situé à 4km sur la piste Sapouy-Dianzé,
- . celui affleurant entre Dana et Bolo et que recoupe la route Léo-Sabou entre Dana et Sala.

La composition minéralogique, ainsi que la structure de la dolérite de Sapouy Sud sont des plus classiques: maille de labrador, comblement d'augites, d'hématite, biotite (très rare) et de minéraux opaques. Dans la dolérite de Dana-Bolo, la hornblende remplace l'augite.

2.2.3.4- LES FILONS DE PEGMATITES, DE QUARTZ ET D'APLITES

Nombreux sont les affleurements de granites et surtout de migmatites parcourus par des filons pegmatitiques. Ces filons dont l'épaisseur peut dépasser le mètre et la longueur atteindre plusieurs dizaines de mètres ne sont cependant pas cartographiables à notre échelle de travail. Ils sont très associés aux intrusions basiques et semblent avoir emprunté les mêmes voies de remontée. Toutefois, on note souvent un envahissement des roches basiques par les intrusions de pegmatites, mais aussi l'inverse.

On retrouve pratiquement dans toutes les roches basiques des enclaves et même des panneaux entiers de pegmatites non digérés. Les intrusions basiques développent au contact de l'encaissant migmatitique un faciès granodioritique du type de celui de Bou. Mais les panneaux retrouvés dans la masse même de l'intrusif présentent une auréole de surcuisson, très riche en muscovite (PIOC de Bihia) associée à des grenats (Walème) qu'on ne retrouve que dans ces faciès ou dans les enclaves surmicacées.

Les filons de quartz sont nombreux. On les devine parfois par l'abondance ponctuelle de leurs fragments retrouvés dans les altérites. Les filons de quartz de longueur kilométrique sont cependant rares. On en dénombre quatre sur toute l'étendue du bassin versant dont le plus important est sans doute celui que l'on rencontre à l'Ouest de Tiakané sur la piste Pô-Léo. D'allongement Nord 50°, ce filon a une puissance dépassant la centaine de mètres par endroits, et il forme une petite chaîne de collines longues de plus de 2 km dont l'extrémité vient recouper la piste à 5 km de Tiakané.

L'aplite de Kounou

La deuxième série de collines de granite rose que l'on rencontre entre Kounou et la Sissili se termine par un massif d'aplite dont la composition minéralogique est la suivante: orthose, oligoclase, quartz très dominant, biotite, muscovite, épidote, chlorite, calcite, apatite et de fréquents minéraux opaques dont de l'hématite.

2.2.3.5. LES ENCLAVES

Les seules enclaves observées sont de deux types:

. On retrouve des enclaves de migmatites dans les granites intrusifs qui leur sont postérieurs, qu'il s'agisse des granites gris (exemple: enclaves de migmatites à cristaux automorphes de magnétite dans le granite gris de Bihia Est) ou de granites roses (enclaves de migmatites dans les intrusions roses des environs de Pro). On retrouve également des enclaves, voire des panneaux, soit de migmatites, soit de roches basiques dans les granites roses.

. Le deuxième type d'enclaves est constitué par des veines sombres et très foliées rencontrées dans les migmatites et certains granites auxquels nous avons donné le nom de terrain de veines surmicacées. En lames minces ces enclaves se révèlent comme étant constituées de biotite et d'amphibole. Cette dernière est parfois le minéral dominant. Ce serait donc des SCHLIEREN. (E. RAGUIN, 1975). Les amphiboles et les biotites flexueuses y enrobent des plagioclases souvent automorphes. Le quartz y est abondant en cristaux xénomorphes, mais aussi en petits cristaux automorphes: inclus dans les biotites et les plagioclases. On note dans ces enclaves la présence d'épidote et de grenat.

2.2.3.6 Indices de minéralisation

De nombreuses traces de minéralisation en or, cuivre, manganèse, bismuth, antimoine, tellure, plomb, étain, arsenic ont été décelées au Laboratoire dans divers échantillons des feuilles de Tenkodogo Ouest et Est par SAGATZKY en 1960. Cet auteur note que l'or est fréquent dans les sillons schisto-basiques mais que le complexe granito-gneissique ancien apparaît stérile.

Dans le bassin de la Sissili, il faut signaler les indices d'or natif en filons, de cuivre et de graphite mis en évidence dans le complexe de roches basiques et de filons de quartz de Koumbo. Dans les formations granito-migmatitiques nous avons également remarqué dans plusieurs affleurements la présence de gros cristaux automorphes de magnétite. Les analyses géochimiques que nous avons réalisées n'ayant concerné que les éléments majeurs, notre étude n'apportera pas d'informations supplémentaires dans le domaine des indices de minéralisations.

2.2.4. ETUDE GEOCHIMIQUE ET RADIOCHRONOLOGIQUE

2.2.4.1- Etude géochimique

Nous avons pu obtenir du Laboratoire de Géochimie de l'Institut Dolomieu, 32 analyses géochimiques destinées non pas à affiner la pétrographie du bassin versant de la Sissili (chose qui aurait nécessité certainement 10 fois plus d'analyses, et qui du reste sortirait du cadre d'un mémoire d'hydrogéologie), mais à nous permettre de caractériser les faciès distingués et à les comparer à ceux d'auteurs pétrographes dont les travaux ont couvert les régions voisines.

2.2.4.1.1. PRESENTATION ET TRAITEMENT DES ANALYSES

Les analyses qui ont été réalisées en fluorescence X sont données en pourcentages d'oxydes. Elles concernent seulement les éléments majeurs. Le fer est donné sous forme de Fe_2O_3 et la perte au feu en H_2O^+ .

Ces analyses ont toutes été traitées à l'aide des programmes en "basic" mis au point par le laboratoire de géochimie dont l'ordinateur Wang nous a permis de calculer, les compositions virtuelles, les paramètres C.I.P.W. Lacroix, les paramètres de H. DE LA ROCHE, ainsi que ceux A, F, M, et SI.

Nous indiquons ci-dessous les formules des différents paramètres:

Discrimination des granitoïdes

$$Q = \frac{Si}{3} - (K + Na + \frac{2}{3} Ca)$$

$$B = Fe + Mg + Ti$$

$$F = K - (Na + Ca)$$

$$Q_1 = Fe + Ti$$

$$A_1 = (Al - K) - (Fe - Mg) - 2 Na$$

$$R_2 = 6 Ca + 2 Mg + Al$$

$$P_1 = (\frac{Si}{3} - \frac{3 Na}{2} + K \frac{Ca}{3})$$

$$P_2 = K - (Ca + \frac{Na}{2})$$

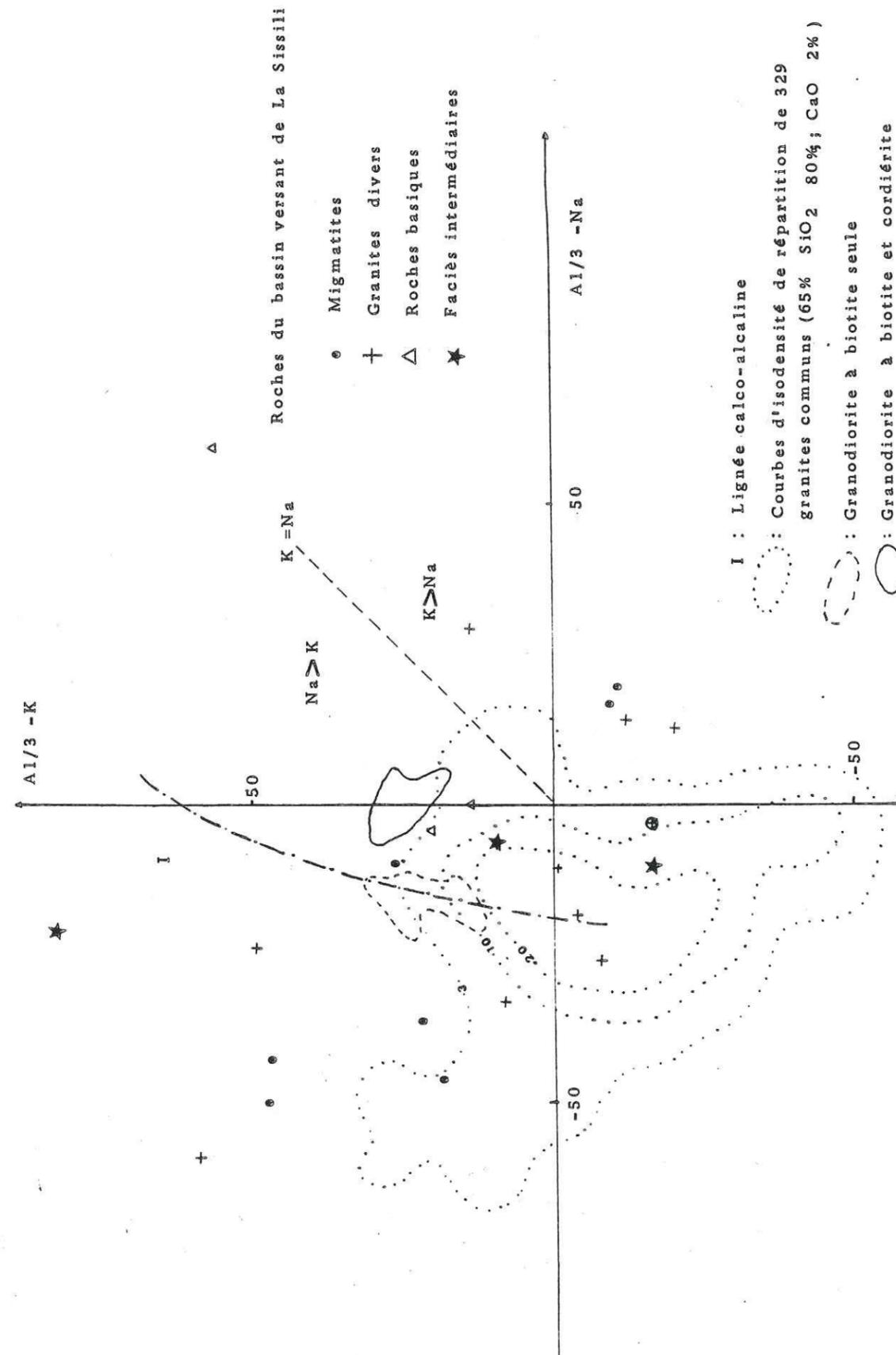
$$A = Al - (Na + K + 2 Ca)$$

$$Q_2 = \frac{Si}{4} - (Ca + Na + K)$$

$$A_2 = (Al - K) (Fe - Mg) - 4 Ca$$

$$R_1 = 4 Si - 11 (Na + K) - 2 (Fe + Ti)$$

Fig.17 - DIAGRAMME AL/3 - K / AL/3 - Na de H. DE LA ROCHE



Discrimination Ortho/ Para Basiques

$$AFTK = \frac{1}{3} (Al + Fe + Ti) - K$$

$$AFTNa = (Al + Fe + Ti) \times \frac{1}{3} - Na$$

$$\frac{5}{3} Al = 100 (5 Al/3) \frac{1}{SOM}$$

$$KCN = 100 (K + Na + 2 Ca) \frac{1}{SOM}$$

$$PF' = 100 (1000 \cdot PF + 8Fe) \frac{1}{27SOM}$$

Discrimination Ortho/Para acides

$$ALK = \frac{1}{3} Al - K$$

$$AlNa = \frac{Al}{3} - Na$$

Discrimination des grauwackes

$$\frac{Al + Fe + Ti}{Ca + Mg}$$

Paramètres A.F.M. et Si

$$A = Na_2O + K_2O = \text{somme des alcalins}$$

$$F = FeO + Fe_2O_3 = \text{fer total}$$

$$M = MgO$$

$$SI = \text{Indice de solification de H. KUNO} = \frac{100 \times Mg}{(MgO + FeO + Fe_2O_3 + Na_2O + K_2O)}$$

On pourrait se servir également des paramètres A, C, F de P. ESKOLA pour comparer nos formations à celles semblables étudiées dans les régions voisines. Nous en rappelons donc rapidement les formules de calcul.

Les pourcentages pondéraux des différents oxydes ayant été convertis en millimoles, on pose:

$$A' = Al_2O_3 + Fe_2O_3 - (Na_2O + K_2O)$$

$$C' = CaO$$

$$F' = FeO + MnO + MgO$$

dont on tire après réduction des proportions à 100

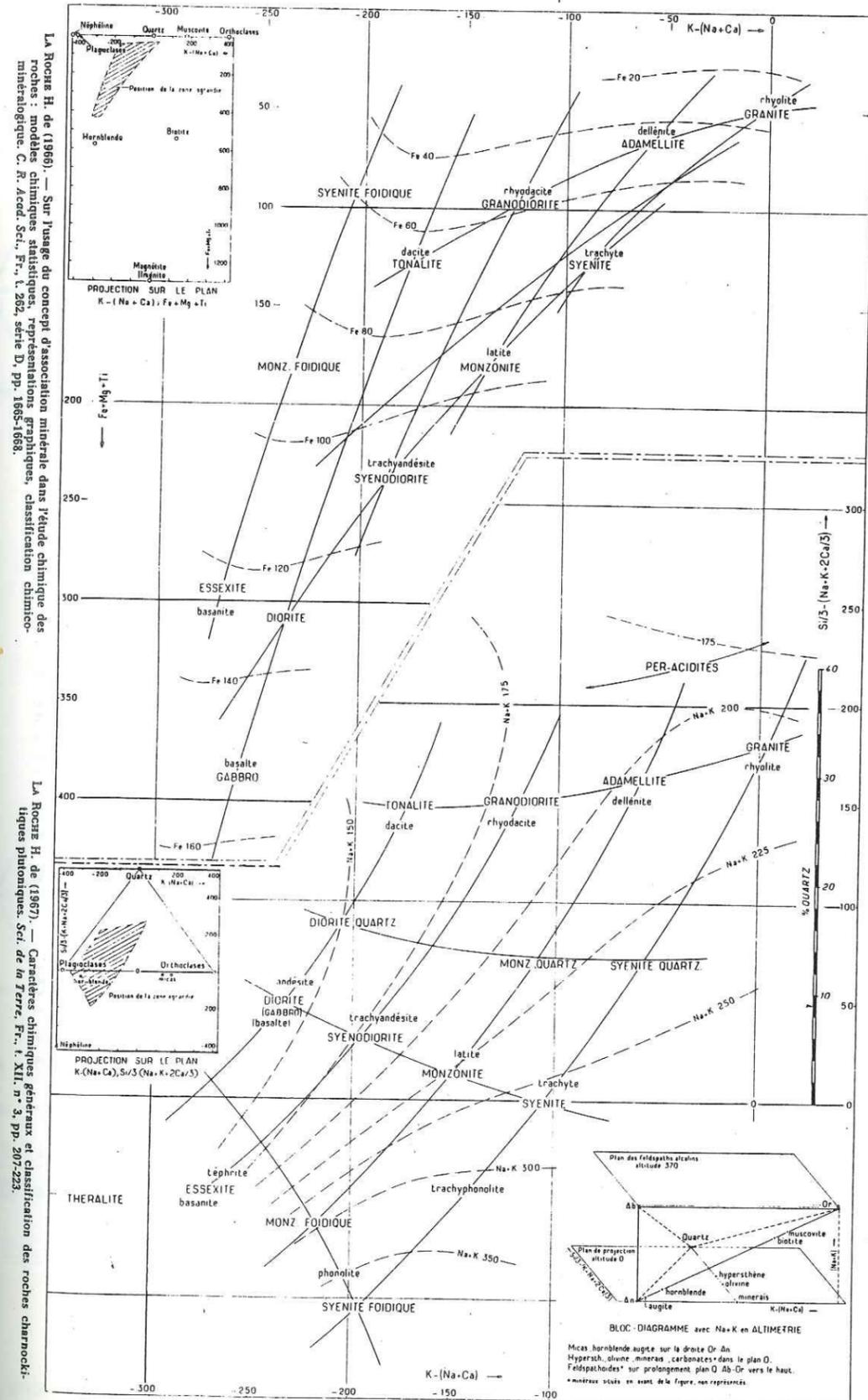
$$A = \frac{A' \times 100}{A' + C' + F'} \quad C = \frac{100 \times C'}{A' + C' + F'} \quad \text{et} \quad F = \frac{100 \times F'}{A' + C' + F'}$$

2.2.4.1.2. Les migmatites

Neuf analyses ont été réalisées sur des échantillons représentant les différents faciès rencontrés dans ce complexe hétérogène.

Les migmatites présentent une teneur élevée en SiO₂ variant de 68,08 % à 77,21 % avec une moyenne de 72,50 %. Les concentrations en Al₂O₃ sont de 14 % en moyenne et varient peu d'un faciès à l'autre. L'hétérogénéité entre faciès se note surtout au niveau des teneurs en alcalins et en ferromagnésiens.

77
Figure 18



La Roche H. de (1966). — Sur l'usage du concept d'association minérale dans l'étude chimique des roches : modèles chimiques statistiques, représentations graphiques, classification chimico-minéralogique. C. R. Acad. Sci., Fr., t. 262, série D, pp. 1665-1688.

La Roche H. de (1967). — Caractères chimiques généraux et classification des roches charnockitiques plutoniques. Sci. de la Terre, Fr., t. XII, n° 3, pp. 207-223.

Diagramme pour l'étude des roches ignées. Les paramètres sont calculés à partir des milliatomes-grammes de chaque élément contenus dans 100 g de roche ou de minéral.

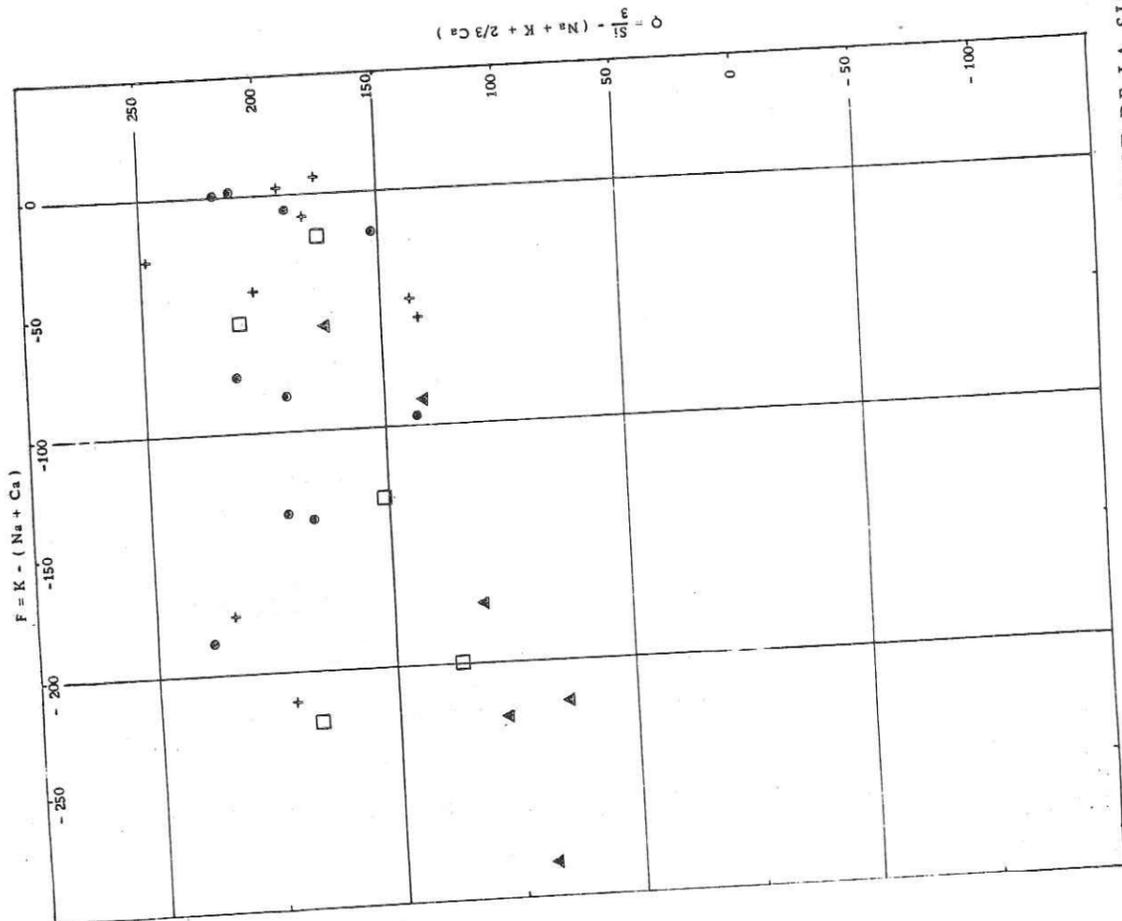
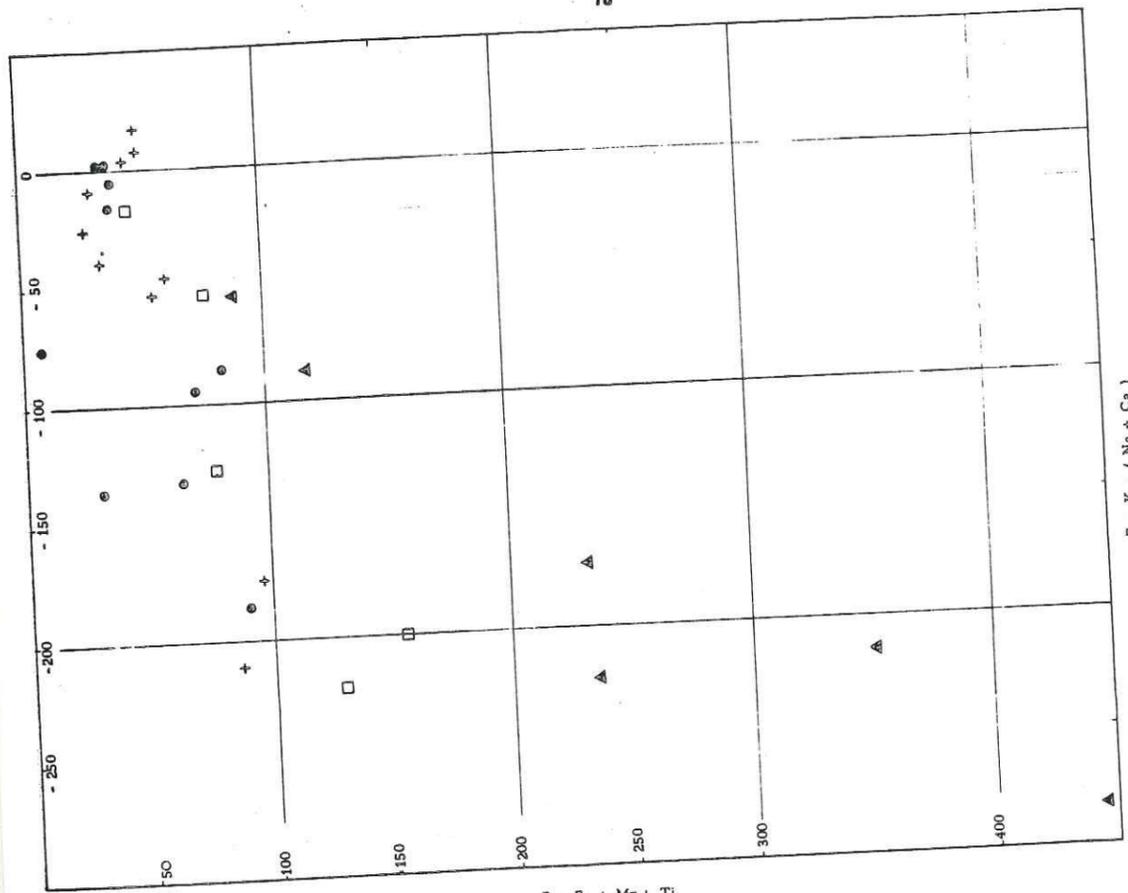


Figure 19-LES ROCHES DU BASSIN VERSANT DE LA SISSILI DANS LES DIAGRAMMES $F = f(F)$ et $F = f(B)$ de H. La Roche

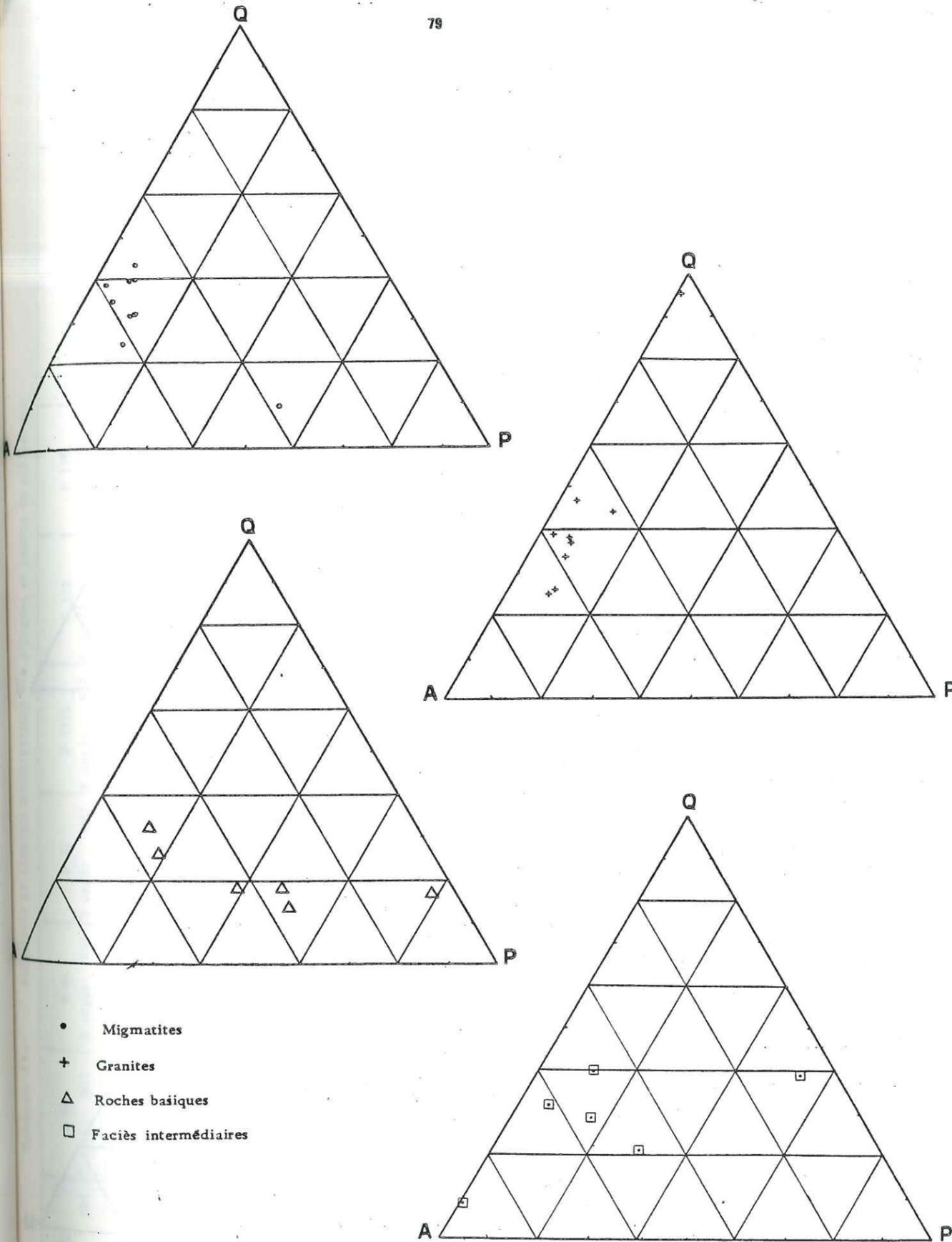
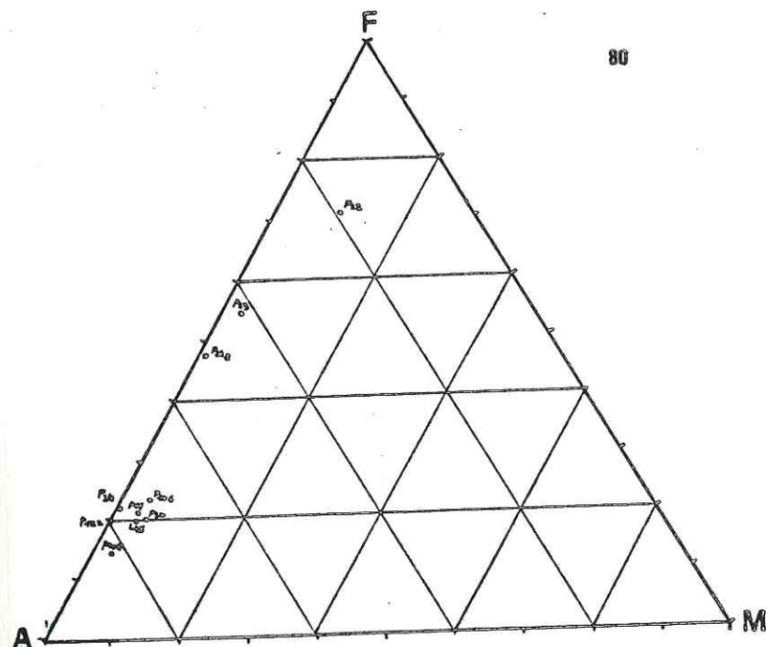
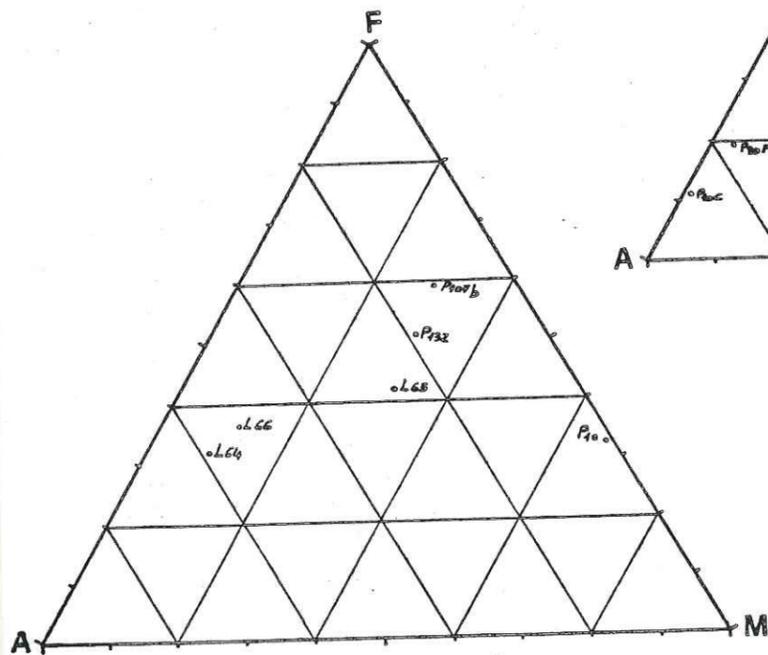


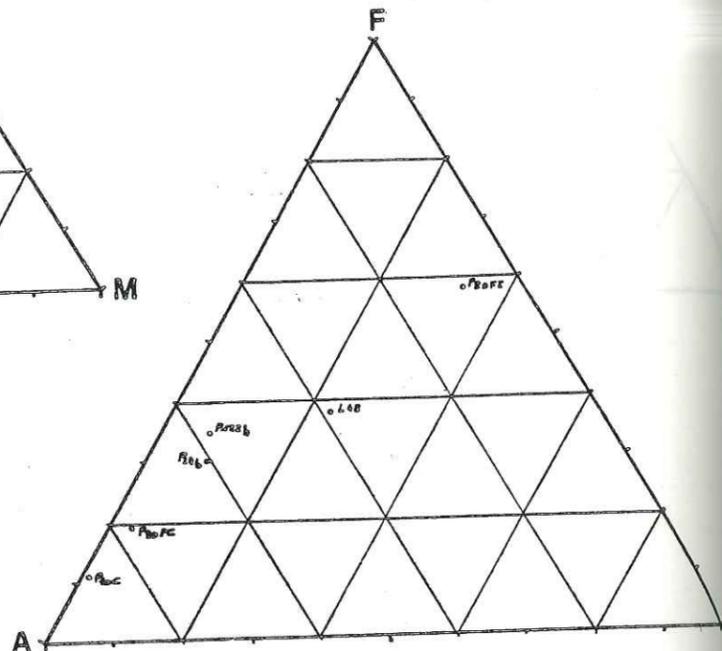
FIG. 20 : LES ROCHES DU BASSIN VERSANT DE LA SISSILI DANS LES DIAGRAMMES DE STRECKEISEN.



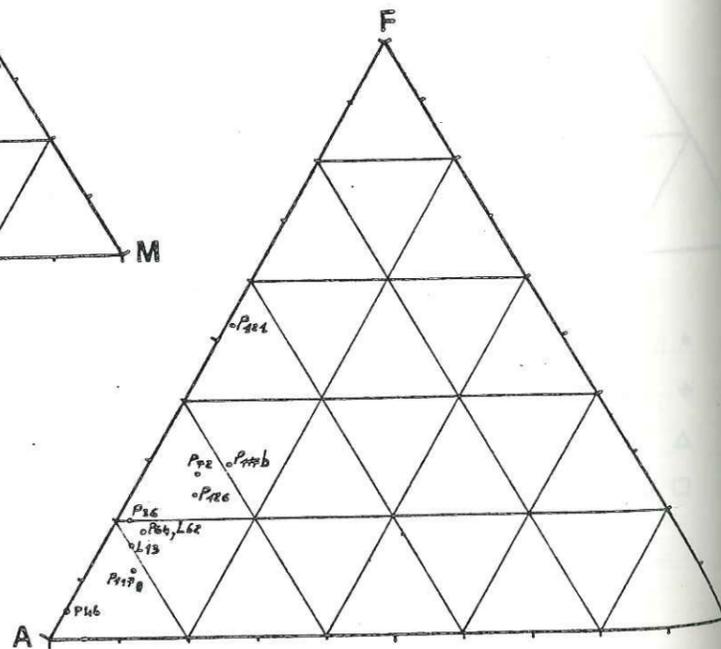
Granites



Roches basiques



Faciès intermédiaires



Migmatites

FIG. 21 : LES ROCHES DU BASSIN VERSANT DE LA SISSILLI DANS LES DIAGRAMMES AFM.

Tableau 17a - MIGMATITES ET GRANITES MIGMATIQUES - % d'oxydes et nombre de millièmes

	P 36	P 46	P 64	P 72	P 117b	P 121	P 126	L 13	L 62	P 117a
% oxyde	MAT	% oxyde								
SiO2	1224,44	77,21	1194,31	70,14	1170,51	74,33	1237,08	72,96	1214,28	71,61
Al2O3	283,15	13,85	299,52	14,92	290,25	10,88	214,68	14,07	277,62	14,49
Fe2O3	3,07	0,05	2,41	0,38	5,38	0,79	9,92	0,21	2,69	0,17
FeO	22,77	0,33	17,86	2,53	39,87	5,28	73,53	1,43	19,93	1,17
MnO	0,42	0,06	1,13	0,07	1,13	0,03	0,42	0,04	0,57	0,03
MgO	3,22	0,00	8,43	0,82	31,26	1,0	2,48	0,39	9,67	0,66
CaO	28,71	0,55	2,09	2,42	48,15	1,28	22,82	1,08	19,26	1,39
Na2O	74,86	4,28	150,37	4,39	107,13	5,19	167,48	2,97	95,84	2,36
K2O	104,67	3,40	51,17	2,40	70,27	0,20	4,25	5,12	108,70	4,85
TiO2	4,13	0,03	2,88	0,35	5,14	0,39	4,88	0,54	6,76	0,30
P2O5	0,57	0,02	1,13	0,12	0,00	0,04	0,57	0,00	0,00	0,05
CO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	0,77	0,46	0,61	0,99	1,03	1,00	0,00	0,65	0,00	0,70
TOTAL	99,91	1749	100,24	100,33	1778	99,52	1738	99,47	99,43	743
					10,45	1769	99,71	1771	29,20	767

Tableau 17b - COMPOSITION VIRTUELLE DES MIGMATITES

	P 36	P 46	P 64	P 72	P 117a	P 117b	P 121	P 126	L 13	L 62
Quartz	37,61	38,02	30,28	29,38	26,47	5,33	38,89	23,03	33,01	37,35
Orthose	29,16	20,09	14,24	14,18	32,73	3,30	1,18	22,79	30,25	28,65
Plagio	7,72	2,59	9,84	11,22	5,04	28,75	5,79	11,82	5,35	6,56
Corindon	19,63	36,21	39,43	37,14	30,20	17,26	43,91	34,26	25,13	19,96
Diopside	2,36	2,17	1,29	0,98	0,77	-	-	0,76	1,67	2,59
Hedenbergite	-	-	-	-	-	8,57	0,01	-	-	-
Enstatite	0,32	-	0,84	2,04	1,64	3,25	0,23	-	-	-
Ferrosilite	-	0,33	0,85	1,68	1,49	5,10	3,74	2,61	0,97	0,97
Magnétite	2,09	0,24	0,95	1,87	1,49	8,19	3,91	1,83	0,39	0,79
Ilménite	0,06	0,05	0,43	0,66	0,06	3,20	0,74	0,96	1,06	1,10
Rutile	0,29	-	-	-	0,10	-	-	-	1,02	0,56
Apatite	0,09	0,04	0,10	0,28	0,09	0,59	0,09	0,42	-	0,11
H2O	0,57	0,44	0,54	0,86	0,56	3,90	0,73	0,93	0,570	0,72
TOTAL	99,91	100,24	98,92	100,33	99,91	99,29	99,52	99,71	99,47	99,43

Tableau 17c - MIGMATITES - Paramètres de H. DE LA ROCHE

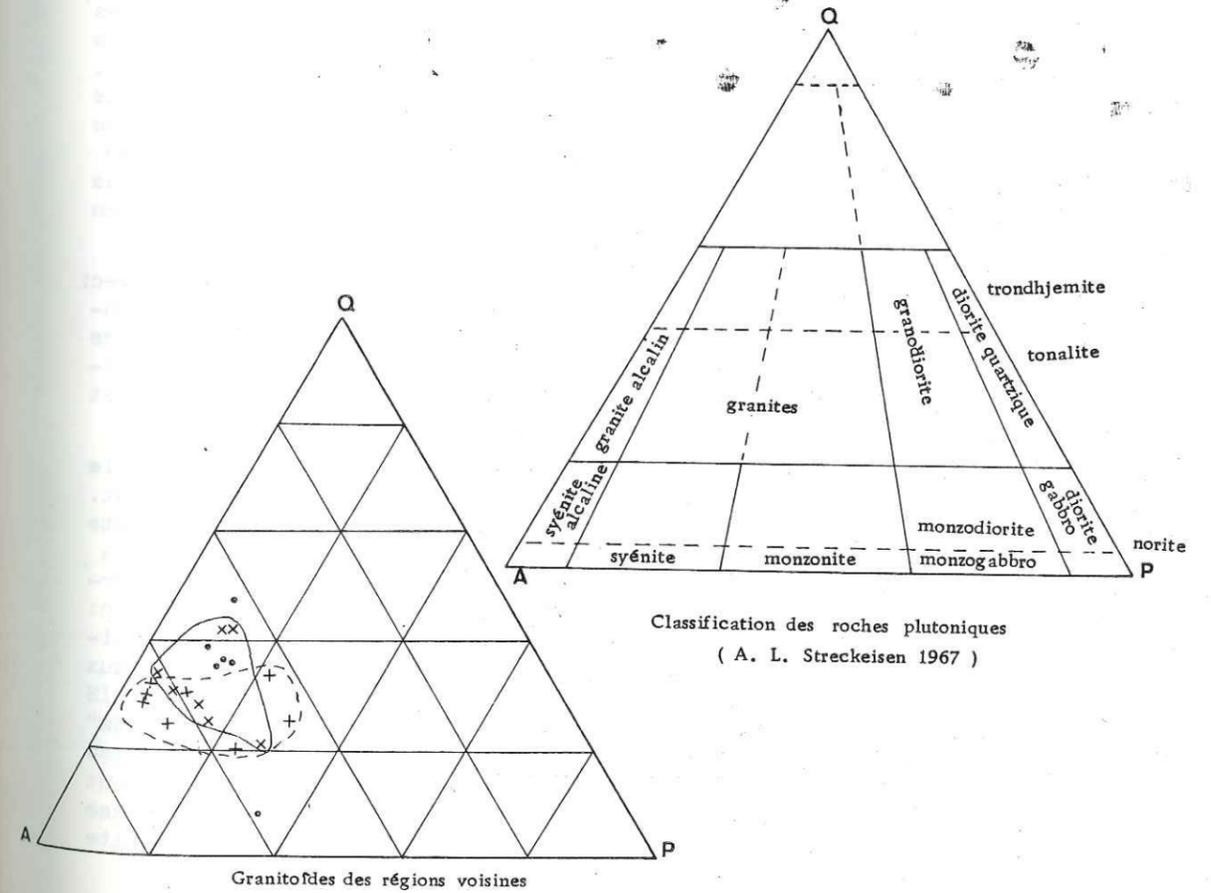
	Q	P1	B	P2	F	A	Q1	Ma+Ca	Q2	A1	A2	R1	R2
P 36	209,14	181,28	33,20	36,53	1,09	41,20	29,97	103,57	97,62	6,14	86,26	2858,96	461,85
P 46	211,51	145,72	5,57	-6,67	-75,72	43,37	5,57	147,92	101,15	-80,31	167,06	2815,68	332,13
P 64	171,72	108,95	31,59	-61,28	-136,47	23,45	23,16	187,64	59,77	-64,22	111,12	2514	540,0
P 72	172,17	115,73	64,66	-63,02	-133,85	15,47	44,32	184,81	59,40	-59,46	90,42	2515,27	593,99
P 117a	151,73	100,49	36,55	40,94	-16,65	14,93	20,17	134,28	46,06	-64,15	94,02	2165,91	433,13
P 117b	180,67	143,15	81,64	-31,43	-85,00	16,55	50,38	155,28	67,08	-8,27	41,38	2629,81	641,64
P 121	225,42	149,29	90,82	-102,31	-186,04	-2,68	88,34	190,30	114,71	-205,48	200,10	2882,72	356,59
P 126	136,82	86,33	71,50	-29,45	-94,79	8,29	45,46	175,27	27,53	-46,25	62,84	2118,66	628,17
L 13	187,38	145,88	39,06	41,52	-6,39	34,56	29,39	115,10	79,77	-35,70	104,84	2548,42	412,52
L 62	211,72	181,91	36,92	40,10	2,03	50,11	27,25	100,94	101,62	9,71	90,51	2863,57	446,87

Tableau 17d - MIGMATITES - Paramètres CIPW et S.I., A.F.M.

	P	Q	R	S	H	K	L	M	S.I.	A	F	M
P 36	37,50	0,67	3,23	1,40	0,15	-	-	7,63	1,40	0,78	0,20	0,01
P 46	-	0,65	11,26	0,52	1,13	-	-	0,00	0,00	0,95	0,05	0,00
P 64	29,02	0,48	2,85	0,34	1,22	-	-	0,63	4,19	0,77	0,18	0,04
P 72	14,18	0,47	2,39	0,36	1,47	-	-	0,81	7,80	0,65	0,28	0,08
P 117a	28,93	0,39	6,42	1,02	1,06	-	-	38,71	5,94	0,82	0,12	0,06
P 117b	1,34	0,11	0,25	0,18	2,50	-	5,03	1,44	11,27	0,59	0,29	0,11
P 121	9,38	0,76	3,92	0,03	0,91	-	51,56	0,05	0,86	0,47	0,53	0,01
P 126	12,93	0,34	2,62	0,62	1,38	-	-	1,10	8,95	0,67	0,24	0,09
L 13	27,60	0,54	5,31	1,13	0,65	-	-	0,68	3,85	0,80	0,16	0,04
L 62	26,73	0,68	3,79	1,35	1,06	-	-	0,66	4,19	0,77	0,18	0,04

Tableau 18

	AFTK	AFTNA	5 AL/3	KNC	PF'	ALK	Al-Na	Al+Fe+Ti	Ca+Mg
P 36	-0,28	29,51	197,84	33,11	0,25	-10,28	19,52	313,12	31,93
P 46	20,77	-45,15	198,97	33,48	0,05	18,91	-47,01	278,85	9,81
P 64	56,39	-42,80	191,86	35,37	0,18	48,68	-50,52	322,68	45,70
P 72	61,95	-28,75	188,71	35,76	0,75	47,18	-63,52	338,71	63,49
P 117a	-15,58	-13,16	190,02	36,02	0,17	-22,31	-19,89	306,08	35,45
P 117b	43,27	6,41	188,65	35,58	0,40	26,48	-10,37	340,63	79,40
P 121	96,76	-66,46	179,81	36,41	0,95	67,31	-95,91	303,01	25,31
P 126	37,55	-12,66	187,07	36,41	0,32	22,40	-27,81	354,05	70,63
L 13	-635	6,50	195,05	34,15	0,22	-16,15	-3,29	307,01	28,93
L 62	-0,94	25,86	199,29	32,69	0,23	-10,02	16,78	306,05	34,16



Classification des roches plutoniques
(A. L. Streckeisen 1967)

Figure 22

- Migmatites
- × Granites de type Baoulé
- + Granites de type Bondoukou

En reconstitution de composition minéralogique, on note une concordance entre les données des observations microscopiques et les compositions virtuelles au niveau de minéraux cardinaux: pourcentage élevé de quartz et nette prédominance des plagioclases sodiques sur ceux calciques. L'échantillon P 117B qui est une séquence très gneissique et sombre fait exception. En dehors de l'apatite et quelquefois de la magnétite, en lame mince les minéraux virtuels ferromagnésiens reconstitués sont remplacés par la biotite, du sphène, de la muscovite et parfois de l'amphibole (hornblende).

Dans les diagrammes $Q = f(F)$ et $B = f(F)$ de H. DE LA ROCHE, on remarque que les points représentatifs se répartissent en deux zones, l'une regroupant les échantillons P36, L62 et L17 correspondant à des migmatites granitiques, gneiss migmatitiques et migmatites ocellées du Centre et du Nord-Ouest du bassin versant de la Sissili; l'autre plus étendue englobe les migmatites granitiques (P6, P72, P117, P122, P126) et granites migmatitiques (P46) de l'Est et du Sud-Est du bassin. L'une a des valeurs de F très faibles et l'autre présente des valeurs de F très négatives.

Dans le diagramme de discrimination des roches métamorphiques para/ortho-acides: $ALK = f(AlNa)$, la bipartition déjà remarquée plus haut se retrouve: L62, P36 et L13 occupent l'angle sud-est, alors que les points représentatifs des roches migmatitiques du Sud-Est du bassin se distribuent dans le quadrant Nord-Ouest. Il est à noter que seuls P43, P117B et L13 tombent dans la plage des granites calco-alcalins communs délimitée par M. TEGYEV (1979). La répartition des migmatites dans ce diagramme montre qu'elles n'ont pas la même origine. Les échantillons P36 et L62 appartiennent à des panneaux de gneiss migmatitiques de la zone 5 du ranch Léo et de l'Est du village de Kayero. Ce sont, pensons-nous, des lambeaux libériens peu repris par la granitisation avec apport que nous retrouvons dans le Sud-Est du bassin versant de la Sissili. Ils seraient paramétamorphiques. Nous notons qu'un échantillon comme P117b qui à l'affleurement présente les mêmes caractéristiques que les formations P36 et L62 se situe dans le quadrant Nord-Ouest. L'origine para ou ortho des migmatites est donc difficile à préciser même en prenant en considération les données du terrain et les paramètres de discrimination géochimiques et cela en raison des multiples phases de granitisation qui affectent les formations.

Dans le diagramme triangulaire Q - A - P de A.L. STRECKEISEN avec: Q = quartz, A = orthose + albite, P = plagioclases An, les points représentatifs des analyses sur migmatites sont tous groupés à l'exception de celui P 117b, beaucoup plus plagioclasiqne et provenant d'un gneiss migmatitique de la partie sud-est du bassin (Prata). Cette distribution est comparable à celle des granites divers que nous étudierons plus loin.

Ces différentes analyses montrent qu'il est géochimiquement difficile de caractériser les migmatites par rapport aux granites qui les intrusent. Cela pose encore le problème de la notion de granite dans un contexte polyphasé et métamorphisé dans la catazone comme le nôtre. En fait la distinction migmatites-granites semble subjective et surtout liée à l'importance que chaque auteur accorde soit au métamorphisme, soit la granitisation: ainsi J. DUCCELLIER place notre région d'étude dans un énorme massif granitique dit de Ouagadougou, dont il précise dans les caractères généraux que la structure migmatitique est fréquente à tel point que P. MASCLANIS (1955) nommait "granites migmatitiques" l'ensemble des "granites baoulés" qui affleure dans la partie est de la Haute-Volta. Il n'en demeure pas moins que dans le diagramme de STRECKEISEN, les migmatites se distribuent dans une plage réduite appartenant à un pôle qui dénote leur richesse en minéraux alcalins et en quartz. Elles ont une composition de granite alcalin ou d'un granite commun (fig. 20).

2.2.4.1.3. Les granites et les aplites

Nous avons déjà en partant des observations à l'oeil nu et microscopiques (couleur, taille des minéraux, mode de fracturation et d'altération, composition minéralogique) distingué trois types de granites: granites grossiers de type Sapouy, granites gris de type Mouna et granites roses de type Pikalia.

Nous avons réalisé pour l'ensemble des granites 10 analyses géochimiques sur des échantillons prélevés dans des faciès représentant tous les types que nous avons eu à distinguer.

Ces granites montrent des teneurs normales en SiO_2 , puisque pour le groupe nous avons une moyenne de 74 % (la même que celle des migmatites). Les valeurs extrêmes sont données par le granite de type Sapouy (68,39) et l'aplite de Kounou (90,88). La moyenne des teneurs en Al_2O_3 est de 12,4 %, mais les écarts rencontrés sont beaucoup plus importants que dans le cas du SiO_2 .

La distribution des points figuratifs des différentes analyses dans les diagrammes $Q = f(F)$ et $Al, K = f(Al, Na)$ montre que c'est vis-à-vis des teneurs en alcalin et en calcium que la dispersion est la plus grande. Beaucoup de points figuratifs sont inclus ou se rapprochent de la plage des granites communs délimitée par TANGUEY. Dans ce diagramme $Al, K = f(Al, Na)$ on remarque surtout les positions extrêmes des points figuratifs de la séquence aplitique et des faciès de contagion (P 22, P 24b, P 23).

Du point de vue classification, l'ensemble des granites se distribue depuis la famille des tonalites jusqu'à celle des péracides en passant par l'adamellite et le granite commun.

Dans le diagramme $B = f(F)$, on note un regroupement des points figuratifs de tous les granites (P 23 et P 24A exceptés). Ceci traduit la faible variation des teneurs en ferromagnésiens lorsqu'on passe d'un granite à l'autre.

Dans le diagramme Q-A-P de STRECKEISEN, tous les points figuratifs des granites (l'aplite P 22 exceptée) se regroupent dans la même zone de distribution que les migmatites, c'est-à-dire dans celle des granites alcalins et des granites normaux. Cette similitude de plage de distribution tend à indiquer que soit le magma qui a donné naissance aux granites à un chimisme voisin de celui des migmatites, soit que certains de ces granites ne sont que des produits de remobilisation homogénéisés des migmatites.

En fait, le mode de gisement et les relations de ces deux types de formations ainsi que la nature des enclaves prouvent qu'il y a dans le bassin versant de la Sissili la manifestation des deux phénomènes à la fois. En effet, si le caractère intrusif de massifs granitiques, comme ceux de Pikalia, de Mouna et de Bihia-Est apparaît clairement, des granites comme ceux de Sapouy-Ouest, de Galo, de Métio-Ouest ou de Taré semblent plutôt correspondre à des granites d'anatexie vu leur mode de passage progressif aux migmatites encaissantes.

Dans le Sud-Est du bassin de la Sissili notamment, la mise en place des granites roses succède ou coïncide avec une granitisation syntectonique avec apport en alcalins et en SiO_2 qui affecte les migmatites y faisant apparaître les faciès biséquentiels dont nous avons déjà parlé. Du point de vue chimisme on s'aperçoit que les granites grossiers de type Sapouy Ouest sont semblables aux granites gris. Ici, la distinction ne peut

être que d'ordre génétique et granulométrique. Les granites gris sont fins, intrusifs et contiennent des enclaves des granites de type Sapouy.

Les teneurs en SiO₂ et en Al₂O₃, et même en ferromagnésiens font des granites roses de type Pikalia et des faciès qui leur sont associés (aplite), un groupe chimique bien distinct.

Comparaison des granitoïdes du Bassin versant de la Sissili avec ceux d'autres régions voisines

Les études géochimiques récentes touchant les formations des noyaux intersillons ne sont pas nombreuses en Haute-Volta. Les plus marquantes sont celles de Ducellier (1963) et ARNOULD (1961). Nous tirerons des travaux de ces auteurs, puis de ceux de P. GAMSONRE (1975) sur le degré carré de Ouahigouya, quelques exemples d'analyses que nous comparerons aux autres.

On remarque que pour l'ensemble des granitoïdes pris pour exemples, les teneurs en SiO₂ sont plus faibles que celles observées dans les formations granitiques du bassin versant de la Sissili. Par contre, ces dernières roches ont des teneurs en Al₂O₃ plus faibles. Elles sont donc plus siliceuses moins alumineuses, mais aussi plus sodico-potassiques que les formations auxquelles elles sont comparées. Ces aspects ressortent nettement lorsque nous reportons nos analyses sur diagramme de STRECKEISEN. On voit que si les plages de distribution se recouvrent partiellement, celles des granitoïdes des régions voisines se montrent plus plagioclasiques et moins quartzifères que les formations granitiques du bassin de la Sissili.

Dans les diagrammes $Q = f(F)$ et $B = f(F)$ de H. De La ROCHE, Les formations granitiques du bassin versant de la Sissili occupent la même plage de distribution que les granitoïdes de Ouahigouya étudiés par E.P. GAMSONRE (1975). Les formations du bassin de la Sissili sont donc comparables aux granitoïdes des régions voisines. Les hétérogénéités remarquées ne sont pas plus importantes que celles observées dans des formations similaires.

Origine des analyses données en comparaison

MIGMATITES

- 364 migmatites de Nomo (Haute-Volta) - J. DUCCELLIER (1966)
- 2168 migmatites libériennes panneau de la Comoé (massif Dabakala)
- 2169
- 1095 migmatites libériennes, massif de Korogo
- M. ARNOULD (1961)
- SW₂ 174, SW₄ 265/1, SW₃ 41/M, NW₄ 12/1 Gneiss et migmatites du degré carré de Ouahigouya -GAMSONRE (1975)

GRANITES

- D99 - Granites porphyroïdes à grands cristaux de microcline perthitique. Plaine au pied nord de l'Adrar Tiraouanine-R. KARPOFF (1960)
- D161- Granodiorite à hornblende et biotite:Oued Tibeggatine. R.KARPOFF (1960)
- 521- Granite monzonitique à deux micas: Ferkessédougou-ARNOULD(1961)
- 570- Granite monzonitique à biotite: Guiembé-ARNOULD (1961)
- 933- Granite akéritique à biotite : Winnèba N.R. JUNNER (1949)
- 1761- Granodiorite à biotite et amphibole (type Koffissouka)-lit du N° Zi-ARNOULD (1961).
- 119/187- Granite porphyroïde monzonitique à biotite Mankono (C.I) S.G. P.M. (1958)

Tableau 18a - GRANITES ET APLITES INTRUSIFS

	P 11		P 22		P 23		P 24		P 24 A		P 30		P 106		P 108		P 122		L 45	
	% oxyde	MAT	% oxyde	MAT	% oxyde	MAT	% oxyde	MAT	% oxyde	MAT	% oxyde	MAT	% oxyde	MAT	% oxyde	MAT	% oxyde	MAT	% oxyde	MAT
SiO ₂	71,20	1184,99	90,88	1512,53	71,62	1191,98	74,78	1244	73,18	1217,95	70,73	1177,47	68,29	1136,56	72,17	1201,14	78,30	1303,16	70,73	1177,47
Al ₂ O ₃	14,39	283,94	4,45	87,20	10,94	215,86	12,44	245,46	10,86	214,28	14,58	287,68	15,02	296,37	14,08	277,82	12,57	248,02	14,67	287,68
Fe ₂ O ₃	0,27	3,41	0,35	4,35	0,79	9,91	0,28	3,51	0,76	9,56	0,29	3,60	0,35	4,38	0,19	2,44	0,23	2,82	0,32	3,97
FeO	1,82	25,27	2,32	32,44	5,27	73,42	1,87	26,03	5,09	70,80	1,92	26,69	2,33	32,46	1,30	18,08	1,50	20,91	2,11	29,41
MnO	0,03	0,42	0,01	0,14	0,10	1,41	0,05	0,71	0,00	0,00	0,03	0,42	0,00	0,00	0,16	2,26	0,03	0,42	0,00	0,00
MgO	0,43	10,67	0,38	9,43	0,36	8,93	0,03	0,74	0,08	1,98	0,56	13,89	0,63	15,63	0,28	6,95	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	1,29	2,30	0,00	0,00	3,12	55,64	1,17	20,86	1,40	24,96	1,44	25,68	1,58	31,74	1,23	21,93	0,87	15,51	1,66	14,14
Na ₂ O	2,51	21,00	0,00	0,00	4,08	131,66	3,37	108,75	5,95	192,00	2,58	84,25	3,64	117,46	2,98	96,16	2,90	95,58	4,02	129,72
K ₂ O	5,02	106,58	0,72	15,29	0,57	12,10	4,21	89,38	0,25	5,31	5,46	115,92	4,83	102,54	5,12	108,70	3,90	82,80	4,95	105,09
TiO ₂	0,42	5,26	0,25	3,13	0,39	4,88	0,22	2,76	0,44	5,51	0,45	5,64	0,65	8,14	0,19	2,38	0,17	2,13	0,56	7,01
P ₂ O ₅	0,01	0,14	0,00	0,00	0,12	1,70	0,04	0,57	0,11	1,96	0,06	0,85	0,14	1,98	0,02	0,28	0,03	0,42	0,13	1,84
CO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	0,83		1,42		1,81		0,38		0,82		0,93		1,13		0,82		0,54		1,10	
TOTAUX	98,22	1725	100,78	1665	99,18	1707	98,85	1743	98,94	1744	99,03	1741	98,80	1747	98,55	1738	101,04	1770	100,21	1777

Tableau 18 b GRANITES APLITES - Paramètres de H. De LA ROCHE

	Q	P1	B	P2	F	A	Q1	Ma + Ca	Q2	A1	A2	R1	R2
P 11	192,09	159,26	44,61	43,08	2,58	50,36	33,94	104	85,67	-2,64	103,36	2608,78	443,29
P 22	488,89	488,89	49,15	15,29	15,29	72,52	39,73	0,00	362,85	45,35	99,69	5802,52	106,66
P 23	216,48	169,19	97,14	-109,35	-175,18	-39,16	88,21	187,29	98,60	-133,94	55,61	3010,16	567,34
P 24	202,82	195,40	33,05	14,14	-40,22	5,60	32,30	129,61	92,15	-90,21	101,43	2734,29	372,13
P 24 A	192,03	104,35	87,86	-115,65	-211,65	-32,94	85,87	216,97	82,21	-253,39	187,49	2529,65	368,04
P 30	176,10	143,03	49,82	48,61	6,99	37,15	35,93	108,93	69,44	-11,13	85,45	2445,92	469,54
P 106	137,69	89,64	60,61	12,07	-46,65	12,88	44,98	149,20	32,40	-62,30	88,07	2036,24	518,07
P 108	180,89	140,12	29,85	38,69	-9,38	29,09	22,90	118,09	73,49	-36,77	94,96	2505,25	423,31
P 122	247,66	206,05	25,87	20,50	-26,28	40,62	25,87	109,09	133,90	-45,66	126,91	3220,72	341,11
L 45	134,46	79,47	54,53	10,63	-54,22	-4,55	40,39	159,32	27,34	-94,30	85,20	2004,34	495,35

Tableau 18c

GRANITES APLITES - Paramètres de H. de LA ROCHE

	AFTK	AFTNA	5 AL/3	KNC	PF'	ALK	AL-NA	Al+Fe+Ti	Ca+Mg
P 11	-0,61	24,96	198,75	32,70	0,27	-11,92	13,65	317,88	33,67
P 22	27,22	42,51	256,47	8,93	1,45	13,98	29,27	127,53	9,43
P 23	89,26	-30,29	169,56	40,06	0,89	59,85	59,85	-59,69	64,57
P 24	3,21	-16,16	186,90	36,53	0,31	-7,55	-26,92	277,76	21,61
P 24A	94,74	-91,94	171,33	39,54	0,87	66,12	-120,56	300,15	26,95
P 30	-8,04	24,62	194,93	33,95	0,28	-20,01	12,64	323,61	39,57
P 106	11,24	-3,67	188,28	36,02	0,32	-3,75	-18,66	341,35	47,37
P 108	-8,45	4,08	193,70	34,68	0,19	-16,08	-3,55	300,72	28,88
P 122	8,50	-2,27	197,79	33,08	0,26	-0,11	-10,90	273,89	15,51
L 45	4,86	-19,76	184,33	37,45	0,29	-8,60	-33,22	329,85	43,74

Tableau 18d

GRANITES ET APLITES - Paramètres CIPW et SI. AFM

	P 11	P 22	P 23	P 24 A	P 24	P 30	P 106	P 108	P 122	L 45
Quartz	34,01	86,84	38,04	36,05	36,03	30,65	23,86	32,24	44,25	23,36
Orthose	29,66	4,25	3,36	1,47	24,87	32,26	28,54	30,25	23,04	29,25
Plagioclase AM	6,33	0,00	9,85	2,18	5,54	6,75	7,91	5,97	4,12	7,36
Plagioclase AB	21,23	0,00	34,52	50,34	28,51	21,83	30,90	25,21	24,53	34,01
Corindon	2,50	3,67	0,00	-	0,30	1,95	0,90	1,44	2,06	-
Diopside	-	-	0,85	0,21	-	-	-	-	-	0,01
CPX	-	-	3,33	3,35	-	-	-	-	-	0,00
Hédenbergite	-	-	0,49	0,09	0,07	1,39	1,56	0,69	0,00	1,41
Eustatite	1,07	0,94	0,49	0,09	0,07	1,39	1,56	0,69	0,00	1,41
OPX	-	1,56	2,22	1,78	1,30	0,39	0,89	-	1,04	0,85
Ferrosilite	-	1,56	2,22	1,78	1,30	0,39	0,89	-	1,04	0,85
Magnétite	2,31	1,71	3,90	3,76	1,38	1,42	1,72	1,66	1,11	1,56
Ilménite	0,06	0,47	0,74	0,83	0,41	0,85	1,23	0,34	0,32	1,06
Apatite	0,02	0,00	0,28	0,26	0,09	0,14	0,33	0,04	0,07	0,30
H2O	0,59	1,30	1,54	0,56	0,29	0,83	1,01	0,66	0,46	0,99
TOTAL	98,22	100,78	98,18	98,94	98,85	99,03	98,80	98,55	101,04	100,21

GRANITES ET APLITES - Paramètres CIPW et SI. A.F.M.

Tableau 18e

	P	Q	R	S	H	K	L	M	SI	A	F	M
P 11	26,95	0,59	4,12	1,32	0,45	-	-	25,22	4,28	0,75	0,21	0,04
P 22	24,31	20,58	-	-	0,32	-	-	66,89	10,10	0,19	0,71	0,10
P 23	7,24	0,80	1,36	0,09	1,49	-	3,50	0,71	3,25	0,42	0,55	0,03
P 24	29,02	0,61	4,97	0,82	0,77	-	-	0,04	0,31	0,78	0,22	0,00
P 24A	8,53	0,63	4,41	0,03	1,19	-	3,50	0,04	0,66	0,51	0,48	0,01
P 30	19,70	0,50	4,10	1,39	1,02	-	-	0,74	5,18	0,74	0,20	0,05
P 106	15,98	0,35	3,87	0,87	0,83	-	-	0,70	5,35	0,72	0,23	0,05
P 108	34,63	0,52	4,77	1,13	0,35	-	-	3,08	2,84	0,82	0,15	0,03
P 122	38,41	0,86	5,95	0,88	0,73	-	-	0,00	0,00	0,80	0,20	0,00
L 45	17,98	0,33	4,42	0,81	0,87	-	-	0,70	4,76	0,75	0,20	0,05

Tableau 19 Composition en millièmes

	1468	1985	412	545	329	655	659	382	24	1874
SiO2	64,44	68,07	68,70	68,90	73,20	72,18	75,00	63,40	69,40	70,70
Al2O3	17,82	15,05	13,85	14,60	14,58	14,40	14,75	15,85	16,15	14,05
Fe2O3	1,94	1,43	2,45	1,25	1,26	2,95	0,46	0,35	1,10	1,95
FeO	1,33	2,76	1,98	1,80	0,58	0,43	0,25	6,10	1,00	1,25
MnO	0,07	0,08	0,13	0,06	0,02	0,08	0,07	0,08	0,05	0,02
MgO	1,14	1,94	0,75	1,50	0,16	0,18	0,04	2,40	0,90	1,45
CaO	5,12	4,12	2,13	2,70	0,78	0,73	0,84	4,70	3,75	2,90
Na2O	5,06	2,95	4,85	4,40	4,75	4,35	5,05	3,35	3,25	3,55
K2O	1,29	2,40	2,10	3,75	4,05	4,35	3,50	1,45	3,60	2,62
TiO2	0,32	0,75	0,50	0,40	0,00	0,20	0,00	0,60	0,55	0,32
P2O5	0,16	0,15	0,12	0,18	0,01	0,02	0,04	0,02	0,07	0,09
CO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2O ⁺	1,70	0,13	1,07	0,95	0,51	0,61	0,40	2,10	0,35	0,38
H2O ⁻	0,08	0,40	0,25	0,00	0,05	0,12	0,09	0,10	0,20	0,23
	100,47	100,23	98,88	100,49	99,95	100,60	100,49	100,50	100,37	99,51

Composition virtuelle

	1468	1985	412	545	329	655	659	382	24	1874
Quartz	18,13	29,15	26,64	21,34	28,16	28,45	30,38	20,18	27,48	31,81
Orthose	7,62	14,18	12,40	22,15	23,93	25,70	20,68	8,56	21,27	15,18
Plagio	An	22,10	19,46	9,78	9,78	3,80	3,90	23,18	18,14	13,79
	Ab	42,81	24,96	41,03	37,23	40,19	36,80	43,73	27,50	30,03
Corindon		0,46	0,01		0,98	1,25	1,22	0,27	0,25	0,31
CPX	Diopside	1,57			1,84					
	Hedenbergite	0,21			0,74					
OPX	Enstatite	2,11	4,83	1,86	2,87	0,37	0,44	0,09	5,97	2,34
	Ferrosilite	0,32	2,79	1,02	1,32	0,06	0,20	10,07	0,11	0,19
Magnétite	2,81	2,07	3,55	1,81	1,82	1,06	0,66	0,50	1,59	2,82
Hématite						2,21				
Ilménite	0,60	1,42	0,94	0,75		0,37		1,13	1,04	0,60
Apatite	0,37	0,35	0,28	0,42	0,02	0,04	0,09	0,04	0,16	0,21
Rutile										
H2O	1,78	0,52	1,32	0,95	0,56	0,73	0,49	2,20	0,55	0,61
Total	100,47	100,29	98,88	100,50	99,95	100,60	100,49	100,50	100,37	99,51

composition virtuelle

composition en millièmes

	119/187	1761	933	570	521	D 161	D 99	364	1098	2168		SW 2	SW 3	SW 4	NW 4	
Quartz	37,71	17,05	23,10	27,02	31,73	21,72	37,78	42,67	28,18	6,07		32,22	28,75	29,97	33,75	
Orthose	20,09	7,32	21,50	25,40	25,70	21,86	13,00	8,86	5,31	9,75		20,45	10,75	13,76	11,99	
Plagio.	AM	21,31	14,03	3,40	3,40	14,76	10,80	7,80	22,38	26,71		8,65	11,78	10,68	12,12	
	AB	23,94	35,53	30,54	32,15	32,15	28,76	31,30	34,26	38,07		24,28	29,02	30,12	36,30	
Corindon	3,92	1,66	0,83	3,69	3,69	1,83	3,66	2,54	1,55	0,25		5,28	6,79	5,88	0,00	
CPX	Hedenbergite															0,14
	Diopside															0,09
OPX	Enstatite	1,51	7,42	2,39	2,11	5,60	1,74	0,87	2,54	8,96		3,11	5,05	4,58	1,82	
	Ferrosilite	0,05	2,77	3,23	2,57	1,49	1,55	1,90	1,90	3,71		0,63	4,73	2,78	1,31	
Magnétite	2,78	3,87	1,17	2,10	2,10	3,33	1,59	2,39	1,95	3,08		3,45	1,68	1,82	1,21	
Hématite																
Ilménite	0,37	1,51	1,10	1,04	0,02	1,32	0,75	0,75	0,85	1,89		1,63	0,89	0,85	0,55	
Apatite	0,21	0,99	0,37	0,47	0,47	0,85	0,30	0,04	0,42	1,04		0,25	0,25	0,18	0,11	
Rutile																
H2O	0,10	1,18	1,36	0,75	0,90	0,50	0,65	1,05	0,82	1,30		0,49	0,78	0,55	0,38	
TOTAL	99,75	100,66	99,67	100,31	100,67	100,81	100,63	100,21	100,22	100,26		100,44				
	119/187	1761	933	570	521	D 161	D 99	364	1098	2168		SW2-174	SW3-41M	SW4	NW 4-12	
SiO2	72,02	61,14	67,00	68,70	72,40	65,20	72,40	74,70	67,25	57,16		68,05	65,94	67,95	73,43	
Al2O3	16,92	17,73	15,86	15,80	15,90	16,60	15,60	13,10	17,40	19,23		16,92	18,73	18,18	13,70	
Fe2O3	1,92	2,67	0,81	1,45	1,70	2,30	1,10	1,65	1,35	2,13		2,38	1,16	1,26	0,84	
FeO	1,00	3,33	2,62	2,50	0	2,40	1,70	2,10	2,04	3,78		2,15	3,47	2,16	1,38	
MnO	0,07	0,10	0,03	0,05	0,01	0,08	0,00	0,04	0,03	0,10		0,04	0,05	-	-	
MgO	0,61	2,98	0,96	0,85	0,30	2,25	0,70	0,35	1,02	3,60		1,25	2,09	1,84	0,76	
CaO	1,94	4,85	3,04	1,80	0,95	3,45	2,35	1,60	4,75	6,18		1,89	2,52	2,26	2,57	
Na2O	2,83	4,20	3,61	3,35	3,80	3,25	3,40	3,70	4,05	4,50		2,87	3,43	3,56	4,29	
K2O	3,40	1,24	3,64	4,30	4,35	3,70	2,20	1,50	0,90	1,65		3,46	1,82	2,33	2,03	
TiO2	0,20	0,80	0,58	0,55	0,15	0,70	0,40	0,40	0,45	1,00		0,86	0,47	0,45	0,29	
P2O5	0,11	0,42	0,16	0,20	0,20	0,36	0,13	0,02	0,18	0,44		0,11	0,11	0,08	0,09	
CO2	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,17		-	-	-	-	
H2O ⁺	0,08	0,93	1,15	0,65	0,85	0,40	0,35	1,05	0,65	1,09		0,38	0,65	0,40	0,33	
H2O ⁻	0,23	0,25	0,21	0,10	0,05	0,10	0,30	0,00	0,17	0,21		0,11	0,13	0,06	0,05	
	99,75	100,64	99,56	100,30	100,65	100,79	100,63	100,21	100,22	100,24		100,47	100,91	100,62	99,92	

GNEISS ET MIGMATITE

GRANITES BAOULES

MIGMATITES

Figure 19b : Migmatites, granites Baoules, gneiss et migmatites. (en millièmes)

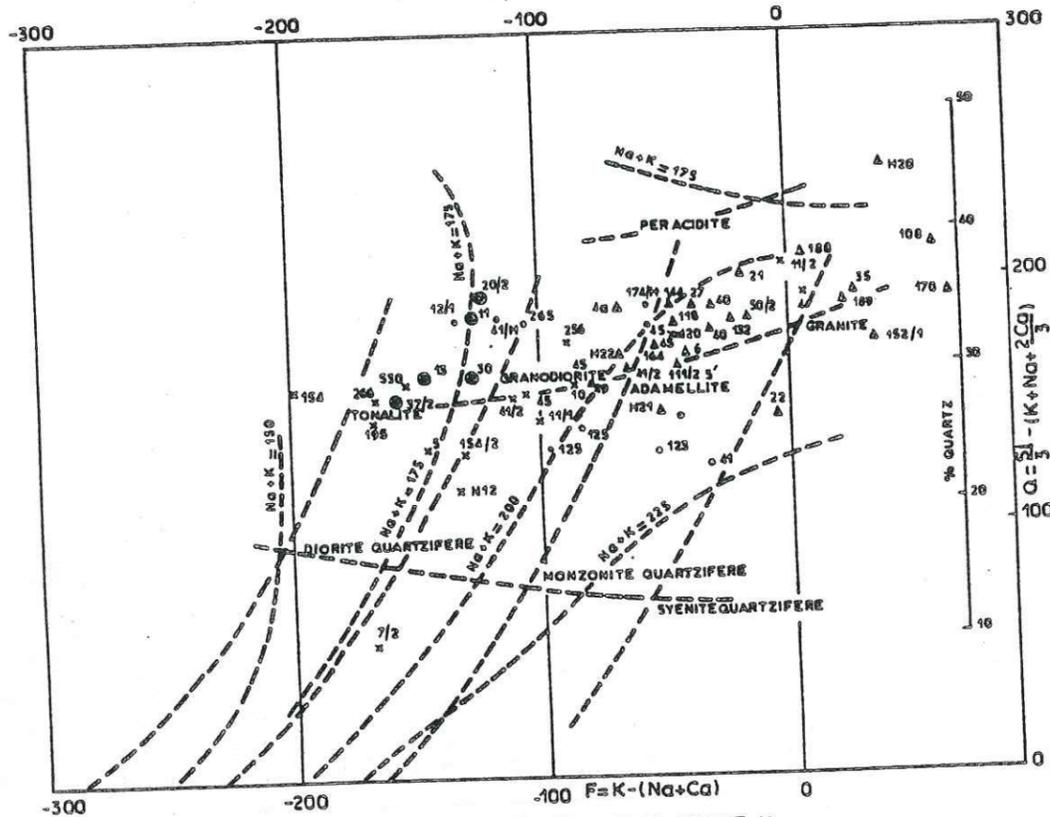


DIAGRAMME Q=f(F) DE DE LA ROCHE H.
Ensemble des granitoïdes du degré carré de OUAHIGOUYA

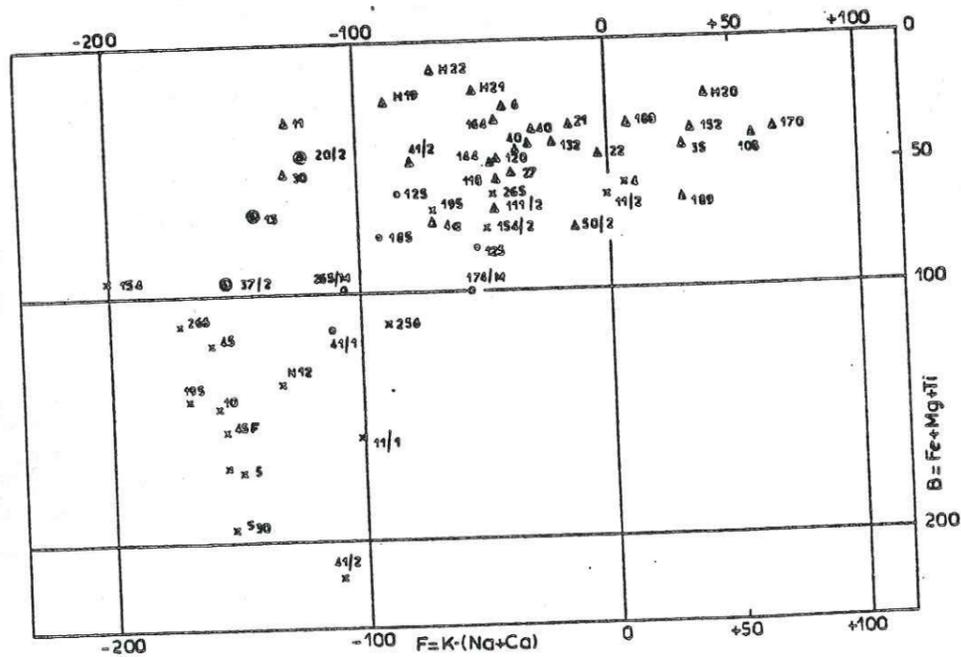


DIAGRAMME B=f(F) DE DE LA ROCHE H.
Granitoïdes du degré carré de OUAHIGOUYA d'après E. P. Gamsoué (1975)

Légende

- x Granodiorites orientées
- o Granites gris migmatitiques
- o Gneiss migmatitiques
- Δ Facies intermédiaires entre granites leucocrates (S.I.) et granites gris migmatitiques
- Δ Granites leucocrates (S.I.)

Figure 23

- 24 - Granodiorite leucocrate à biotite et épidote-batholite de Saria
DUCELLIER (1966)
- 1468 - Granite de Dixcove (Ghana) N.R. JUNNER (1949)
- 1985 - Granodiorite à biotite, chlorite, épidote (hornblende rare)
Koumbia (H.V.) J. DUCELLIER 1966
- 1874 - Granodiorite à biotite et amphibole-biotite de Boñdoukou
D.SOULE De LAFONT (1956) choisi
par L.BODIN "type de granodiorites ou massifs circonscrits de
l'A.O.."
- 412 - Granite akéritique à biotite et épidote-Est Foulla (H.V.)
J. DUCELLIER
- 545 - Granite akéritique à biotite et hornblende verte-NaKoalba-(H.V.)
J. DUCELLIER
- 329 - Granite orthosi-albitique à biotite chloritisée et muscovite
Ibi (H.V) - J. DUCELLIER
- 655 - Granite orienté à biotite-Est Arbinda (H.V)
- 659 - Filon aplitique dans granite d'Arbinda
- 382 - microdiorite quartzique à amphibole Sogodin - J. DUCELLIER (1966)

Granite de Kossouka-Analyse K1

% oxydes		MAT		Paramètres		H. De LA ROCHE	
SiO ₂	66,38	1104,77	Q	151,90	AFTK	64,00	
Al ₂ O ₃	17,94	353,98	P1	115,55	AFTN	25,84	
Fe ₂ O ₃	0,44	5,45	B	67,62	5Al/2	198,63	
FeO	2,90	40,41	P2	-38,18	KNC	32,45	
MnO	0,05	0,71	F	-92,71	PF'	0,35	
MgO	0,68	16,87	A	64,87			
CaO	3,06	54,57	Q1	50,75	AlK	47,08	
Na ₂ O	3,38	109,07	Na+Ca	163,63	AlN	8,92	
K ₂ O	3,34	70,91	Q2	41,65			
TiO ₂	0,39	4,88	A1	35,93	Al+Fe+Te	404,73	
P ₂ O ₅	0,04	0,57	A2	93,81	Ca+Mg	71,43	
CO ₂	0,00	0,00	R ₂	715,11			
PF	1,24		R1	2337,81	SI	6,33	
TOTAL	99,84	1762			A	0,63	
					F	0,31	
					M	0,06	

2.2.4.1.4. LES ROCHES BASIQUES ET LES FACIÈS INTERMÉDIAIRES

Nous les avons divisées en deux groupes: les roches basiques proprement dites, et les faciès intermédiaires d'endo- ou d'exométamorphisme liés à la mise en place des premières dans leur encaissant ou de leur digestion par les venues magmatiques postérieures.

Les roches basiques

Cinq analyses ont été réalisées sur les principaux faciès distingués: P10 = amphibolite de Bihia Est, P 132, amphibolite du Walème, P 107b dolérite de Sapouy Sud, L 64, L 65 et L 66 granodiorites de Guénien, de Bazilakoa sud et de Bazilakoa Nord.

Leurs teneurs en SiO₂ varient de 47,45 (P 107,b) à 68,95% (L 64) et celles en Al₂O₃ de 9,99 à 17,05 %. Mais c'est surtout au niveau des ferromagnésiens que les variations de concentrations sont importantes lorsque l'on passe d'une extrémité à l'autre.

Dans les diagrammes Q = f (F) de De LA ROCHE, on remarque que les roches basiques présentent une très grande dispersion allant pratiquement de l'essexite à la granodiorite. C'est dire que les venues magmatiques dont elles sont issues ont un chimisme varié. Donc aux différences de structure, de texture, de composition minéralogique s'ajoutent des différences géochimiques, mais aussi certainement d'histoire génétique. On pourrait de ce point de vue opposer les orthoamphibolites de Bihia et de Walème à la dolérite typique de Sapouy Sud.

Dans les diagrammes B = f (F) et AlK = f (AlNa) la dispersion notée dans le diagramme Q = f (F) s'accroît encore.

Si nous plaçons nos analyses de roches basiques dans les diagrammes triangulaires Q-A-P, nous retrouvons la distribution observée au niveau du diagramme Q = f (F). En effet, on part d'une composition subgranitique avec P 64 et P 65 pour arriver à une composition gabbroïque avec P 10. La position de ce dernier point figuratif vient appuyer l'hypothèse génétique que nous avons déjà avancée pour cette amphibolite de Bihia: c'est à dire celle d'un basalte remobilisé en amphibolites dans un faciès métamorphique mésozonal.

Les faciès intermédiaires

Nous regroupons ici six analyses réalisées sur des faciès très locaux, non cartographiables à notre échelle de travail et résultant tous d'effet de métamorphisme de contact ou d'une remobilisation des zones de transition entre intrusif et encaissant.

Ces roches aident à comprendre la chronologie des venues magmatiques, et parfois les mouvements d'éléments chimiques dans les zones de contact. En cela le faciès de l'analyse P 10c est remarquable: c'est un faciès résultant de l'interaction entre les amphibolites et le granite rose de type Pikalia ou des filons pegmatitiques qui l'accompagnent. Il se produit une sorte d'enveloppe de surcuisson avec surconcentration de l'aluminium et du potassium, et un départ important de la silice vers l'encaissant basique. Ce qui autorise minéralogiquement comme nous l'avons déjà noté, l'apparition de muscovite abondante accompagnée quelquefois (Walème, Koumbo) de cristaux de grenat dans une ambiance de feldspath potassique rose et de quartz.

Tableau 20

a) Composition chimique en % d'oxydes et en milliatomes

	P 10		P 132		P 107 b		L 64		L 65		L 66	
	% oxydes	MAT	% oxydes	MAT	% oxydes	MAT						
SiO ₂	50,04	832,82	53,08	883,42	47,45	789,72	68,95	1147,54	57,76	961,31	64,98	1081,47
Al ₂ O ₃	9,99	197,12	17,05	336,42	14,50	286,11	14,73	290,66	16,95	334,45	15,18	299,52
Fe ₂ O ₃	0,89	11,10	1,05	13,10	1,66	26,77	0,49	6,16	0,91	11,38	0,63	7,94
FeO	5,91	82,24	6,97	97,05	11,06	153,92	3,28	45,64	6,06	84,31	4,23	58,82
MnO	0,18	2,54	0,13	1,84	0,18	2,54	0,06	0,85	0,11	1,56	0,07	0,99
MgO	14,19	352,01	4,67	115,85	6,31	156,53	1,11	27,54	5,13	127,26	1,52	37,71
CaO	15,57	277,64	8,20	146,22	9,08	161,91	2,40	42,80	6,89	122,86	3,55	63,30
Na ₂ O	0,20	6,45	2,63	84,87	2,04	65,83	3,00	96,81	2,77	89,39	3,24	104,55
K ₂ O	0,00	0,00	0,42	8,92	0,56	11,89	3,93	83,44	1,76	37,37	3,76	79,83
TiO ₂	0,15	1,88	0,79	9,89	1,72	21,54	1,72	21,54	0,73	9,14	1,07	13,40
P ₂ O ₅	0,23	3,25	0,27	3,82	0,25	3,54	0,08	1,13	0,35	4,95	0,34	4,81
CO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	2,19		2,78		4,47		0,87		1,30		1,13	
TOTAL	99,54	1767	98,04		99,48	1674	99,64	1752	100,78	1785	99,70	1752

ROCHES BASIQUES

b) Composition virtuelle

	P 10	P 132	P 107b	L 64	L 65	L 66
Quartz	5,67	13,09	7,30	29,12	13,69	22,83
Orthose	-	2,48	3,30	23,22	10,40	22,21
Plagioclase	An.	26,36	33,47	28,75	11,38	28,61
	Ab	1,69	22,25	17,26	25,38	27,43
Corindon	-	-	-	1,36	-	0,13
CPX	Diopside	38,43	4,23	11,41	-	2,55
	Hédenbergite	-	-	-	-	-
OPX	Enstatite	17,52	9,66	10,42	2,76	11,59
	Ferrosilite	-	-	-	1,67	-
Magnétite	0,15	-	-	2,43	-	-
Hématite	7,44	8,91	14,13	-	7,74	5,40
Ilménite	0,28	0,27	0,38	1,38	0,23	0,14
Sphène	-	1,57	3,72	-	1,63	-
Rutile	-	-	-	-	-	0,99
Apâtite	0,54	0,63	0,59	0,18	0,82	0,80
H ₂ O	11,44	1,89	3,06	0,71	0,52	0,59
TOTAL	99,55	98,50	100,36	99,64	100,26	99,71

c) ROCHES BASIQUES - Paramètres de H. de LA ROCHE

	Q	P1	B	P2	F	A	Q1	Na+Ca	Q2	A1	A2	R1	R2
P 10	86,06	175,38	447,23	-280,86	-284,09	-364,61	95,22	284,10	-76,88	442,88	-1172,11	3069,86	2566,99
P 132	103,21	109,51	235,90	-179,73	-222,16	-49,80	120,05	231,09	-19,14	163,46	-263,06	2261,06	1445,44
P 107 b	77,58	98,64	352,76	-182,93	-215,84	-115,43	196,23	227,74	-42,79	124,40	-355,27	1911,51	1570,65
L 64	173,64	139,60	88,48	7,75	-56,16	24,81	60,94	139,60	63,85	-10,66	60,29	2485,61	602,49
L 65	111,78	108,04	232,84	-130,18	-174,87	-36,02	105,58	212,25	-9,28	169,98	-225,92	2239,30	1326,14
L 66	133,91	102,73	117,87	-35,74	-88,02	-11,45	80,16	167,85	22,68	-18,45	-4,45	2137,39	754,75

	AFTK	AFTNA	5 AL/3	KNC	PF'	ALK	Al Na	Al+Fe+Ti	Ca+Mg
P 10	97,45	90,99	107,76	61,42	0,69	65,75	59,25	292,34	629,65
P 132	143,24	67,29	172,40	39,59	0,77	103,22	27,27	456,47	262,07
P 107 b	148,89	94,95	154,82	43,46	1,28	83,48	29,54	482,34	318,44
L 64	33,76	20,39	190,27	34,81	0,46	13,44	0,07	351,59	70,33
L 65	109,31	57,29	175,13	39,01	0,68	74,12	22,10	440,03	250,12
L 66	46,73	22,01	180,95	37,58	0,55	20,01	-41,70	379,69	101,01

	P	Q	R	S	H	K	L	M	SI	A	F	M
P 10	0,52	0,20	0,01	0,00	7,10	-	2,00	-	66,98	0,01	0,32	0,67
P 132	3,00	0,22	0,34	0,11	1,51	-	6,02	63,22	29,67	0,19	0,51	0,30
P 107 b	1,53	0,15	0,25	0,18	1,50	-	3,2	61,69	29,18	0,12	0,59	0,29
L 64	10,71	0,49	2,20	0,86	1,16	-	-	0,85	9,40	0,59	0,32	0,09
L 65	3,32	0,22	0,55	0,42	1,77	-	10,93	82,07	30,86	0,27	0,42	0,31
L 66	8,68	0,35	1,67	0,76	0,68	-	-	38,21	11,36	0,52	0,36	0,11

d) ROCHES BASIQUES - Paramètres ICPM Lacroix et SI, A.F.H.

	AFTK	AFTNA	5 AL/3	KNC	PF'	ALK	Al-Na	Al+Fe+Ti	Ca+Mg
P 10C	-0,57	227,01	247,70	17,06	0,10	-7,25	220,33	681,04	1,98
P 24b	67,87	-6,86	190,05	35,25	0,36	50,07	-24,66	370,48	78,59
P80 FI	132,74	112,71	167,80	42,46	0,42	110,67	90,65	402,03	265,15
P80 PC	-5,48	0,99	190,07	35,61	0,27	-17,7	-10,69	316,63	33,50
P122b	28,30	12,03	187,07	35,67	0,51	9,65	-6,60	309,20	57,90
L48	111,30	9,50	180,35	37,89	0,52	84,80	-16,99	416,69	175,76

	P 10C		P 24B		P 80 FI		P 80 PC		P 122b		L 48	
SiO2	48,83	812,68	67,37	1121,35	61,08	1016,56	71,71	1193,48	72,35	1204,13	62,05	1032,71
Al2O3	33,40	661,0	16,07	317,08	17,02	335,83	14,27	281,57	12,83	253,15	17,09	337,21
Fe2O3	0,18	2,28	0,42	5,32	0,59	7,34	0,28	3,50	0,49	6,09	0,68	8,48
FeO	1,21	16,88	2,83	39,43	3,91	54,36	1,86	25,92	3,24	45,10	4,52	62,85
MnO	0,80	11,31	0,04	0,57	0,05	0,71	0,04	0,57	0,06	0,85	0,09	1,27
MgO	0,08	1,98	0,99	24,56	2,58	64	0,38	9,43	0,81	20,09	3,11	77,15
CaO	0,00	0,00	3,03	54,03	11,28	201,14	1,35	24,07	2,12	37,80	5,53	98,61
Na2O	0,00	0,00	4,04	130,37	0,66	21,30	3,24	104,55	2,82	91,00	4,00	129,40
K2O	10,72	227,59	2,62	55,62	0,06	1,27	5,23	111,04	3,52	74,73	1,30	27,60
TiO2	0,07	0,88	0,69	8,64	0,36	4,51	0,45	5,64	0,38	4,76	0,65	8,14
P2O5	0,00	0,00	0,14	1,98	0,24	3,40	0,10	1,41	0,07	0,99	0,26	3,68
CO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	4,91		0,85		1,61		1,10		0,77		1,23	
Total	100,31	1735	99,10	1759	99,44	1710	100,02	1761	99,46	1739	100,52	1787

b) Paramètres de H. DE LA ROCHE

	Q	P1	B	P2	F	A	Q1	Na+Ca	Q2	A1	A2	R1	R2
P10C	43,30	43,30	22,02	227,59	227,59	433,41	20,04	0,00	-24,41	416,23	450,59	707,14	664,97
P 24b	151,74	104,56	77,96	-63,58	-128,76	23,03	53,40	184,40	40,29	-19,46	65,53	2332,30	690,38
P80 FI	182,19	238,59	130,20	-210,51	-221,16	-89,02	66,20	222,44	30,43	294,27	-472,32	3685,57	1670,69
P80 PC	166,19	121,94	44,49	34,69	-17,58	17,83	35,06	128,62	58,71	-58,56	94,24	2332,43	444,86
P122b	210,44	177,55	76,04	-8,56	-54,06	11,82	55,94	128,80	97,50	-34,65	28,30	2881,61	520,16
L 48	121,50	89,67	156,63	-135,70	-200,40	-17,00	79,48	228,01	2,57	56,63	-90,64	2244,82	1083,17

c) Composition virtuelle

	P10C	P89 FI	P89 QC	P 24b	P 122b	L 48
Quartz	6,59	31,83	29,25	26,27	35,91	17,99
Orthose	63,34	0,35	30,90	15,48	20,80	7,68
Plagioclases An Ab	-	43,30	6,04	14,11	10,06	24,79
Corindon	21,89	-	1,06	1,41	0,69	-
Diopside	-	8,63	-	-	-	0,73
CPX Hédenbergite	-	-	-	-	-	-
OPX Enstatite	0,19	2,42	0,94	2,46	2,01	7,40
Ferrosilite	2,39	-	0,90	-	2,22	-
Magnétite	0,89	-	1,38	-	2,40	-
Hématite	-	4,99	-	3,62	-	5,77
Ilménite	0,13	0,10	0,85	0,08	0,72	0,19
Sphène	-	0,74	-	-	-	0,66
Apatite	-	0,56	0,23	0,33	0,16	0,61
Rutile	-	-	-	0,64	-	0,27
H2O	4,85	1,12	1,01	0,49	0,60	0,66
TOTAL	100,32	99,66	100,02	99,10	99,46	100,72

	P	A	R	S	H	K	L	M	SI	A	F	M
P 10C	25,31	0,10	-	-	2,52	-	-	0,09	0,60	0,88	0,11	0,01
P 24b	14,07	0,41	1,83	0,43	0,67	-	-	43,55	9,08	0,61	0,30	0,09
P 80 F	4,85	0,65	0,06	0,06	2,17	-	1,62	90,80	33,12	0,09	0,58	0,33
P80PC	21,90	0,45	4,96	1,06	0,83	-	-	0,51	3,46	0,77	0,19	0,03
P 122b	12,13	0,66	2,29	0,82	1,36	-	-	0,63	7,45	0,58	0,34	0,07
L 48	5,73	0,27	0,85	0,21	1,37	-	23,08	60,81	22,85	0,39	0,38	0,23

d) FACIES INTERMÉDIAIRES

Composition virtuelle et paramètres C.I.P.W. LACROIX et SI, A.F.M.

Dans les différents diagrammes les points figuratifs des faciès intermédiaires occupent des positions qui tiennent au degré d'influence de l'intrusif sur son encaissant ou vice-versa. Il n'y a donc pas d'intérêt à leur attribuer une place dans la classification générale des faciès pétrographiques.

CONCLUSION

L'étude géochimique situe bien les formations cristallines du bassin versant de la Sissili par rapport à celles des autres régions de Haute-Volta et des pays voisins. Les deux grands groupes: roches basiques et roches acides (migmatites et granites) ressortent avec netteté. Dans le deuxième groupe, les distinctions que nous avons faites après description des affleurements et observations des lames minces s'estompent du point de vue géochimique. Or ces différenciations nous ont paru utiles du point de vue hydrogéologique, car l'hydraulicité des formations ne dépend pas seulement de la composition minéralogique qualitative, mais surtout de la taille et de la disposition des minéraux. Ainsi une migmatite gneissique à débit planaire, à phénocristaux de quartz et de feldspaths parcourue par des filonnets pegmatitiques sera beaucoup plus productive qu'un granite gris homogène à grain moyen de même composition géochimique et minéralogique. On retiendra donc que ce sont les facteurs d'anisotropie qui tiennent à l'hétérogénéité granulaire des minéraux ou à la texture de la roche et à sa fissuration intime qui conditionnent l'hydraulicité des granitoïdes.

Nous démontrerons cette dernière assertion en étudiant ci-après la tectonique du bassin versant de la Sissili et le comportement hydrogéologique des formations qui l'occupent.

2.2.4.2. ESSAI RADIOCHRONOLOGIQUE

2.2.4.2.1. INTRODUCTION

L'absence généralisée de fossiles dans les formations précambriennes de l'Afrique de l'Ouest a amené les géologues qui se sont intéressés à la stratigraphie du bouclier de cette région à recourir aux âges isotopiques mesurés sur minéraux ou sur roches totales par les méthodes des Rb/Sr, K/Ar ou U/Pb.

Parmi les auteurs dont les travaux ont porté sur les âges isotopiques des formations du bouclier ouest africain, on citera notamment BONHOMME M. (1962), GIRAUDON R. (1964), ROCCI G. (1965), BARDET M. (1966), LAMEYRE J. (1967), FURON R. (1969), PAPON A. (1967, 1968, 1969), HURLEY P.N. (1970), mais aussi et surtout VACHETTE M. (1964, 1966, 1969, 1973, 1979).

Ces différents travaux ont permis à BESSOLES B. (1977), en s'appuyant essentiellement sur les études de PAPON A. de proposer dans le domaine Baoulé-Mossi, auquel appartient le bassin versant de la Sissili, les divisions suivantes:

- un domaine de type Sasca représenté dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. L'orogénèse éburnéenne, bien qu'importante, n'y a pas été assez intense pour effacer les caractères des roches libériennes;
- un domaine de type "géosynclinal" dans lequel les formations libériennes sont difficilement reconnaissables, couvrant le reste de la Côte d'Ivoire et une partie du Ghana et de Haute-Volta.

On remarque malheureusement que les âges isotopiques obtenus sur les formations cristallines et précambriennes de Haute-Volta, sont non seulement peu nombreux, mais aussi mal répartis. Ces âges nous viennent surtout des travaux de LEDENT D., DELHAL J. et TRINQUARD R., (1969), de LAY (1970), de GAMSOURE E.P. (1975), de VACHETTE (M.) et de OUDRAOGO O.F. (1975).

BESSOLES B. (1977) rattache les parties orientales de la Haute-Volta aux domaines de type Sasca et les régions orientales du territoire voltaïque au type "géosynclinal". On remarque que point n'est fait cas de la partie centrale de la Haute-Volta occupée par le môle granito-migmatitique de Ouagadougou. Or, en examinant l'extension de ce môle (450 km de long sur parfois 200 km de large), il est permis de penser qu'une telle région peut être assimilée à un domaine de type Sasca, dans laquelle, il serait donc possible d'identifier d'importantes formations d'âge libérien.

C'est du moins l'hypothèse que nous avons cherché à vérifier avec le Laboratoire de Géochronologie de l'Institut Dolomieu qui a réalisé ces mesures radiochronologiques sur quelques formations du bassin versant de la Sissili.

L'hypothèse paraissait du reste plausible dans la mesure où CLAY (1970), qui a travaillé sur la carte géologique de Gaoua-Batié au 1/200 000 a signalé un âge K/Ar de $2\ 600\text{ Ma} \pm 135$ sur une amphibolite de Kpéré situé au Sud de Batié.

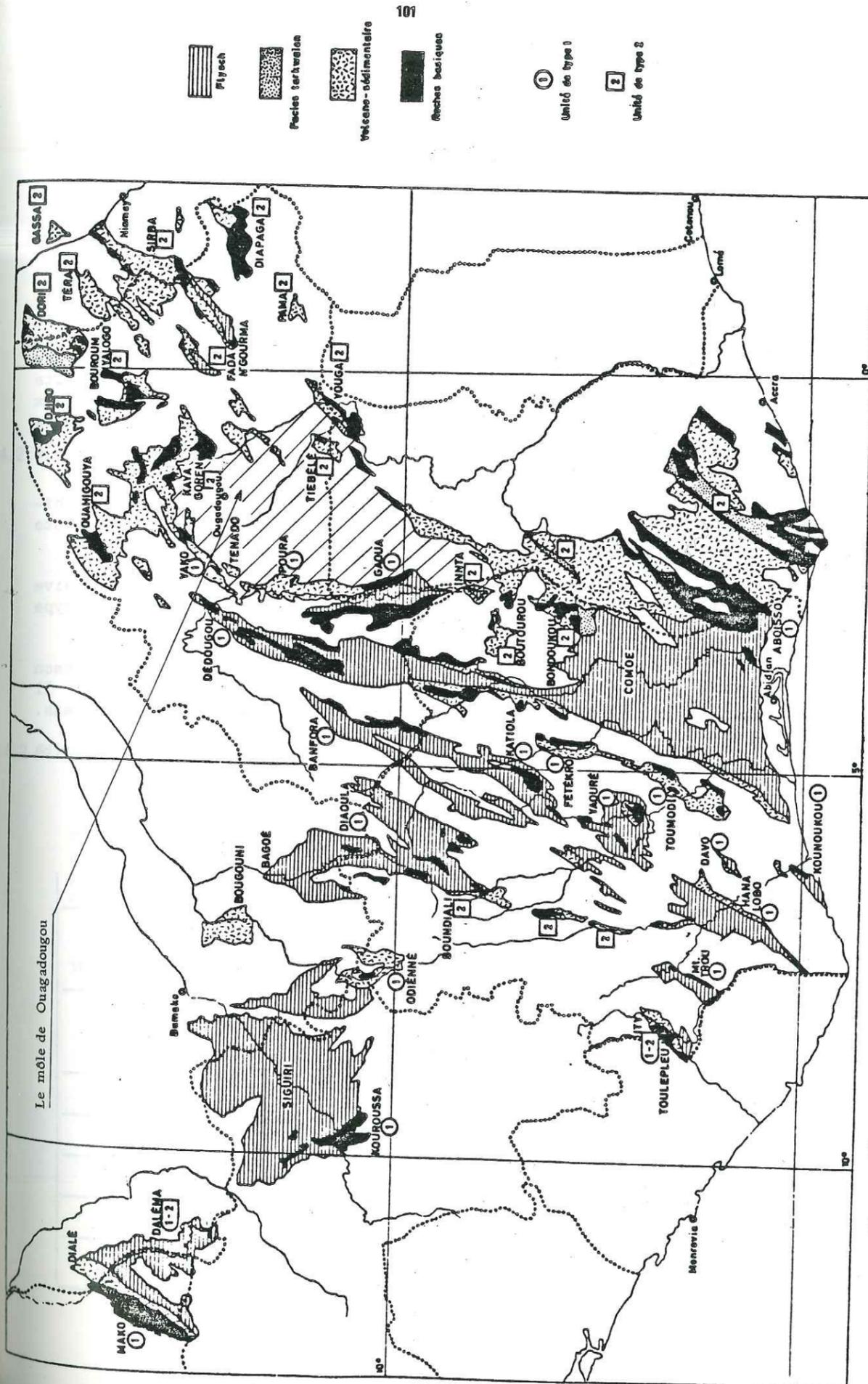


Figure 24 - Répartition des unités birimiennes. Echelle 1/500000. (A. Papon, inédit)

2.2.4.2.2. LES ÂGES OBTENUS ET LEUR INTERPRÉTATION

De la quinzaine d'échantillons proposés pour les datations, quatre à partir desquels l'obtention de minéraux purs par tri était aisée, furent retenus. Le nombre réduit des échantillons traités tient donc à une exigence sur la qualité du matériel destiné à l'analyse. Tous les dosages, tant ceux de l'argon que du potassium, ont été répétés au moins deux fois.

RAPPEL DU CADRE GEOLOGIQUE DES ECHANTILLONS ANALYSES

Le bassin versant de la Sissili est occupé par des migmatites granitiques ou gneissiques que recoupent des roches basiques (amphibolites essentiellement) dont la mise en place précède celle de granites roses. Nous avons également décrit des granites gris équants (granite de Mouna, granite de Bihia). Leurs caractéristiques indiquent qu'ils sont postérieurs aux granites roses. La mise en place des dolérites est également postérieure à celle des granites roses, mais leur âge, par rapport à celui des granites gris ne peut pas se déduire des observations de terrain.

- L'échantillon L 48 appartient à une zone de transition entre l'amphibolite de Bou et la venue granitique qui l'envahit. Il présente un faciès de granodiorite orientée.

- Le P 10 est un échantillon de l'amphibolite de Bihia intrusive dans les migmatites, mais recoupée par les granites roses de type Pikalia.

- Le P 132 de Walème correspond à un faciès particulier de surcuisson entre le filon pegmatitique et son encaissant amphibolitique. Il est marqué par une abondance de muscovite associée à des grenats.

- Le P 107b représente la dolérite de Sapouy, faciès typique à augite et labrador.

2.2.4.2.3. INTERPRÉTATION DES RESULTATS OBTENUS

Tableau 22

Numéro échantillon	L 48	P 10	P 132	P 107b
Localité	Bou	Bihia	Walème	Sapouy
X	2° 20' W	1°47'54" W	1°18' W	1°46' W
Y	11° 14' N	11°3'45" N	11°12'23 N	11°30'55" N
Roche	Faciès intermédiaire granodioritique	Amphibolite	Filon de pegmatite	Dolérite
Minéral	Amphibole	Amphibole	Muscovite	Feldspath
% K ₂ O	1,21	0,138	10,28	8,18
% Ar rad.	99,058	89,498	99,6	95,8
40 Ar nl/g	143,078	16,498	1166,4	182,1
Age (en Ma)	3336 +45	3370 + 68	3213 + 64	677 +14

Les âges obtenus se répartissent en deux groupes bien distincts: l'un avec des chiffres supérieurs à 3 200 Ma, et l'autre avec un seul âge à 677 Ma.

Les âges du premier groupe peuvent être tenus pour significatifs sous réserve de la mise en évidence éventuelle d'un excès d'argon, peu probable eu égard à la concordance des résultats.

Ces âges sont les plus vieux rencontrés jusqu'ici en Haute-Volta et comptent parmi les plus élevés du bouclier ouest africain. Ils viennent appuyer l'hypothèse qui nous a conduit à les obtenir et permettent de situer l'essentiel des formations géologiques du bassin versant de la Sissili dans le libérien.

La datation des granites gris reste à faire. Quant à la dolérite de Sapouy, sa mise en place correspond au cycle panafricain.

2.2.4.2.4. COMPARAISON AVEC D'AUTRES ETUDES ANTERIEURES

Au niveau de la Haute-Volta, il n'existe pas encore de repères libériens. Le seul qui ait déjà été cité est celui de Clay (1970), dont l'âge de 2660 Ma obtenu sur amphibole a permis de formuler l'hypothèse sur l'existence d'un libérien reconnaissable en Haute-Volta et dans le môle de Ouagadougou.

Comme le montrent les données des tableaux, les âges de 2 600 à 2 700 Ma, ont été fréquemment rencontrés dans la dorsale Reguibat, dans la région de Man et au Libéria. Par contre, les âges supérieurs à 3 000 Ma sont très rares (un seul résultat dans la dorsale Reguibat et une dizaine dans les formations du Libéria). Les âges trouvés ici constituent donc les premiers âges libériens dans le domaine Baoulé-Mossi.

2.2.4.2.5. CONCLUSION

Les résultats radiochronologiques obtenus sont intéressants à plus d'un titre. Ils permettent de situer les migmatites, mais aussi certains granites du môle de Ouagadougou, dans le libérien. Il serait intéressant de dater les granites gris équants qui sont de type dixcove. Ceci permettrait de les situer par rapport aux dolérites dont on sait maintenant qu'elles peuvent appartenir au cycle panafricain.

L'histoire géologique du bassin versant de la Sissili peut donc être résumée de la manière suivante:

- Avant 3 370 Ma, métamorphisme général de degré catazonal avec formation de migmatites;
- Vers 3 370 Ma, remobilisation des laves en amphibolites;
- Entre 3 340 et 3 200 Ma, mise en place syntectonique des granites roses qui viennent recouper les amphibolites;
- ? intrusions des batholites de granites gris équants;
- Vers 670 Ma, mise en place des dolérites pendant l'orogénèse panafricaine.

Tableau 23

a) — Résultats des radiodations dans la partie occidentale et centrale de la dorsale Réguibat.

N°	Echantillon	Roche et position stratigraphique	Localisation	Méthode	Âges conventionnels	Âges isochrone	Référence
1	8 roches totales	Gneiss catazonaux	Amsaga 21°06'N-13°10'W	Rb/Sr		2914±130	E
2	10 roches totales	Gneiss catazonaux	Tiris 22°52'63"N-12°19'54"W	Rb/Sr		2685±81	E
3	3 roches totales	Gneiss à amphibole Gneiss ocellé à biotite	Série du Ghallaman 23°29'N-8°33'W 23°27'N-8°35'W	Rb/Sr		3177±157	F*
4	7 roches totales	Granitisation du Ghallaman non précisée	Ghallaman	Rb/Sr		2442±81	F
5	5 roches totales	Mylonites	Ghallaman 24°07'N-10°36'E	Rb/Sr		2135±66	F
6	5 roches totales	Nigmatites	50 km. S. des Sfarat	Rb/Sr		2293±16	F
7	Roche totale	Pegmatite à muscovite	Khnéffissat (Tasiast) 20°46'54"N-15°34'06"W	Rb/Sr	2810±235		A et B
8	Roche totale	Pegmatite à 2 micas	Khnéffissat 20°46'54"N-15°34'16"W	Rb/Sr	2704±76		A et B
9	Roche totale	Pegmatite à muscovite	Khnéffissat 20°52'N-15°29'24"W	Rb/Sr	2565±72		A et B
10	Roche totale	Migmatite à 2 micas	Khatt Atoui 20°46'15"N-10°35'10"W	Rb/Sr	2591/156		A
11	Roche totale	Granite migmatitique	Tindiat 20°45'N-13°15'W	Rb/Sr	2313±89		D
12	Roche totale	Granite	Touyema 20°40'N-13°21'W	Rb/Sr	2445±118		D
13	Roche totale	Pegmatite	Satle Ogmane 21°00'N-15°17'W	Rb/Sr	2400±80		C
14	Muscovite	Pegmatite à 2 micas	Khnéffissat 20°56'54"N-15°34'16"W	Rb/Sr	2553±26		A et B
15	Muscovite	Migmatite à 2 micas	Khatt Atoui 20°46'15"N-10°35'10"W	Rb/Sr	2629±54		A et B
16	Muscovite	Pegmatite à muscovite	Khnéffissat 20°52'N-15°23'24"W	Rb/Sr	2637±44		A et B
17	Muscovite	Pegmatite à muscovite	Khnéffissat 20°46'54"N-15°34'06"W	Rb/Sr	2571±74		A et B
18	Lépidolite	Pegmatite	Satle Ogmane 21°00'N-15°17'W	Rb/Sr	2580±90		C
19	Microcline		Khnéffissat 20°46'51"N-15°34'07"W	Rb/Sr	2539±66		A et B
20	Ferrophengite		Khnéffissat 20°46'47"N-15°34'15"W	Rb/Sr	2220±43		A et B

(1) La constante utilisée pour le calcul de l'âge Rb/Sr est : $\lambda = 1,47 \times 10^{-11}$ par an.
 (A) VACHETTE M. [1964]. Ann. Fac. Sci. Univ. Clermont-Ferrand, 25, fasc. 8.
 (B) GIRAUDON R., VACHETTE M. [1964]. C. R. Acad. Sci., 258, pp. 2520-2523.
 (C) BONHOMME M. [1962]. Ann. Fac. Sci. Univ. Clermont-Ferrand, n° 5, fasc. 5.
 (D) BARRÈRE J. [1967]. Mém. B.R.G.M. Fr., n° 42.
 (E) VACHETTE M. et al. [1973]. In-8° coll. Intern. Géol. Africaine, Florence.
 (F) VACHETTE M. et al. (à paraître).

b) — Résultats des radiodations au Libéria.

N°	N° ech.	Echantillon	Roche et position stratigraphique	Localisation	Méthode (1)	Âges conventionnels	Âges isochrone	Référence
1	L81	Roche totale	granite à biotite —id— granite porphyrique	Northern Lofa County 6°21'N-10°03'N	Rb/Sr	2690 2720 2900		
2	L82	Roche totale	granite hétérogène orienté granite aplitique	Northern Lofa County 6°22'30"N-10°11'30"W	Rb/Sr	2680 2660		
3	L80	Roche totale	granite hétérogène granite à biotite à gros grain granite à biotite à grain fin granite gneissique	Northern Lofa County 8°08'N-10°14'W	Rb/Sr	2600 2640 2540 2540	2652±43	
4	L83A L83B	Roche totale	granite gneissique fin granite gneiss.moyen granite gneiss.zoné	Northern Lofa County 8°26'N-9°46'W 8°13'N-9°45'W	Rb/Sr	2675 2700 2730		
5	L128E	Roche totale	Gneiss granitique —id—	Grand Cape Mount County 7°10'N-11°15'W		4800		*
6	L86A	Roche totale	Monzonite-granodiorite gneissifiée gneissique et migmatitique	Grand Cape Mount County (Mano R. Mine) 7°18'N-11°08'N		3450 2720		*
7	L92A	Roche totale	gneiss quartzo-feldspathique localement porphyroblastique	Montserrado County 6°29'N-10°52'W		2760 2020 2780 3120 2350 2320	2652	*
8	L84	Roche totale	—Monzonite quartzique à biotite et muscovite —Gneiss à biotite quartzo-feldspathique	Bong County — Bong Mine area 6°49'N-10°14'W		1650 2960 3370 3780		*
9	L85	Roche totale	Granulite	Grand Cape Mount County 6°43'N-11°05'W		3470 2600		*
10	L94B	Roche totale	Granite gneissique	Nimba Range 7°31'N-8°35'W		2590 2630 2730		2750
11	L94C	Roche totale	Granite gneissique à homblende —id à grain plus fin	Nimba Range 7°24'N-8°39'W		2940 3350 2990		*
12	L94A	Roche totale	Pélite métamorphique Roche métam. schistifiée	Nimba Range 7°32'N-8°32'W		2040 2370	2200(2)	
13	WH419D	Roche totale	Gneiss à biotite quartzo-feldspathique	Grand Gedeh County 6°13'N-8°27'W		2370	2050(3)	
14	L128E	Amphibole	Gneiss granitique (cf.n°5)	Grand Cape Mount County 7°10'N-11°15'W		2260±110		

(1) Constante employée $\lambda = 1,39 \times 10^{-11}$ par an.
 (2) Cette isochrone a été construite avec, en outre, deux échantillons appartenant aux schistes de Marampa qui font partie du domaine des Rokelides (orogénèse panafricaine).
 (3) L'échantillon (n° 13 = WH 419 D) a été porté sur une isochrone construite avec des roches appartenant à la province éburnéenne.

c) — Série libérienne de Guinée et des confins guinéo-ivoirien.

N°	Echantillon	Roche et position stratigraphique	Localisation	Méthode (1)	Âges conventionnels	Âges isochrone	Référence
1	Roche totale	Migmatite de type Bafing (cf.n°8)	Carrière Pohan 6°33'N-7°56'W	Rb/Sr		2701±135	(A) et (B)
2	Roche totale	Gneiss à hypersthène et grenat (cf.n°12)	Pébé 6°32'N-8°15'W	Rb/Sr		2701±135	(A) et (B)
3	Roche totale	Migmatite leptynique rose (cf.n°11 et 12)	Région de Bafing 6°34'N-8°18'W	Rb/Sr		2750±107	(A) et (B)
4	Roche totale (3 éch.)	Granodiorite gneissifiée (cf.n°8, 14, 15)	Guiampleu 2°éch. : 6°49'N-8°18'W 1°éch. : 6°42'N-8°13'W	Rb/Sr		2701±135	(A) et (B)
5	Roche totale	Granodiorite (cf.n°9) et 15)	Kambli 6°36'30"N-8°24'30"W	Rb/Sr		2750±107	(A) et (B)
6	Roche totale	Galet de granodiorite (cf.n°16)	Formation de Toulepleu 6°36'30"N-8°24'30"W	Rb/Sr		2750±107	(A) et (B)
7	Plagioclase	Migmatite	Carrière Pohan 6°33'N-7°56'W	Rb/Sr		2701±135	(A) et (B)
8	Plagioclase (3 éch.)	Granodiorite gneissifiée (cf. 4 et 15)	Guiampleu 2 éch. : 6°49'N-8°18'W 1°éch. : 6°42'N-8°13'W	Rb/Sr		2701±135	(A) et (B)
9	Plagioclase	Granodiorite (cf. 5 et 15)	Kambli 6°36'30"N-8°24'30"W	Rb/Sr		2750±107	(A) et (B)
10	Plagioclase	Gneiss à hypersthène et grenat (cf.n°2)	Pébé 6°32'N-8°15'W	Rb/Sr		2701±135	(A) et (B)
11	Plagioclase	Migmatite leptynique rose (cf.n°4 et 12)	Région de Bafing 6°34'N-8°18'W	Rb/Sr	2091		(B)
12	Microcline	Leptynite (migmatite leptynite) cf.n°3 et 11)	Pébé-Bafing 6°34'N-8°18'W	Rb/Sr	2091		(B)
13	Microcline	Granodiorite (cf. n°5 et 19)	Kambli 6°36'30"N-8°24'30"W	Rb/Sr		2750±107	(A)
14	Microcline (3 éch.)	Granodiorite gneissifiée (cf. n°4 et 8)	Guiampleu 2°éch. : 6°49'N-8°18'W 1°éch. : 6°42'N-8°13'W	Rb/Sr		1632	(B)
15	Biotite (2 éch.)	Granodiorite gneissifiée	Guiampleu 6°49'N-8°18'W	Rb/Sr	1835 1540		(A)
16	Biotite	Galet de granodiorite (cf.n°6)	Unité de Toulepleu 6°36'30"N-8°24'30"W	Rb/Sr		1632	(B)
17	Biotite	Granite	Duékoué 6°45'N-7°22'W	Rb/Sr		1974±39	(C)

(1) La constante utilisée pour le calcul de l'âge est $\lambda = 1,47 \times 10^{-11}$ par an.
 (A) PARON A. et al. [1968]. — C. R. Acad. Sci., Fr., 266, n° 20, pp. 2046-2048.
 (B) PARON A. [1973]. — Mém. n° 80, B.R.G.M. édit., Paris.
 (C) BONHOMME M. [1962]. — Ann. Fac. Sci. Univ. Clermont-Ferrand, n° 5, fasc. 5.

c) — Géochronologie du Libérien de la région de Man.

N°	Echantillon	Roche et position stratigraphique	Localisation	Méthode(1)	Age convent.	Age isochrone	
1	5 plagioclases 2 Felds potas. 6 Roches totales	Série charnockitique	Région de Man	Rb/Sr		2750±107	(A)
2	8 Plagioclases 8 Roches totales	Série charnockitique	Région de Man	Rb/Sr		2701±135	(A)
3	1 Biotite 1 Felds potas. 1 Roche totale	Charnockite	Douélé 7°11'N-7°32'W	Rb/Sr		1870	(A)
4	Biotite	Charnockite	Man 7°26'N-7°33'W	Rb/Sr	2028±20		(B)
5	Biotite	Migmatite magnésienne	Douélé 7°13'N-7°35'W	Rb/Sr	1887±28		(B)

(1) La constante utilisée pour le calcul de l'âge est $\lambda = 1,47 \times 10^{-11}$ par an.
 (A) PARON A., ROQUES M., VACHETTE [1968]. C. R. Acad. Sci., Fr., 266, n° 20, pp. 2046-2048.
 (B) BONHOMME M. [1962]. Ann. Fac. Sci. Univ. Clermont-Ferrand, n° 5, fasc. 5.

N°	Echantillon	Roche et position stratigraphique	Localisation	Méthode	Age conventionnel	Age isochrone
1	Roche totale	granite	Tienio 8°48'N - 7°44'W	Rb/Sr(1)	1947±64	(B) cf.n°7
2	Biotite	granite	Foulla 9°20'N - 7°48'W	Rb/Sr	2022±46	(A)
3	Biotite	Granite migmatitique	Borotou 8°45'N - 7°29'W	Rb/Sr	1989±62	(A)
4	Biotite	Granite migmatitique	Gbéla 9°35'N - 8°07'W	Rb/Sr	1921±20	(A)
5	Biotite	Granite migmatitique	Badala 8°57'N - 7°38'W	Rb/Sr	1897±20 1884±28	(A) (B)
6	Biotite	Granite en filon dans granite migmatitique n°5	Badala 8°57'N - 7°38'W	Rb/Sr	1894±41	(B)
7	Biotite	Granite	Tienio 8°48'N - 7°44'W	Rb/Sr	1707±44	(A) cf.n°1
8	Biotite	Granite migmatitique	Ngorondougou 8°25'N - 7°38'W	Rb/Sr	1929±45	(A)

(1) La constante utilisée pour le calcul de l'âge est : $\lambda = 1,47 \times 10^{-11}$ par an.
 (A) BONHOMME M., [1962] - Ann. Fac. Sci. Univ. Clermont-Ferrand, n° 5, fasc. 5.
 (B) VACHETTE M., [1964] - Ann. Fac. Sci. Univ. Clermont-Ferrand, n° 25, fasc. 8.

N°	Echantillon	Roche et position stratigraphique	Localisation	Méthode	Age conventionnel	Age isochrone
21	Biotite	Granite	Gagnoa 6°07'N-5°55'W	Rb/Sr	1611 ± 21	(B)
22	Biotite	Granite	Daloa 6°51'N-6°27'W	Rb/Sr	1884 ± 33	(B)
23	Biotite	Microgranite	Nodioni 8°42'N-6°15'W	Rb/Sr	1855 ± 24	(B), cf. n° 23
24	Biotite	Microgranite	Nodioni 8°42'N-6°15'W	Rb/Sr	1683 ± 30	(B), cf. n° 22
25	Biotite	Granite	Toumono 8°22'N-6°05'W	Rb/Sr	1926 ± 26	(B)
26	Amphibole	Amphibolite	Région de Kpéré (Hte Volta) 9°29'N-2°48'W	K/Ar	2660 ± 135	(C)
27	Biotite	Pegmatite	1 km Est de Kalba (Ghana)	K/Ar	1800	(D)

Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre l'histoire des mûles séparant les grands sillons éburnéens. Mais il importe, pour arriver à une synthèse complète de l'évolution des mûles et des sillons, de poursuivre encore les recherches sur les roches recoupant ces deux ensembles. Il n'en reste pas moins que le raisonnement géologique lié aux observations de terrain est prépondérant dans la compréhension des phénomènes.

2.2.5. ETUDE TECTONIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA SISSILI

Les roches cristallines qui occupent tout le bassin versant de la Sissili, comme toutes les autres formations du socle cristallin voltaïque, présentent la caractéristique hydrogéologique commune d'être des roches à porosité interstitielle faible ou nulle. Elles sont donc de ce fait stériles et n'offrent de possibilités aquifères que lorsqu'elles sont altérées ou fissurées. Le phénomène de leur altération est étroitement lié à celui de la fracturation. La généralisation de l'extension de la couverture d'altérites sur toutes les formations indique donc l'importance de la fissuration, mais rend aussi irréalisable toute étude directe du système régional de fractures.

La présence de fractures est décelable sur les photographies aériennes à l'aide desquelles on peut tracer des réseaux complexes de linéaments. Ces derniers correspondent à des alignements végétatifs, morphostructuraux ou hydrographiques. Déjà l'interprétation de certaines études magnétiques avait permis de mettre en évidence d'importantes fractures liées à la tectonique cassante qui affecte le socle (DOMZALCY pour la Côte d'Ivoire en 1969). Il a fallu cependant attendre 1974 pour voir avec ENGALENC, la réalisation des cartes à très dense réseau de fractures exécutées pour la première fois dans l'étude régionale du Ranch d'embouche de Léo. Les études géophysiques que nous menâmes confirmèrent l'existence de fractures correspondant à la plupart des linéaments repérés (exemple, zone du ranch de Léo). Nous réalisâmes parallèlement aux études du ranch la carte tectonique du bassin versant de la Haute Sissili en 1975. Nous nous sommes proposé d'approfondir les études déjà réalisées tout en les étendant à l'ensemble du bassin de la Sissili en territoire voltaïque. Nous traiterons le problème de la fracturation en nous appuyant cette fois sur des données diversifiées qui seront celles:

BASSIN VERSANT DE LA BISSILI

CARTE DE FRACTURATION

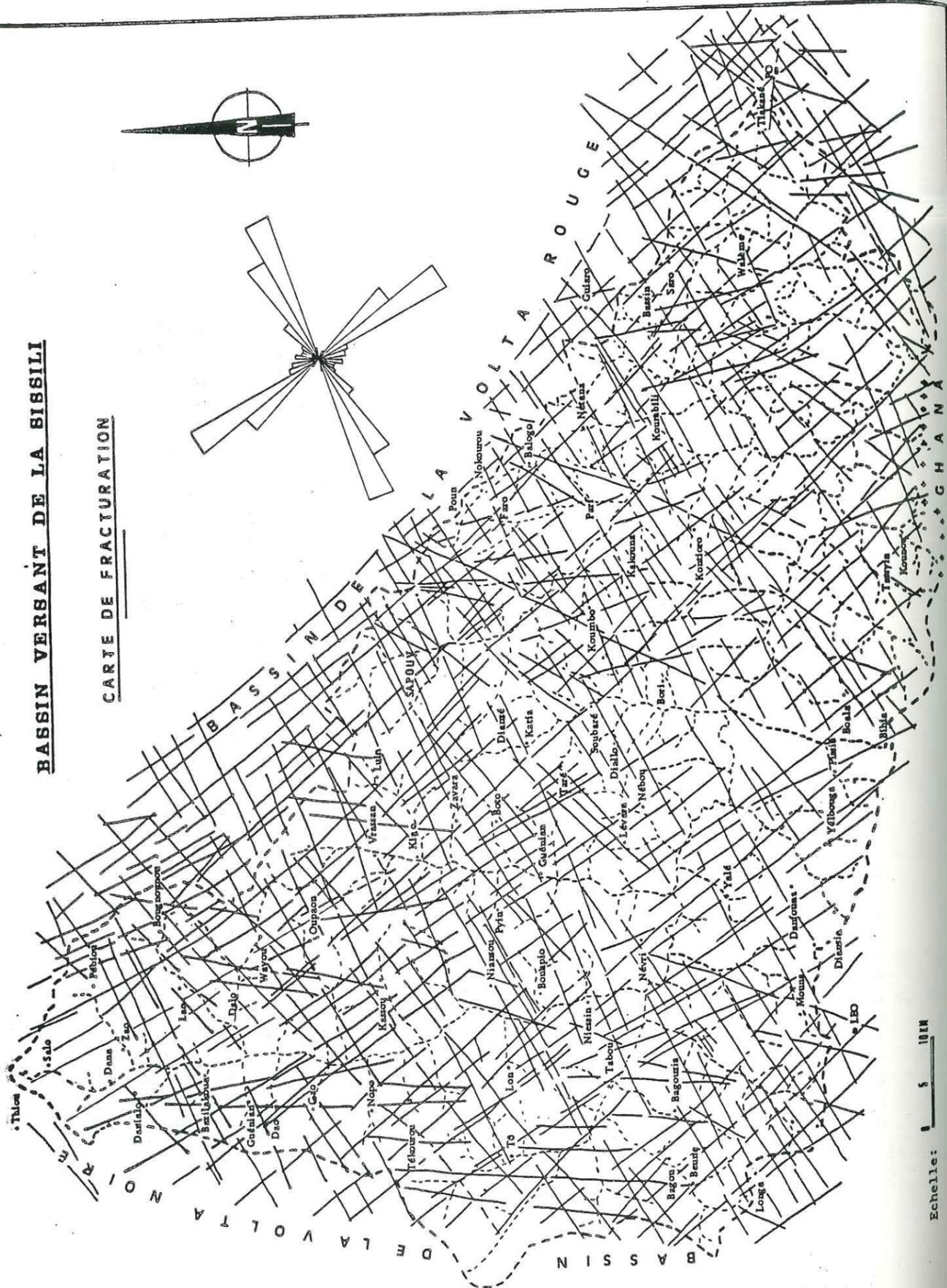
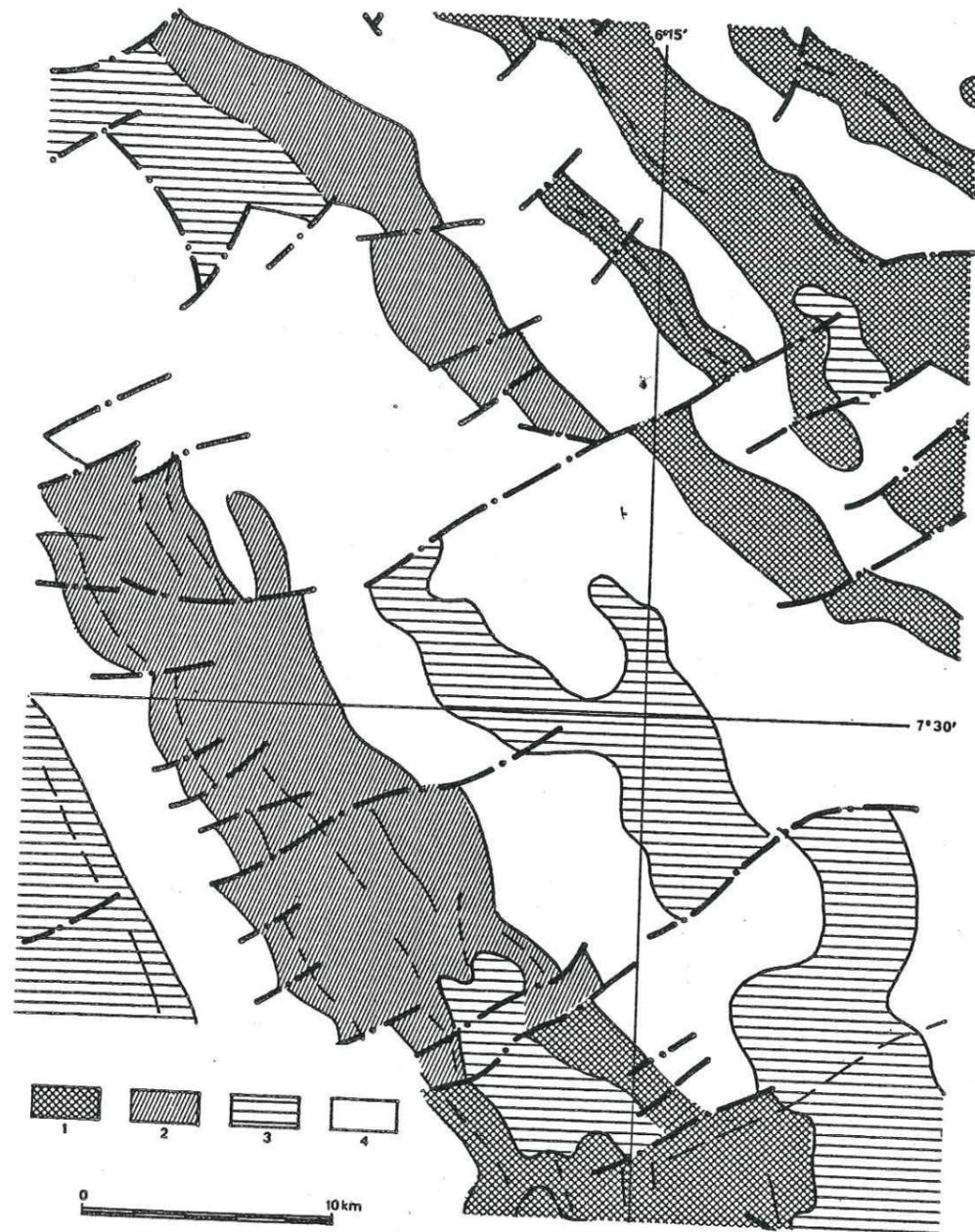


Figure 25

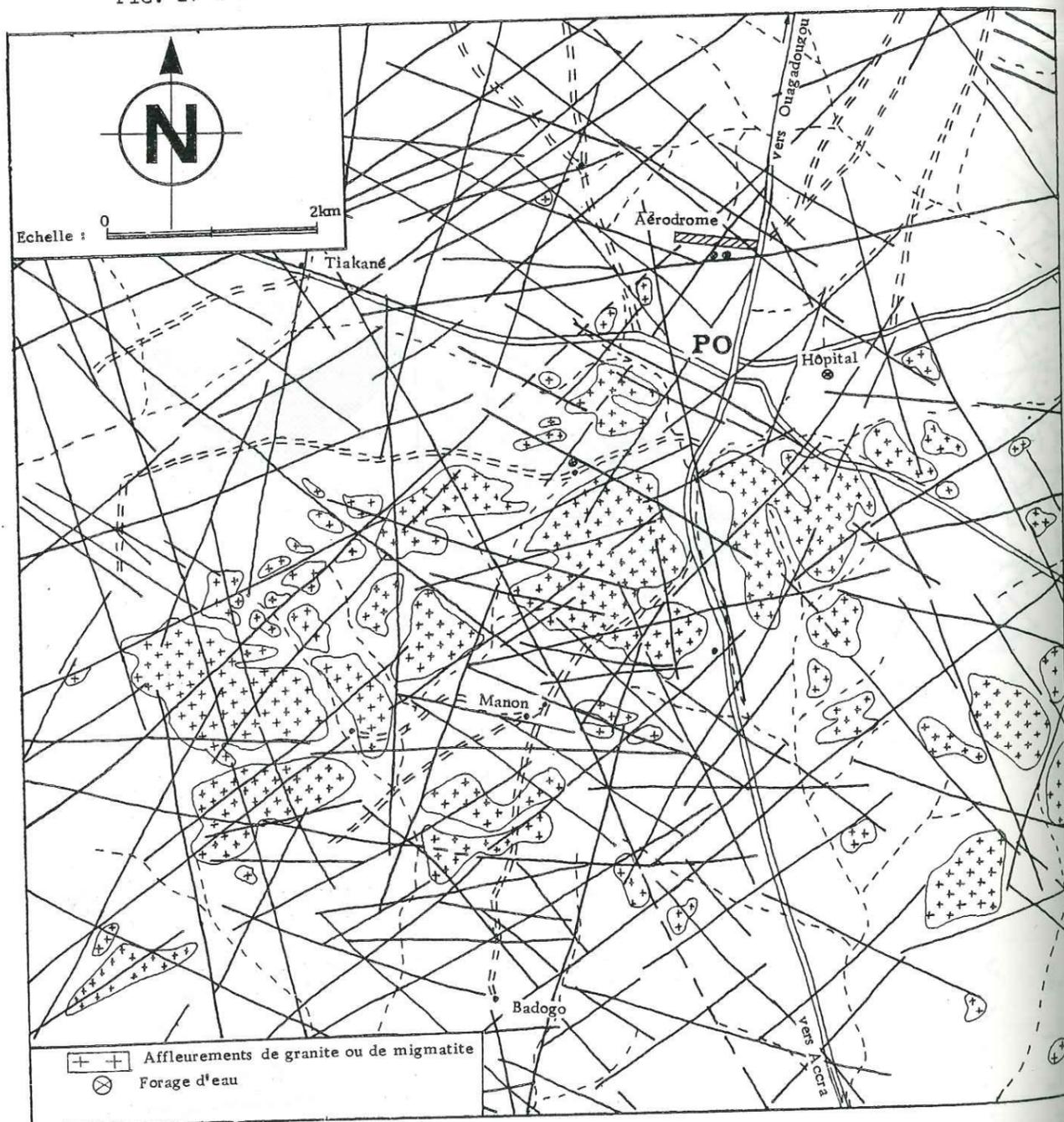
Echelle: 1 5 10 km



EXTRAIT DE LA CARTE D'INTERPRETATION DE L'ETUDE MAGNETIQUE AEROPORTEE DE LA REGION DE GUIGLO (d'après DOMZALSKI, 1969), MONTRANT LE STYLE TECTONIQUE CASSANT.
 1. Faciès amphibolitique. 2. Faciès amphibolitique gneissique. 3. Faciès granito-gneissique granodioritique. 4. Faciès feldspathique.

Figure 26

FIG. 27 a : CARTE DE FRACTURATION DES ENVIRONS DE PO



- des vues de satellite LANSAT au 1/200 000 du bassin versant de la Sissili. Les images utilisées sont des photographies en noir et blanc et des compositions colorées sur support diazoïque des canaux 4, 5 et 7. Les prises de vue choisies sont celles du 12 décembre 1975 et du 18 janvier 1976;

- des extraits de la carte des linéaments tirée de l'image de satellite au 1/1000 000 de M.C. TRAVAGLIA et relatifs aux degrés carrés de Pô et de Léo;

- des photographies aériennes de 1952 desquelles furent tirées la carte de fissuration du ranch Léo (ENGALENC, 1974), la carte de fissuration du bassin de la Haute-Sissili (SAVADOGO, 1975) et la carte de fissuration des environs de Pô;

- des mesures directes faites sur affleurements chaque fois que les conditions d'affleurement ont permis de les réaliser.

2.2.5.1- METHODES D'ETUDE

Nous choisissons de traiter statistiquement le réseau de linéaments ou de fissures à l'affleurement. Nous en dégagerons des tableaux de répartition fréquentielle des directions puis des diagrammes et des rosaces dont nous comparerons les pics de distribution.

Les données des images de satellites

Les extraits de l'image satellite au 1/1000 000 font ressortir dans les degrés carrés de Pô et de Léo, sur lesquels le bassin versant de la Sissili est à cheval des pics fréquentiels suivant les directions N 60°-70°, N 110-120°, N 140-150° et N 160-180°, avec toutefois un dédoublement au niveau du degré carré de Pô où apparaissent deux pics voisins supplémentaires N 10° - N 20° et N 40° - N 50°.

Les directions peuvent s'associer par couples suborthogonaux N 20°-40° et N 110-120°, N 60-70 et N 160-180° et pour le degré carré de Pô celui N 40-50° et N 120-130°.

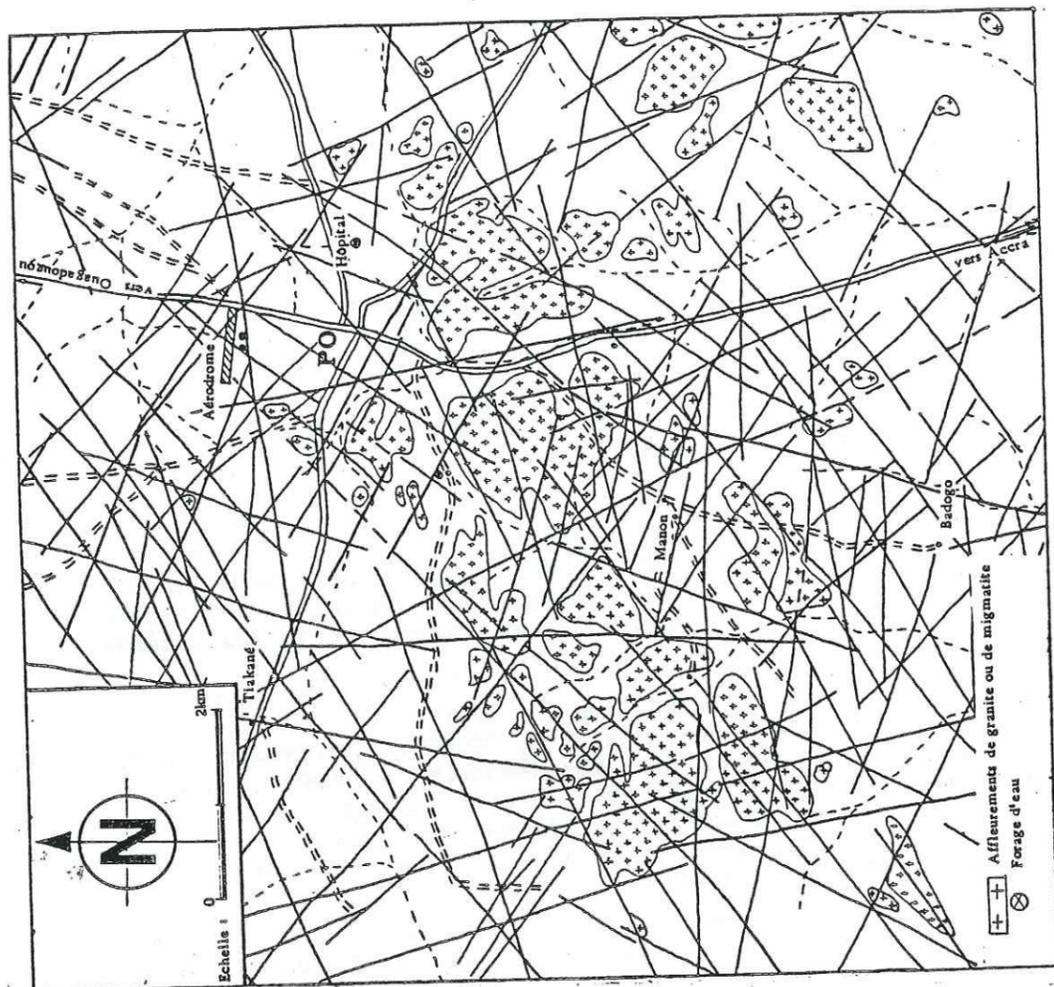
Des directions comprises entre N 80 et 110° sont inexistantes sur les images satellites au 1/200 000 où les pics les plus importants deviennent N 50-70° et N 130°-N 150° auxquels s'ajoutent un petit pic N 0 - N 10°.

L'absence de directions linéamentaires entre N 80 et N 110 peut être liée à la direction de balayage du satellite qui est Est-Ouest, car nous les verrons apparaître sur les documents photoaériens des mêmes secteurs.

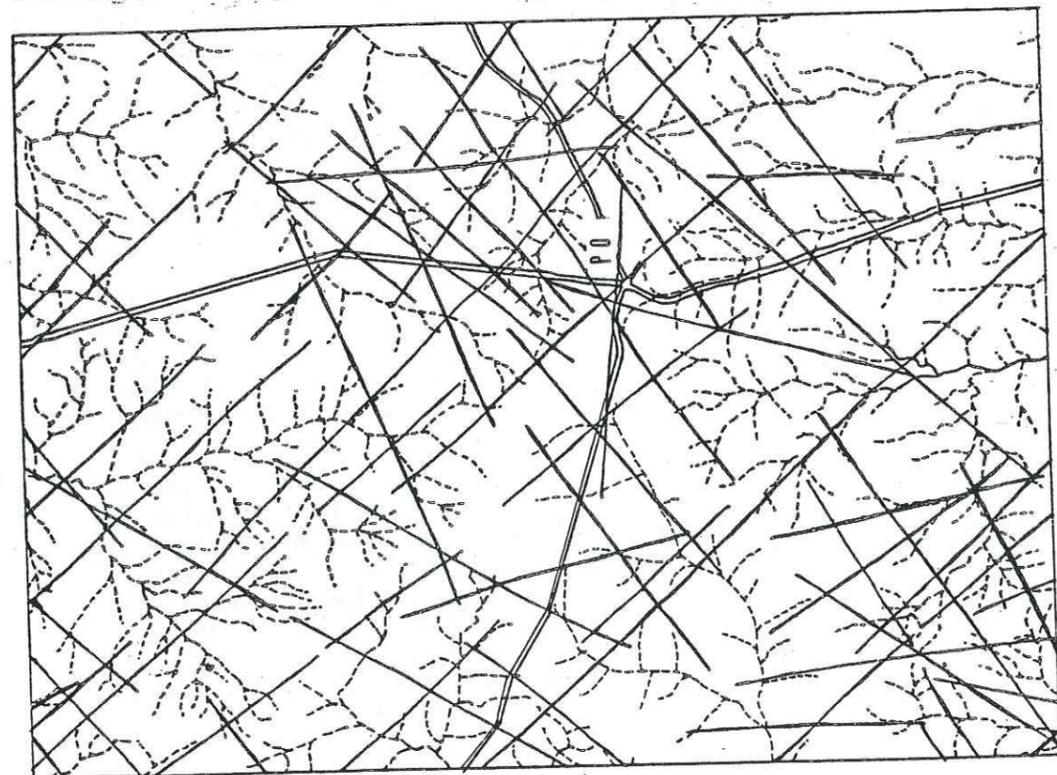
Les photo-aériennes au 1/50 000

A cette échelle la densité du réseau linéamentaire est telle qu'il devient impossible d'en tirer par réduction un document clair au 1/100 000 et a fortiori au 1/200 000 qui est notre échelle de levé. Nous retenons seulement comme élément d'illustration la carte tectonique des environs de Pô et celle du ranch Léo (ENGALENC, 1974) comme élément de comparaison (fig. 27).

Les deux cartes linéamentaires présentent en commun des pics fréquentiels N 50°-N 60°, N 80°-N 100°, N 120°-N 140°. Les pics N 20°-N 30° et N 150°-N 160° sont propres à la carte des environs de Pô. Il convient ici de noter toutefois l'allure spécifique de la distribution des linéaments dans la zone du ranch de Léo: la quasi totalité des linéaments se regroupe entre N 50 et N 140° avec un pic relativement fort entre N 80° et N 100° qu'on ne rencontre nulle part ailleurs. C'est dire donc qu'à grande échelle apparaissent des directions à forte densité locale alors que sur le plan régional elles sont à faible taux fréquentiel.



Linéaments selon photos aériennes au 1/50000



Linéaments selon image de satellite au 1/200000

FIG. 27 b : ENVIRONS DE PO : COMPARAISON ENTRE LINEAMENTS LEVES AU 1/200000 ET AU 1/50000

Donc les directions des plus grandes fractures ne sont pas nécessairement les plus fréquentes. De la figure 27 b qui permet de comparer les levés aux 1/200 000 (satellite) et au 1/50 000 (photo-aérienne) on retiendra que la plupart des fractures au 200 000 se retrouvent sur les photos-aériennes qui ont l'avantage de permettre le repérage d'un nombre plus important de linéaments.

Les mesures sur affleurements

Les affleurements se prêtant à de bonnes mesures de la fracturation et de la microfissuration sont rares. Il n'y a pas un seul front de carrière sur toute l'étendue du bassin versant de la Sissili. Il apparaît nettement que c'est la faible fissuration qui permet au massif de se présenter en dôme émergé. Il n'est donc pas étonnant que les grands dômes soient constitués de roches très peu ou pas fissurées, et que les affleurements ou la fracturation est la plus dense ne forment que des plages réduites en voie d'être ensevelies par leurs altérites. Néanmoins, chaque fois que les mesures n'étaient pas réalisables le long d'une ficelle tendue, nous avons, pour chaque affleurement visité, relevé les directions observables des principales fissures ainsi que celles de la ou des foliations et des filons de pegmatite ou de quartz.

On note sur les diagrammes de répartition fréquentielle des pics suivant les quatre directions ci-après: N 70° - N 80°, N 110 - N 120°, N 50 - N 60° et enfin N 40 - N 50° (fig 28).

Les principales directions de foliation qui apparaissent sont N 0 - N 20°, N 70 - N 80°, N 140 - N 150° et N 30 - N 50°. Quant aux différents filons, ils intrusent préférentiellement suivant les azimuts N 30° - N 50°, N 100 - N 110°, N 140° - N 160° et N 350 - N 10°

Approche analytique des données

L'absence de carrière fait qu'il manque à toutes les séries de mesures de terrain une donnée très importante qui est le pendage. Il n'a pu être mesuré ou apprécié que très rarement. De ce fait, toute tentative de reconstitution exhaustive des différents jeux et rejeux tectoniques devient difficile. D'ailleurs, même en disposant du pendage, une telle opération serait-elle possible quand on sait, comme nous le verrons, que le matériel géologique ou une très grande partie de celui-ci a été sollicité tectoniquement au moins trois fois? De même qu'il sera difficile d'attribuer à chaque phase orogénique la part de granitoïdes qui lui est liée, il s'avérera impossible, surtout vu l'état des affleurements, d'apprécier finement les phénomènes tectoniques dans le bassin versant de la Sissili.

Nous pensons, néanmoins, dégager quelques aspects que nous estimons saillants de cette tectonique et qui sont déductibles des données disponibles.

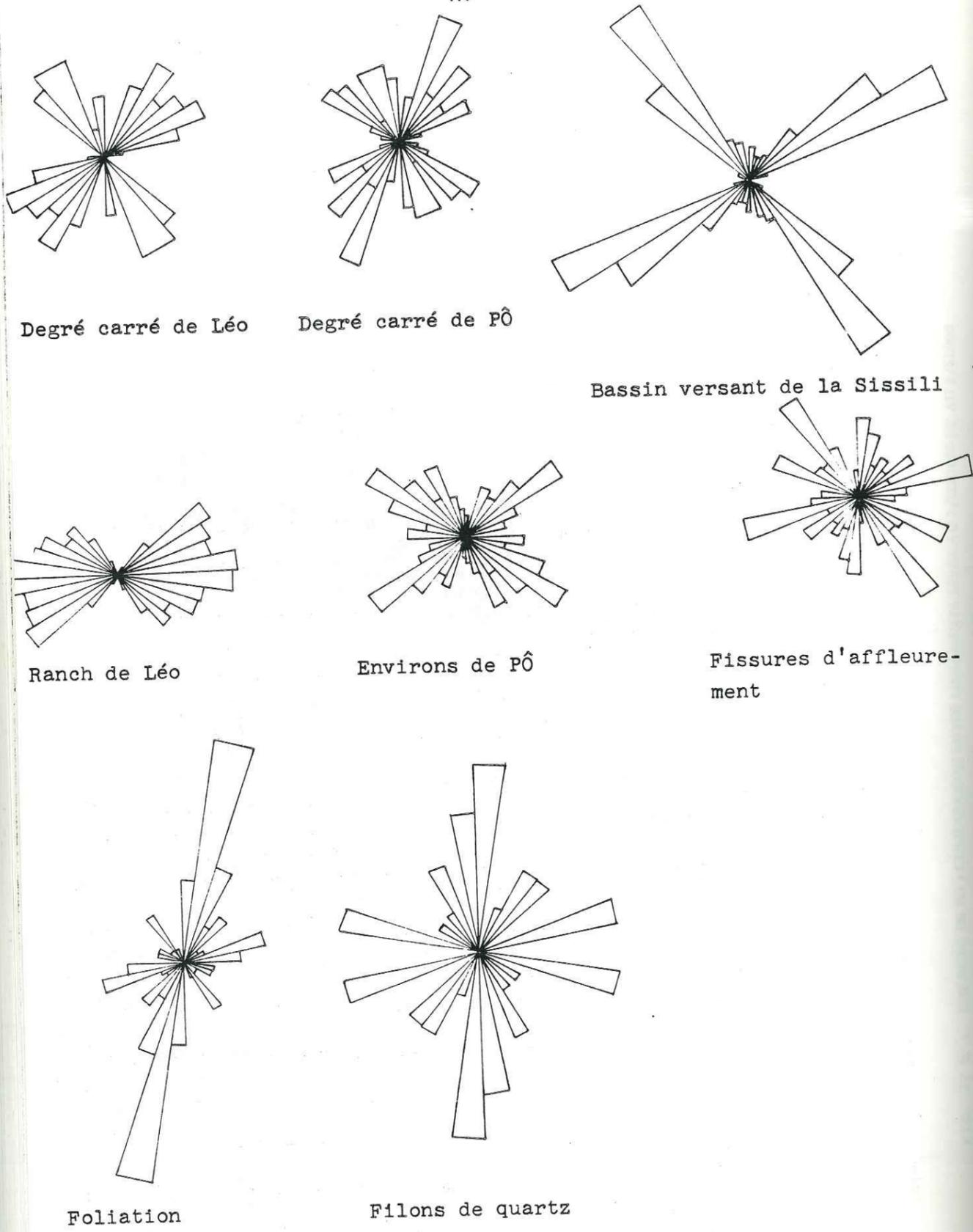
D'abord quelques remarques:

Il n'y a pas coïncidence parfaite entre les directions des linéaments repérées sur les photos aériennes et celles des joints mesurés sur les affleurements.

- Les directions de certains grands linéaments ne se superposent à celles des fissures qu'après une rotation d'environ 10 à 20°.

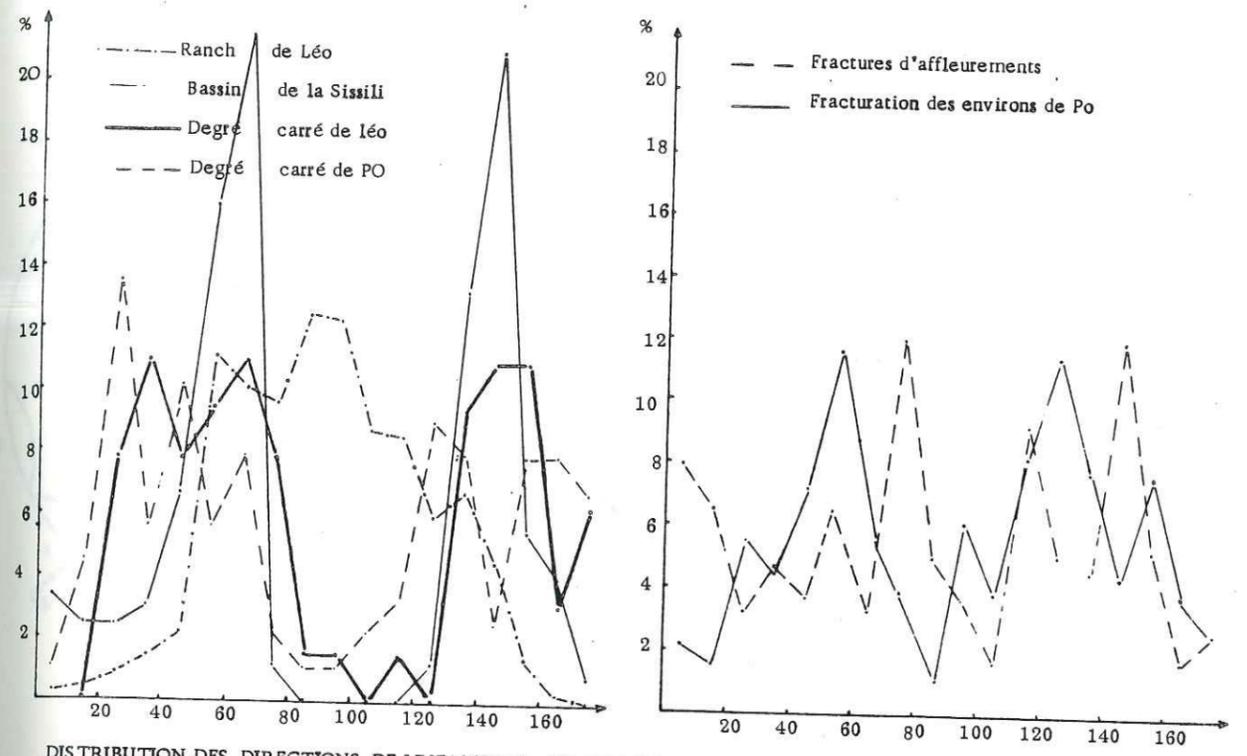
- Certaines directions bien fréquentes sur les affleurements (N 110° - N 120°) disparaissent quasiment autant sur photos aériennes que sur les images obtenus par satellites.

- Les directions de foliation sont multiples (en tout 4 mesurées sur affleurements).



DISTRIBUTION DES DIRECTIONS DE LINEAMENTS, DE FRCTURES A L'AFFLEUREMENT, DE FOLIATION ET DE FILONS DE QUARTZ.

Figure 28



DISTRIBUTION DES DIRECTIONS DE LINEAMENTS, DE FRACTURES A L'AFFLEUREMENT, DE FOLIATION, DE FILONS DE QUARTZ

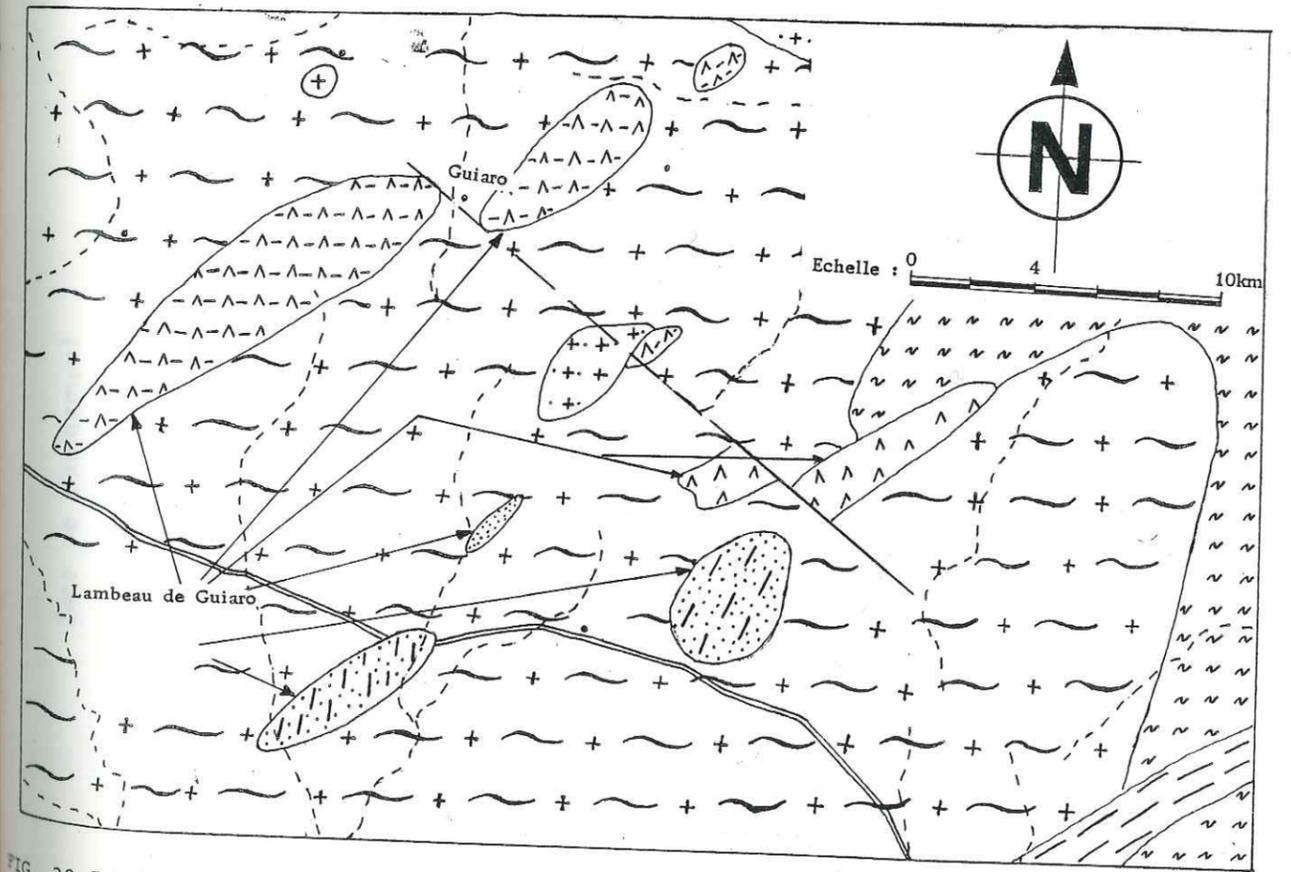


FIG. 30 Extrait de la carte géologique du degré carré de P6 (L. F. Bonard, 1967) montrant le lambeau de Guiaro et le décrochement dextre affectant les dolérites et les amphibolites.

- Dolérites
- Amphibolites
- Migmatites
- Schistes non différenciés
- Granites hétérogènes
- Schistes
- Granites porphyroïdes

. La multiplicité des directions de foliation indique qu'il y a eu plusieurs phases tectoniques à schistosité de flux: trois au moins dont la dernière est celle qui affecte les roches basiques orthométamorphiques et les granites roses orientés.

De nombreuses directions de foliations ont été empruntées par des filons de quartz ou de pegmatite précédés par des venues basiques dans lesquelles les premières se retrouvent encore sous forme d'enclaves ou de panneaux. Ces directions de foliation étant d'abord des directions perpendiculaires aux directions de pression maximale, cela implique qu'il est apparu, après les phases de foliation, des phases de distension dont les fissures ont emprunté les directions de foliation devenues alors celles de rupture préférentielles. Ces fissures permettent le passage des venues basiques, puis des filons de pegmatites et de quartz. La foliation que présentent les pegmatites, mais aussi les roches basiques intrusives montre l'existence d'une phase finale de serrage à laquelle s'associe un métamorphisme de faible intensité (faciès à chlorite et épidote). Ce dernier n'arrive pas à provoquer une remobilisation générale des masses affectées comme en témoigne l'existence de nombreux panneaux de migmatites et de pegmatites retrouvés intacts dans les roches basiques.

En fait, lorsque nous examinons la carte de répartition des directions de foliations, on remarque qu'il y a une nette prédominance spatiale des foliations N 0° - N 20° et N 70° - N 80°. La première occupant la moitié nord et ouest du bassin versant, tandis que la deuxième s'exprime dans le Sud et l'est du bassin.

La foliation N 30° - N 40° s'associe ou se substitue aux deux premières dans des secteurs où on note la présence d'intrusions de granites orientés (Thiou) ou surtout des roches basiques (Bou, Louga, Walème).

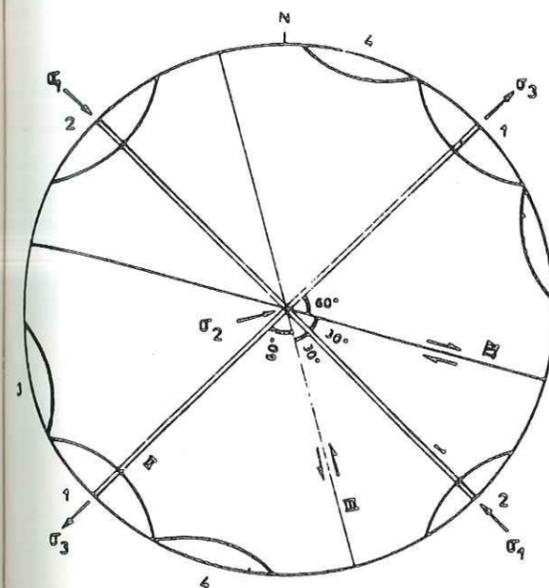
Du point de vue chronologique on peut dire que la foliation N 0° - N 10° est la première à apparaître. Elle est reprise et effacée par celle N 70° - N 80° qui affecte des formations où on la retrouve sous forme de reliques. A ces deux premières phases de foliations sont associées des mobilisations granitiques orientées qu'entraîne un métamorphisme général de degré catazonal.

Suivant les régions du bassin versant, on aura une superposition de deux ou de trois phases tectoniques. Dans le Nord et l'Ouest du bassin, la foliation N 0° - N 20° est restée intacte et n'a été perturbée que par la phase de serrage et de remobilisation légère qui survient après ou pendant la mise en place des formations basiques. A l'Est par contre, on remarque un effacement de la foliation N 0° - N 20° par la foliation N 70° - N 80° qui est elle-même reprise par la phase de serrage des orthométamorphites suivant une direction N 40° - N 60°. BONARD L.F. (1967) fait ressortir sur la carte du degré carré de Pô l'effet d'un décrochement dextre de direction NO-SE (N 130°) qui affecte les formations basiques du Lambeau de Guiaro (fig. 30).

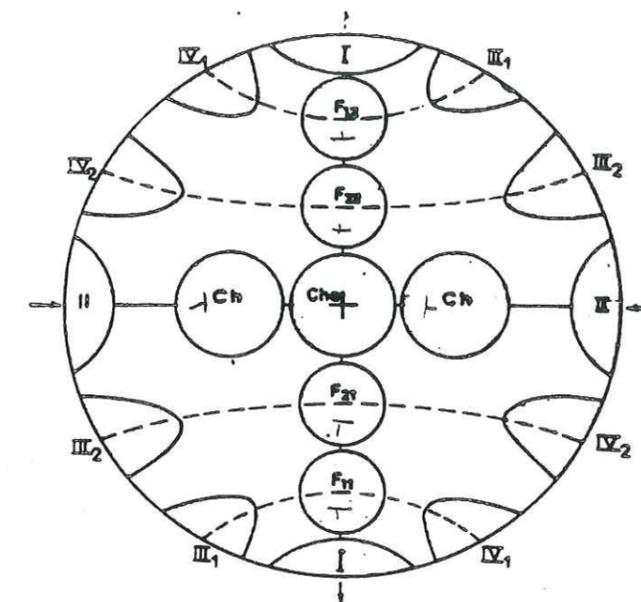
Nous essaierons dans le prochain paragraphe de décrire les conditions générales d'apparition des fractures dans un contexte de tectonique cassante comme le nôtre et d'en tirer des conséquences utiles pour la recherche hydrogéologique au niveau du bassin versant de la Sissili.

Conditions générales d'apparition du champ de fracturation (fig 31).

L'ensemble des données de la géologie régionale (axes des plis, grands décrochements, failles de chevauchement, foliation et schistosité) permet généralement de retrouver les directions des contraintes principales ayant affecté une formation géologique. De nombreux auteurs dont HUBERT M.K. (1961), WILSON G. (1961), ANDERSON E.M. (1963), RAMSEY (1967) et SOULA (1973) ont montré que lors des tectoniques tangentielles apparaissent quatre ensembles de fissures. En effet, lorsqu'un système triaxial de contraintes principales σ_1 , σ_2 , et σ_3 s'exerce sur un matériel



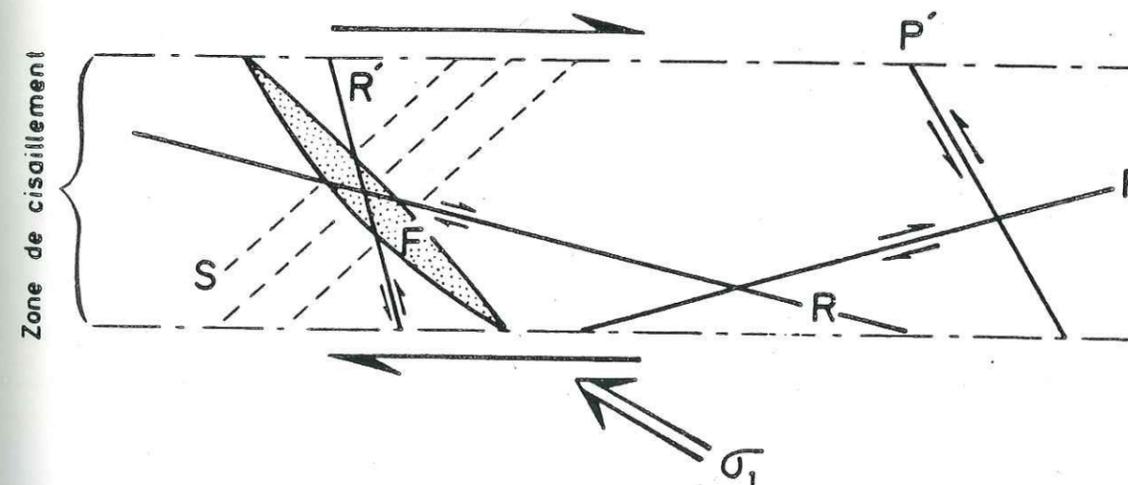
A_FISSURES POUR UN SYSTEME TRIAXIAL DE CONTRAINTES



B_DISPOSITION THEORIQUE DES FAILLES ET FISSURES

STRUCTURES PLANAIRES D'UNE ZONE DE CISAILLEMENT

($\varphi = 30^\circ$)



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

Figure 31

cassant, il apparaît les fissures suivantes:

- Des fentes de tension ou diaclases I: Ce sont des plans de discontinuité créés par extension, sans mouvement relatif des compartiments séparés, parallèles à la direction de la contrainte principale maximum σ_1 , et perpendiculaires à celle de la contrainte principale minimum σ_3 (ce sont les plans I associés au groupe de pôles 1 sur la projection stéréographique théorique).

Ces diaclases peuvent rester ouvertes ou se remplir de filons de quartz ou de calcite suivant la nature du matériel encaissant. Elles favorisent dans tous les cas les circulations d'eau.

- Les fissures de cisaillement III et IV: Les compartiments séparés par ces fractures, obliques aux contraintes principales, subissent des déplacements relatifs coulissant, striant, lissant et/ou ondulant leurs parois. Les coulissements peuvent être dextres (IV) ou sénestres (III).

Les fractures III et IV sont dites conjuguées: l'angle aigu du dièdre formé par ces deux plans conjugués qui admet σ_1 comme bissectrice vaut théoriquement 90° . Mais les forces de frottement internes introduisent ce que l'on appelle l'angle de friction interne qui est de l'ordre de 30° . Ce qui ramène à 60° l'angle du dièdre.

Par rapport aux plans conjugués, les contraintes principales sont disposées de la manière suivante:

- la contrainte maximum σ_1 est bissectrice du dièdre aigu et perpendiculaire à l'intersection des plans;

- la contrainte minimum σ_3 , est bissectrice du dièdre obtus et perpendiculaire à l'intersection des plans;

- la contrainte moyenne σ_2 , est parallèle à l'intersection des plans.

Ces joints qui sont obliques à la direction de la contrainte principale maximum sont théoriquement fermés.

Les cisaillements peuvent ne pas paraître sous la forme des plans III et IV, mais se matérialiser par une zone de cisaillement ou shear zone. Deux types de plans se disposent le long de ces zones:

- les fentes de tension en échelon (tension gashes ou fieders-polten): ce sont des fractures ouvertes, souvent minéralisées, disposées en échelon le long de la zone, et faisant avec cette dernière un angle de 45° (qu'il faut ramener à 30° en tenant compte de l'angle de friction interne de 15°).

- les cisaillements de Riedel: décrits par TCHALENKO J.S. et AMBRASEYS N.N. en 1970 dans une zone de cisaillement produite par un séisme où on distingue deux jeux:

- . un jeu R faisant un angle de 15° environ avec la zone,
- . un jeu R' faisant un angle de 70 à 80° avec la zone qui constituent le second order faulting.

Dans certains cas, il peut apparaître des cisaillements synthétiques P, faisant un angle de 15° environ avec la shear zone et jouant dans le même sens, ainsi que des cisaillements antithétiques P'.

Les joints du groupe II

Ils se disposent perpendiculairement à la direction de la contrainte maximum σ_1 . Leur genèse est encore mal connue. Ces fissures II sont souvent appelées fentes de tension, car elles s'ouvrent lors des plissements ou des déformations internes du rocher. Dans les roches calcaires non

plissées, elles peuvent se matérialiser sous forme de joints stylolithiques, les pics stylolithiques étant parallèles à la direction de la contrainte maximum σ_1 .

Lorsque certaines conditions de pression et de température sont remplies, apparaît la schistosité, dont l'orientation est semblable aux fissures II (perpendiculaires à σ_1). A l'affleurement, la schistosité correspond à des discontinuités planaires souvent disposées en éventail (convergence vers le coeur des plis) et réfractées au niveau des inter-bancs quand existent des différences de compétence. On distingue la schistosité de fracture (seulement plans de glissement) et la schistosité de flux qui est un feuilletage très dense avec recristallisation de minéraux parallèlement aux plans.

L'agencement final de l'ensemble des failles est le suivant:

- les décrochements sont parallèles aux cisaillements de type III et IV;
- les groupes F correspondent aux failles normales;
- les groupes C1 et C2 aux chevauchements;
- le groupe Ch aux charriages.

Systemes de contraintes et champ de fracturations dans le bassin versant de la Sissili

Comme nous l'avons déjà vu, l'ensemble des données tectoniques, mais surtout les directions de foliation montrent que les roches du bassin ont été, toutes ou partiellement, sollicitées par trois phases tectoniques. On peut tenter à partir des directions de foliation et des autres données de terrain de reconstituer théoriquement la genèse du réseau de fractures associable aux contraintes dont on sait que la principale maximum est perpendiculaire à la schistosité du flux.

Aux trois phases \mathcal{F}_1 , \mathcal{F}_2 , \mathcal{F}_3 auraient pu correspondre les fractures dont la nature et les directions sont regroupées dans le tableau ci-après.

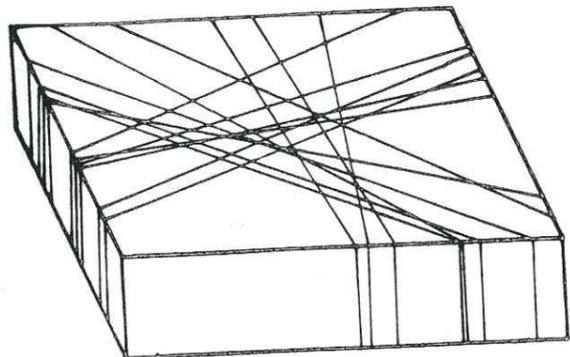
Dans l'Ouest et le Nord du bassin versant, la foliation N 0° N 20° n'a été perturbée que par la mise en place des intrusions basiques et des granites orientés qu'accompagnent les filons pegmatitiques et la phase de serrage finale.

Dans l'Est et le Sud-Est par contre, une phase \mathcal{F}_1 , avec une foliation N 70° vient se superposer à la première dont elle efface la foliation avant d'être elle-même déformée par le serrage final N 40° des dernières intrusions.

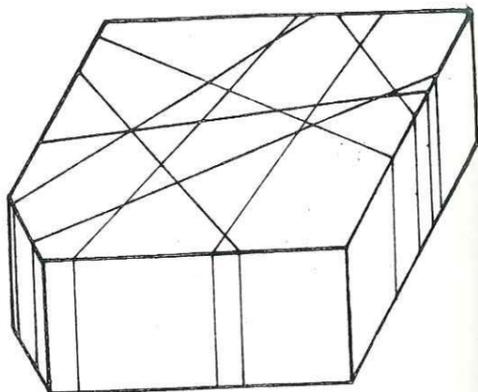
Plusieurs stades peuvent être distingués:

- Stade 1: métamorphisme général catazonal de foliation N 0° - N 20° ,
- Stade 2: métamorphisme et remobilisation granitique orientée des formations de l'Est et du Sud-Est du bassin versant avec une foliation N 70° remplaçant la première,
- Stade 3: apparition dans les migmatites des stades 1 et 2 de fractures de distension,
- Stade 4: injection dans les fractures de distensions ouvertes de venues magmatiques basiques,
- Stade 5: injection granitique et remobilisation des venues basiques dans la mésozone.

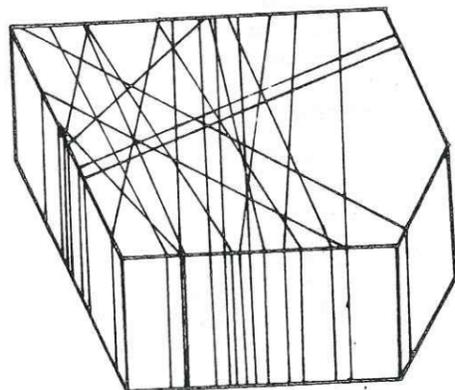
BLOCS DIAGRAMMES
DES STATIONS DE MESURE DE LA FISSURATION



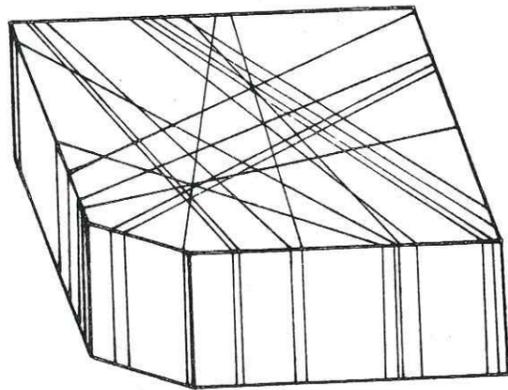
P30



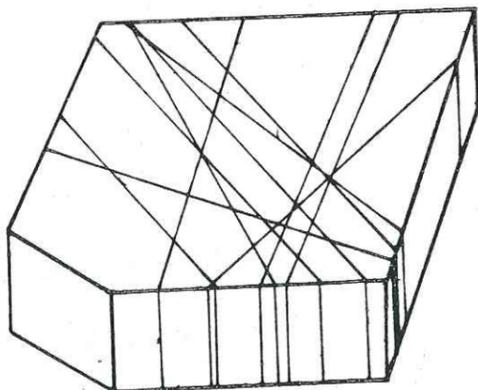
PI06



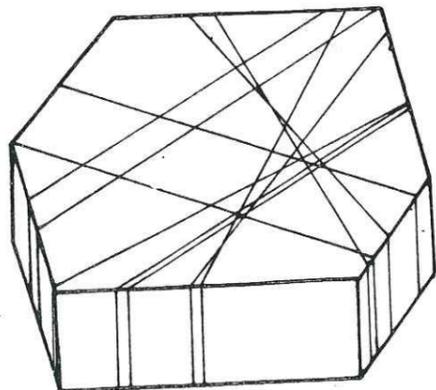
PII2



L59



P48



LT3

Fig. 32

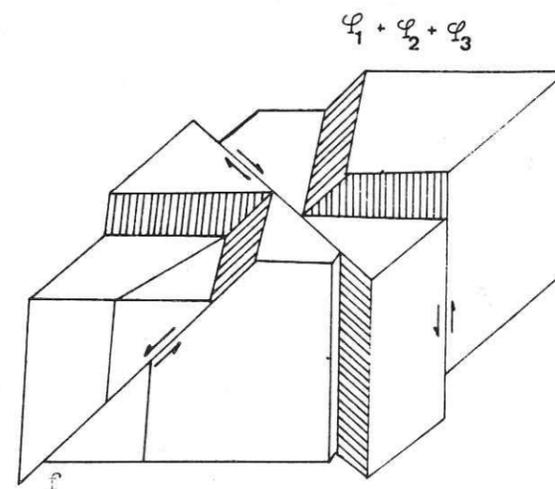
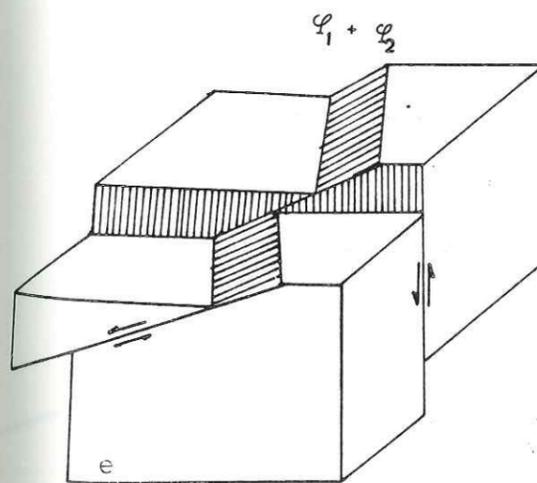
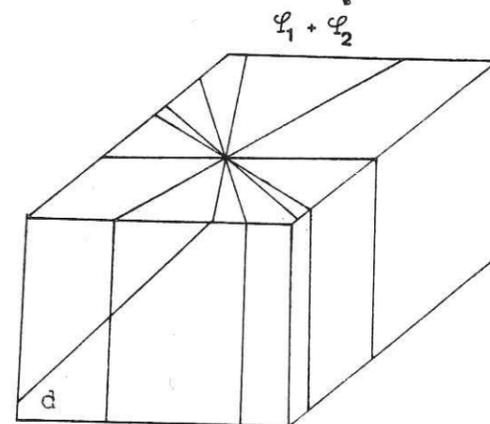
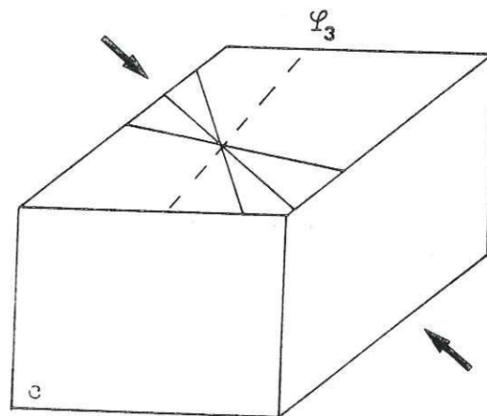
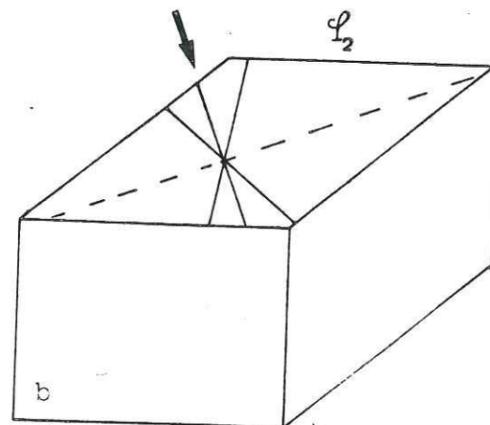
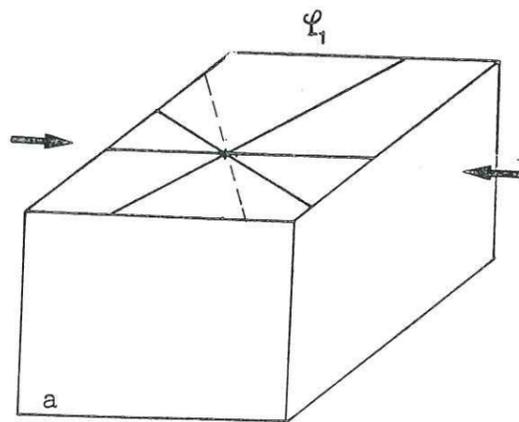


FIG. 33 : DIRECTION DES FRACTURES ET DES FOLIATIONS LIEES AUX TROIS PHASES TECTONIQUES, JEUX POSSIBLES DES DIFFERENTES FAILLES. Les deux blocs diagrammes c et d ont été réalisés en tenant compte des directions de fôliation et en ne faisant jouer que les cisaillements.

Stade 6 : contemporain du stade 5; intrusions des filons pegmatitiques serrage et apparition de jeux décrochants (décrochement dextre de Guiaro).

Sur les blocs diagrammes, nous avons matérialisé en a, b, c, et d les différents directions de fractures associables aux phases φ_1 , φ_2 , et $\varphi_1 + \varphi_3$ (pour la région est). Les blocs d et f montrent les jeux des seules fractures ouvertes (fig 33).

Phases tectoniques	Schistosité ou foliation	Fentes de tension	Fissures de cisaillement
φ_1	N 0	N 90	N 60-120
φ_2	N 70	N 160	N 130-190
φ_3	N 40	N 130	N 100-160

Nature et directions des fractures liées aux phases tectoniques ayant affecté les formations du bassin versant de la Sissili

Rôle hydraulique des différents fractures

L'histoire génétique des fractures nous permet de distinguer des joints ouverts et des joints fermés. Lorsque nous examinons les données du tableau ci-dessus, on note qu'avec la superposition des phases plusieurs directions ont dû rejouer plusieurs fois. Certaines d'entre elles en joints toujours fermés, c'est le cas des fractures de direction N 0° - N 20°, mais aussi de celles N 60° - N 70°: d'autres ont par contre joué en cisaillement, puis en distension ou inversement. C'est le cas des fissures N 90° - N 100°, N 120° - N 130° et N 160°. Nous retiendrons ces dernières comme étant les fissures les plus ouvertes, donc aussi celles à même de jouer un rôle de drainage important par rapport aux altérites environnantes.

Comparaison avec les résultats d'autres études antérieures

A ce jour la seule étude qui essaie, à partir des données des clichés aériens, mais aussi des mesures sur affleurement, de dégager les familles de fractures drainantes, parce que génétiquement ouvertes, est celle réalisée par GRILLOT en 1979 dans la région de Mogtédou située au Nord-Est du bassin de la Sissili.

L'auteur après une identification qualitative de la fracturation et une approche de leur genèse dégage pour chaque secteur étudié les familles de fractures profondes et ouvertes pouvant jouer un rôle important.

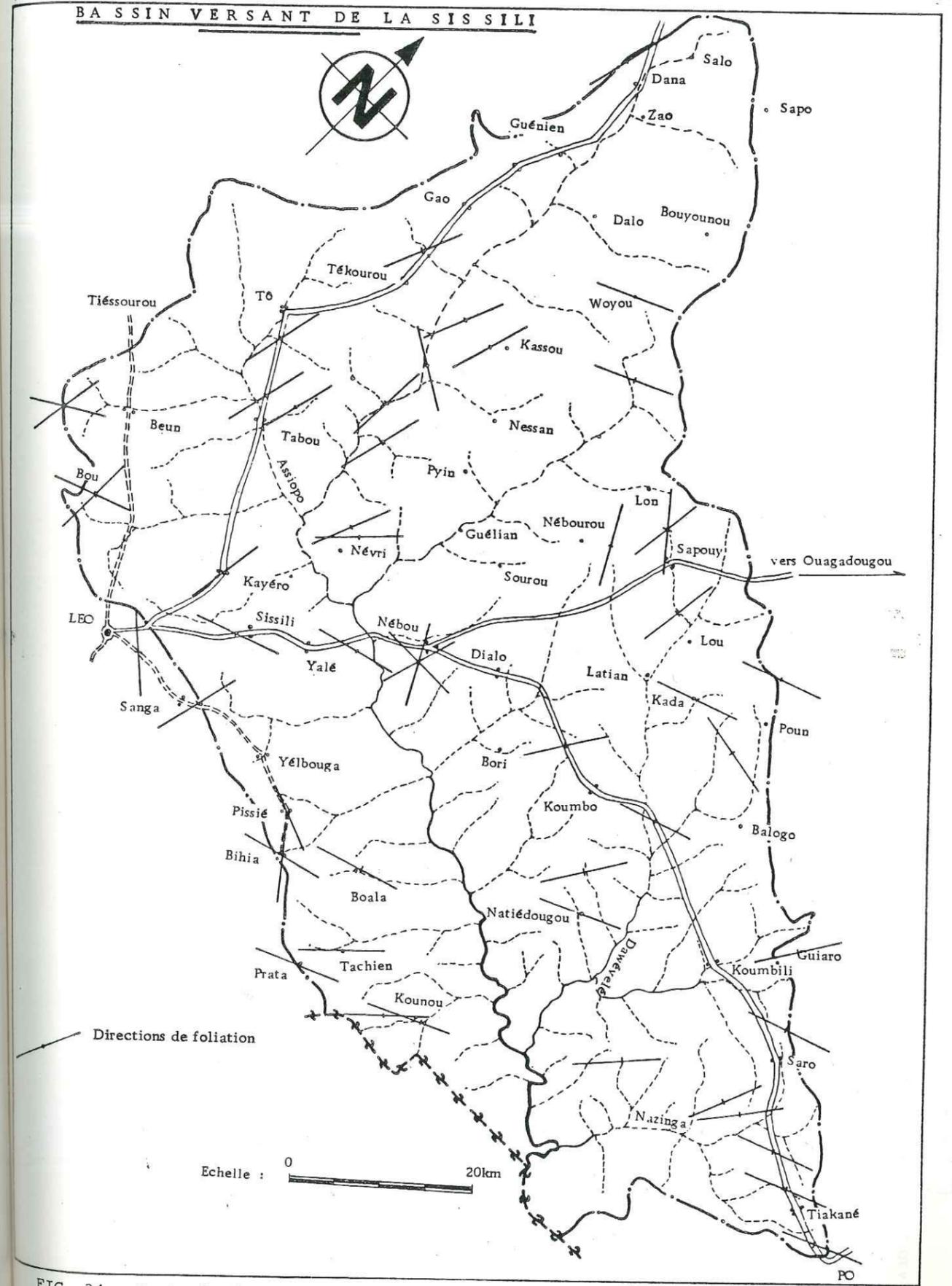


FIG. 34 : Carte de directions de foliation

Localité	Fractures ouvertes et profondes	Fractures ouvertes superficielles	Autres joints
Motgêdo	N 20 - N 30 N 50 - N 170	N 0 - N 10 N 90 - N 100	N 60 - N 80 N 110 - N 120 N 150 - N 170 à pendage faible
Zigla	N 20 - N 30 N 60 - N 80	N 0 - N 10 N 90 - N 100 N 40 - N 45 N 130 - N 150	N 150 - N 170 subverticaux ou à pendage faible. N 110 - N 120

Le tableau ci-dessus montre que nous retrouvons dans la région de Motgêdo et dans le bassin versant de la Sissili des familles directionnelles de fractures communes. Cependant l'examen de la carte géologique régionale montre un changement net de la direction des structures et des failles régionales entre le bassin de la Sissili et la région de Motgêdo. Du premier à la deuxième, nous passons d'un allongement sud-ouest - nord-est, à un allongement nord-sud. Les phases de compression qui se manifestent dans le bassin de la Sissili s'accompagnent de schistosité de flux dont nous avons noté les directions. A Motgêdo on ne signale pas l'existence de directions multiples de foliation associées aux trois phases compressives mises en évidence.

Toutes ces raisons évoquées expliqueraient que des fractures de directions identiques jouent des rôles hydrauliques différents entre ces deux régions situées à 150 km l'une de l'autre.

2.2.5.2. FRACTURATION ET PERMÉABILITÉ

Le but final de la démarche qui nous a conduit à l'analyse fréquentielle et génétique de la fracturation du socle cristallin en l'assimilant aux linéaments repérés sur les photos aériennes, ou sur les images de satellites, ainsi qu'à celle du système de joints des affleurements, est de permettre une bonne connaissance de l'hydraulicité du socle fissuré. Cette hydraulicité est liée aux perméabilités induites par le système de fractures.

Dans un terrain homogène et isotrope, la valeur de la perméabilité est représentée par un scalaire. Les roches fissurées du substratum constituent un milieu anisotrope dont la perméabilité qui est différente suivant la direction considérée ne peut être estimée que par un tenseur. Nombreux sont les auteurs ayant proposé des formules de calcul de la perméabilité du milieu fissuré. D'une manière générale on peut dire que deux formules fondamentales permettent le calcul du tenseur perméabilité: elles expriment la vitesse moyenne d'écoulement dans la fissure ou le débit par unité de longueur d'écoulement:

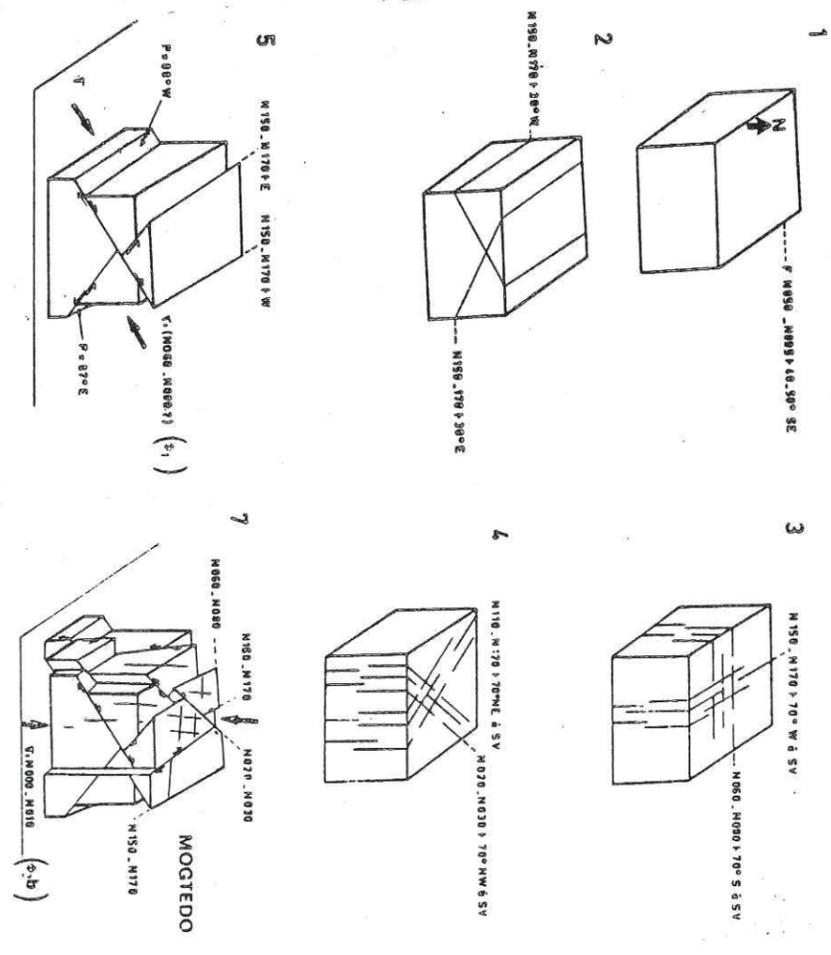
$$V_i = \frac{g}{12V} d_i^2 J_i \quad (L T^{-1}) \quad (\text{WITKE W., LOUIS C., 1968})$$

$$Q_i = \frac{g}{12V} d_i^3 J_i \quad (L^2 T^{-1}) \quad \text{en fonction de l'ouverture } d_i \text{ de la fissure et du gradient } J_i \text{ rabattu dans le plan de la fissure.}$$

Si l'on tient compte des deux paramètres proposés par LOUIS C. (1968) FRANCIS F.O. (1970).

x = degré de séparation ou rapport entre surface du secteur ouvert de la fissure et sa surface totale.

Figure 35
IDENTIFICATION QUALITATIVE DE LA FRACTURATION



- Stade 1 : foliation des migmattites
- Stades 2, 3, 4 : joints hérités conjugués apparaissant dans les migmattites (post-foliation et anté contractiles tectoniques).
- Stade 5 : contrainte compressive à raccourcissement E-W (σ₁). Première phase mise en évidence (41).
- Stade 6 : contrainte compressive à raccourcissement subméridien (σ₁). Deuxième phase avec manifestation d'un premier temps de serrage (42a).
- Stades 7 et 8 : deuxième temps de serrage (42b) avec jeux coulissants inversés sur joints N020-N030 (stade 7 MOGTEDO ; stade 8 ZIGLA). Jeux coulissants préférentiels sur fractures N150-N170 (MOGTEDO) N060-N080 (ZIGLA) N020-N030

Nota - P : pitch (angle aigu que fait la strie avec l'horizontale du plan). Sur les blocs diagrammes tectoniques ne sont représentés que les joints principaux ayant bénéficié de jeux en ouverture.

(J. C. GRILLIOT, 1979)

$r = \frac{K}{DH}$ = la rugosité relative, ou rapport entre la hauteur des aspérités et le diamètre hydraulique ($Dh = 2 di$).

Les deux formules deviennent:

$$Q_i = \frac{g}{12V} \frac{di^3}{(1 + 8,8 r^{1,5})} \quad J_i \quad \text{pour } r > 0,033$$

ou $Q_i = x \frac{g}{12V} di^3 J_i \quad \text{pour } r \leq 0,033$

Plus généralement:

$$\bar{K} = \frac{g}{12V} \sum_{j=1}^n \frac{X_j}{Y} f_j d_j (1 - n_j \otimes n_j) \quad (L T^{-1})$$

avec $Y = 1$ si $r < 0,033$

$$Y = 1 + 8,8 r^{1,5} \quad \text{si } r > 0,033$$

2.2.5.2.1. Le champ de perméabilité

Quelle que soit l'hypothèse admise, le champ de perméabilité (K_j) dû à un ensemble de fissures i , peut être calculé à partir des trois sous-champs: n_j , f_j et d_j .

Dans les faits, l'estimation des ouvertures d_j est difficile à cause de sa variation le long d'une même fissure, de l'existence de remplissage et de la décompression intervenant en surface.

Dans notre cas, il serait même difficile de dire que n_j et f_j à l'affleurement sont représentatifs de ceux du substratum, car comme nous l'avons signalé une condition première d'émergence en dôme d'un massif est qu'il soit peu fissuré.

Nous choisissons d'approcher les perméabilités induites par la deuxième méthode préconisée par FRANCIS F. qui utilise des données photogéologiques. Nous l'appliquerons à l'ensemble du bassin versant de la Sissili (linéaments tracés à partir de vues de satellite) puis à la zone du ranch de Léo et des environs de Po (linéaments vus sur photo aériennes).

2.2.5.2.2. Principe de la méthode

1°/ Si l'on considère un système spatial défini par un cercle de diamètre D , contenant un ensemble de mégafractures, la conductibilité hydraulique de chaque mégafracture suivant sa longueur L dans le système défini est:

$$K_F = \frac{e}{D}$$

où: e = épaisseur moyenne de la zone broyée de la mégafracture
et K_F = conductibilité hydraulique de la zone broyée.

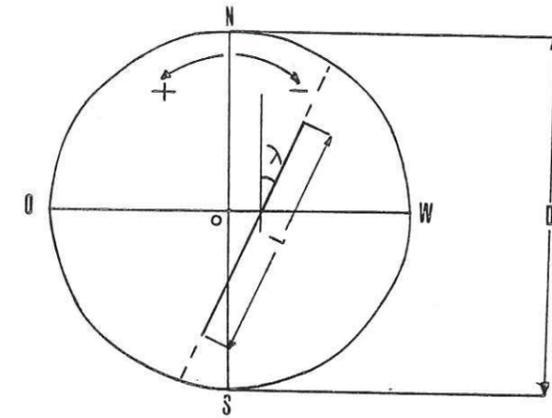
2°/ Nous poserons comme hypothèse que:

- La mégafracture est continue à l'intérieur du système considéré;
- l'épaisseur de la zone broyée est une fonction linéaire empirique de la longueur apparente (L) de la mégafracture.

$$e = C L$$

Le problème peut être traité à deux dimensions pourvu que l'épaisseur de la croûte facturée soit mince par rapport à son étendue. Les études géophysiques et les données des forages sur l'épaisseur des arènes et de la roche broyée montrent que nous sommes bien dans ce cas.

3°/



Par rapport à un système d'axes NS et OW, les composantes du tenseur K représentatif de la conductibilité hydraulique de chaque mégafracture sont données par les relations suivantes:

$$K_{NN} = K \cos^2 \lambda$$

$$K_{WW} = K \sin^2 \lambda$$

$$K_{NW} = -K \sin \lambda \cos \lambda \quad \text{avec } K = \frac{K_F CL}{D} = \alpha L$$

4°/ La tenseur qui exprime l'effet simultané de plusieurs mégafractures découle de la sommation des tenseurs de chaque mégafracture:

$$\|K\| = \|k_1\| + \|k_2\| + \|k_3\| + \dots + \|k_n\|$$

5°/ Les autovecteurs et valeurs propres de $\|K\|$ sont donnés par les formules suivantes:

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \frac{2K_{nw}}{(K_{nw} - K_{ww})}$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \frac{(K_{nw} - K_{ww})}{2K_{nw}}$$

$$K_1 = \frac{1}{2} (K_{nn} + K_{ww}) + \frac{1}{2} \sqrt{(K_{nn} - K_{ww})^2 + 4K_{nw}^2}$$

$$K_2 = \frac{1}{2} (K_{nn} + K_{ww}) - \frac{1}{2} \sqrt{(K_{nn} - K_{ww})^2 + 4K_{nw}^2}$$

Comme données numériques, nous prendrons:

$$K_F = 10^{-3} \text{ cm/s} \quad \text{ou } K_F = 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$\text{et } C = 10^{-3}$$

La valeur de 10^{-5} m/s pour K peut paraître élevée pour les débits moyens obtenus dans l'ensemble des formations cristallines de Haute-Volta comme au niveau du bassin versant de la Sissili. Nous considérons ici une valeur qu'on pourrait qualifier de supérieure, puisqu'elle représente la moyenne des perméabilités obtenues au niveau des ouvrages les plus productifs, c'est à dire ceux ayant fourni au moins $5 \text{ m}^3/\text{h}$ et implantés par géophysique. Leur productivité prouve qu'ils sont bien situés sur des fractures.

La valeur de la constante C est déduite des mesures de fissuration sur affleurements. C'est la moyenne des rapports ouverture/longueur des fractures mesurées.

2.2.5.2.3. Mode opératoire

Nous appliquons la méthode à des linéaments repérés sur images prises de satellites ou sur photo-aériennes. Chaque linéament est considéré comme étant une mégafracture que nous caractérisons par sa longueur et son azimut.

Chaque zone où nous appliquons la méthode (bassin versant de la Sissili, ranch d'embouche de Léo, environs de Pô) est divisée en cercles d'égal diamètre D; (D est le même pour une zone donnée, mais peut varier d'une zone à l'autre en fonction de l'échelle des prises de vues et de la densité des linéaments). Chaque cercle est désigné par un couple: lettre - chiffre constituant ses coordonnées.

Un programme sur ordinateur mis au point à l'Institut Dolomieu permet ensuite de calculer les différents facteurs: K1 et K2 perméabilité maximale et minimale, λ_1 et λ_2 les angles respectifs que fait la direction de ces perméabilités avec le Nord par introduction des deux variables: longueur et azimut.

2.2.5.2.4. Présentation et analyse des résultats

Nous donnons les résultats du traitement informatique sous forme de tableaux. A partir des tableaux, nous réalisons des cartes de perméabilités induites qui sont de deux types:

. Carte de directions et valeurs de perméabilités maximale et minimale;

. Carte de perméabilités maximales avec tracé de courbes d'équiperméabilité induite.

La première remarque importante que l'on peut faire au niveau des résultats obtenus est la similitude logique existant entre les directions des mégafractures et celles des perméabilités maximales induites. Elle montre bien l'aptitude de la méthode FRANCISS à associer aux fractures les perméabilités qui leur sont liées.

Ainsi, dans les secteurs où les deux éléments du couple suborthogonal de fractures ont la même importance relative, les perméabilités induites traduisent fidèlement ce fait qui s'exprime par une croix à branches d'égal longueur (zone de l'aérodrome de Pô) (fig. 38).

2.2.5.2.5. Relation entre direction des axes de perméabilité induite maximale et le dessin du réseau hydrographique

A première vue, la distribution spatiale des valeurs de perméabilité induite semble aléatoire; fluctuant avec la densité relative des linéaments. Mais lorsque nous traçons les courbes d'équiperméabilité induite, on voit apparaître nettement une relation étroite existant entre le dessin du réseau hydrographique et les perméabilités induites. En effet, on constate que les axes de perméabilité maximale coïncident dans la plupart des cas avec le tracé des branches du réseau hydrographique. Considérons, par exemple la carte déduite des données de satellite du bassin versant de la Sissili. On remarque que depuis le point où la Sissili prend sa "source" (à la hauteur de Thiou au Nord), la rivière suit l'axe de perméabilité maximale jusqu'à sa confluence avec l'affluent Assiopo qui lui aussi empruntait un autre axe de perméabilités maximales d'orientation Ouest-Est. Rivière et axe de perméabilités maximales s'incurvent ensemble pour prendre une direction NO-SE jusqu'à la frontière avec le Ghana. Au niveau de tous les autres affluents importants de la Sissili: Kafina-boua, Dawevelé, Nazinga nous retrouvons cette relation (fig. 36).

On constate également que la relation mise en évidence à partir des données d'image de satellite se retrouve bien au niveau de la carte de perméabilités induites du périmètre du ranch d'embouche de Léo dressée, elle à partir de photos aériennes (fig. 39).

Tableau 24

n° du cercle	λ_1	λ_2	K1	K2	$\frac{K1 + K2}{2}$	K1/K2
A5	-58	31	0,65	0,53	0,60	1,25
A6	31	-58	0,92	0,52	0,72	1,77
A7	-42	47	1,54	0,74	1,14	2,07
A8	17	-72	1,30	0,90	1,1	1,44
A9	-7	19	1,00	0,81	0,91	1,23
B2	13	-76	0,45	0,19	0,32	2,35
B3	24	-65	1,12	0,86	0,99	1,29
B4	31	-58	0,84	0,46	0,65	1,83
B5	23	-66	0,98	0,45	0,71	2,17
B6	1	-88	0,99	0,52	0,76	1,90
B7	-47	42	1,48	1,04	1,26	1,42
B8	-74	15	1,07	0,91	0,99	1,18
B9	-55	34	1,02	0,82	0,92	1,25
B10	-51	38	0,79	0,52	0,66	1,51
C1	27	-62	0,44	0,002	0,22	244,52
C2	34	-55	0,54	0,12	0,33	4,60
C3	-60	29	0,99	0,35	0,67	2,86
C4	0	-90	0,98	0,74	0,86	1,33
C5	36	-53	1,00	0,51	0,76	1,96
C6	-58	31	0,84	0,69	0,77	1,21
C7	42	-47	0,95	0,87	0,91	1,09
C8	26	-63	1,28	0,78	1,03	1,63
C9	-68	21	0,76	0,47	0,62	1,64
C10	47	-42	0,54	0,45	0,50	1,19
D1	21	-68	0,36	0,10	0,23	3,80
D2	-39	50	1,15	0,82	0,98	1,39
D3	-5	84	1,36	0,85	1,10	1,60
D4	-7	82	1,29	0,68	0,97	1,87
D5	12	-77	1,04	0,91	0,98	1,13
D6	-79	10	0,92	0,73	0,82	1,26
D7	-64	25	0,95	0,19	0,57	5,01
D8	32	-57	1,35	0,58	0,96	2,32
D9	25	-64	1,12	0,29	0,70	3,91
D10	45	-44	0,71	0,52	0,62	1,36
E2	-36	53	0,81	0,27	0,55	3,07
E3	36	-53	0,97	0,60	0,78	1,61
E4	51	-38	1,44	0,95	1,19	1,51
E5	44	-45	0,75	0,52	0,63	1,45
E6	24	-65	1,20	0,75	0,98	1,59
E7	38	-51	1,12	0,65	0,88	1,71
E8	15	-74	0,65	0,37	0,51	1,76
E9	39	-50	1,31	0,56	0,93	2,32
E10	35	-54	0,90	0,29	0,59	3,14
F4	46	-43	1,45	0,66	1,05	2,18
F5	-59	30	0,98	0,29	0,63	3,39
F6	72	-17	0,94	0,60	0,77	1,55
F7	12	-77	0,73	0,62	0,67	1,18
F8	-69	20	0,51	0,33	0,42	1,53
F9	56	33	0,49	0,28	0,38	1,71
F10	.29	-60	0,75	0,31	0,53	2,41
G5	82	-7	1,09	0,99	1,04	1,09
G6	50	-39	1,24	0,66	0,95	1,86
G7	0	-89	0,62	0,49	0,56	1,27
G8	76	-13	0,83	0,61	0,72	1,37

Tableau 24 - Bassin versant de la Sissili - Perméabilités induites (suite)

n° du cercle	λ_1	λ_2	K1	K2	$\frac{K1+K2}{2}$	K1/K2
G9	-58	31	0,60	0,42	0,51	1,43
G10	-45	44	0,66	0,34	0,50	1,95
G11	50	-39	0,78	0,54	0,66	1,44
H5	-1	88	0,96	0,87	0,86	1,27
H6	20	-69	1,58	0,71	1,14	2,83
H7	-23	66	0,90	0,72	0,81	1,25
H8	61	-28	0,62	0,43	0,52	1,42
H9	-61	28	0,59	0,36	0,47	1,65
H10	-17	72	0,53	0,47	0,50	1,12
H11	-74	15	0,84	0,50	0,67	1,69
I6	-78	11	0,74	0,59	0,66	1,25
I7	-44	45	0,85	0,54	0,70	1,57
I8	-40	49	0,74	0,38	0,56	1,94
I9	-54	35	0,66	0,34	0,50	1,90
I10	-54	35	0,62	0,013	0,31	48,84
I11	83	-6	0,80	0,54	0,67	1,47
J7	-77	12	0,56	0,46	0,51	1,21
J8	-50	39	1,00	0,57	0,79	1,77
J9	-22	67	0,89	0,59	0,74	1,49
J10	4	-85	0,94	0,34	0,64	2,73
J11	81	-8	0,81	0,50	0,65	1,62
K8	32	-57	1,28	0,46	0,87	2,75
K9	-2	87	0,94	0,52	0,73	1,81
K10	22	-67	0,74	0,25	0,49	2,96
K11	-88	1	0,59	0,46	0,52	1,29
L9	27	-62	0,80	0,49	0,65	1,65
L10	3	-86	0,64	0,43	0,53	1,48
L11	-54	35	0,74	0,34	0,54	2,20
H9-10	-45	44	0,72	0,56	0,64	1,28

FIG. 36 : BASSIN VERSANT DE LA SISSILI
 CARTE DE PERMEABILITES INDUITES
 (perméabilités en 10^{-8} m/s)

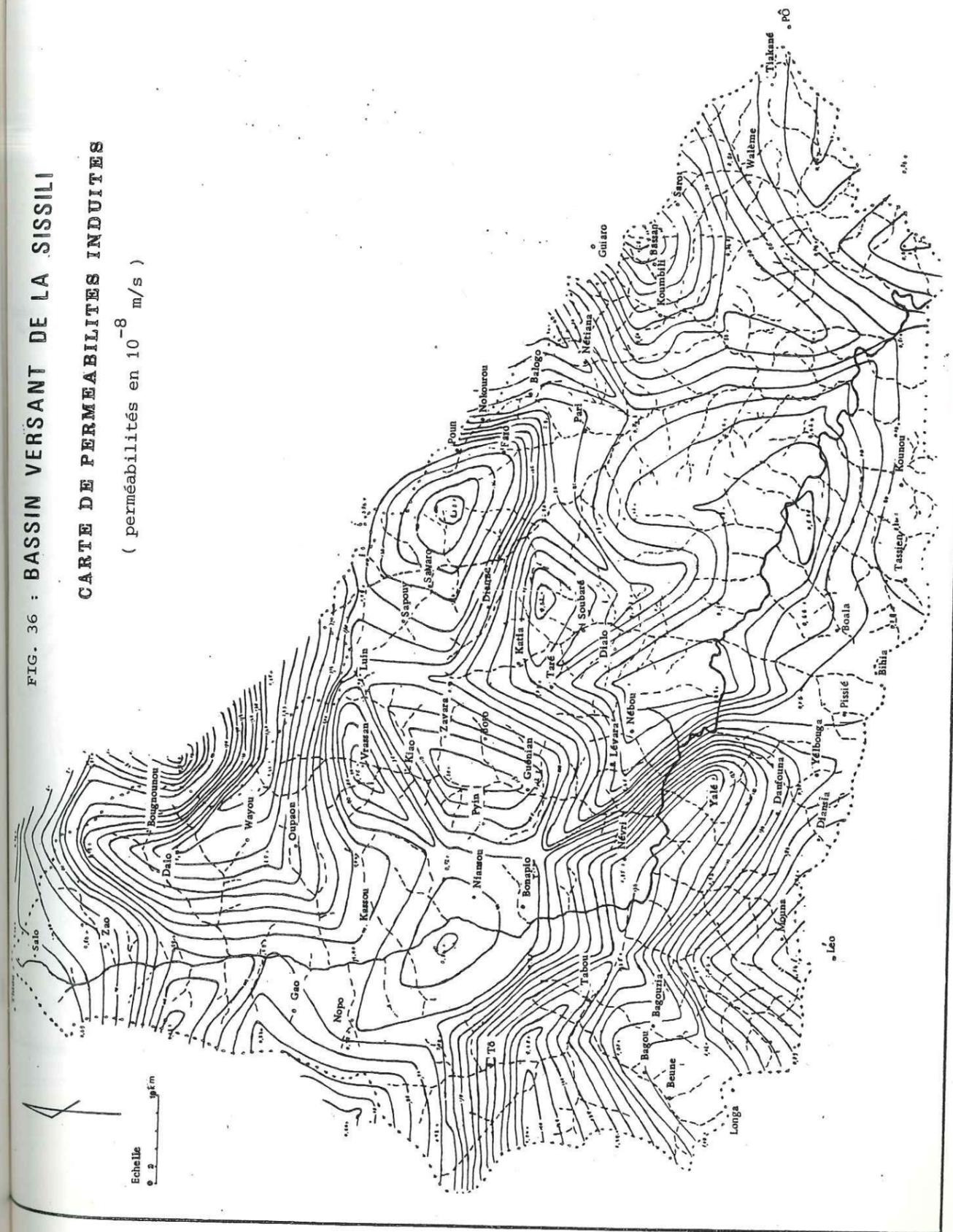


Tableau 25

n° du cercle	λ_1	λ_2	K1	K2	$\frac{K1 + K2}{2}$	K1/K2
A1	34	-55	0,76	0,20	0,48	3,75
A2	28	-61	0,87	0,51	0,69	1,70
A3	2	-87	0,52	0,49	0,51	1,07
A4	-48	41	1,12	0,38	0,75	2,97
A5	-34	55	0,79	0,15	0,47	5,32
A6	-30	60	0,05	0	0,025	-
B1	42	-47	1,14	0,69	0,92	1,64
B2	-33	56	1,41	1,07	1,24	1,31
B3	-26	63	1,6	0,84	1,21	1,91
B4	-45	44	1,49	0,76	1,13	1,94
B5	88	-1	3,37	0,81	2,09	4,14
B6	-52	37	1,18	0,59	0,88	2,02
C1	-61	28	1,48	0,79	1,14	1,87
C2	-60	29	1,96	0,68	1,32	2,87
C3	-59	30	1,43	1,1	1,26	1,29
C4	70	-19	1,65	0,94	1,30	1,75
C5	-69	20	1,69	0,52	1,11	3,23
C6	-47	42	0,89	0,42	0,66	2,10
D1	-62	27	1,36	0,60	0,98	2,26
D2	-83	6	1,65	1,20	1,42	1,37
D3	-49	40	1,07	0,70	0,85	1,53
D4	-61	28	1,63	1,01	1,32	1,61
D5	-61	28	1,17	0,56	0,86	2,09
D6	29	-60	0,39	0,10	0,25	3,99
E1	-60	29	0,71	0,35	0,53	2,0
E2	-73	16	0,85	0,26	0,56	3,27
E3	-74	15	0,70	0,33	0,52	2,10
E4	85	-4	1,12	0,48	0,8	2,35
E5	66	-23	0,66	0,41	0,53	1,62
E6	58	-31	0,33	0,02	0,18	14,02
F1	49	-40	0,39	0,04	2,18	9,44
F2	-74	15	0,68	0,15	0,41	4,63
F3	-62	27	0,96	0,20	0,58	4,78
F4	16	-73	0,28	0,14	0,21	2,10
F5	43	-46	0,37	0,18	0,28	1,98

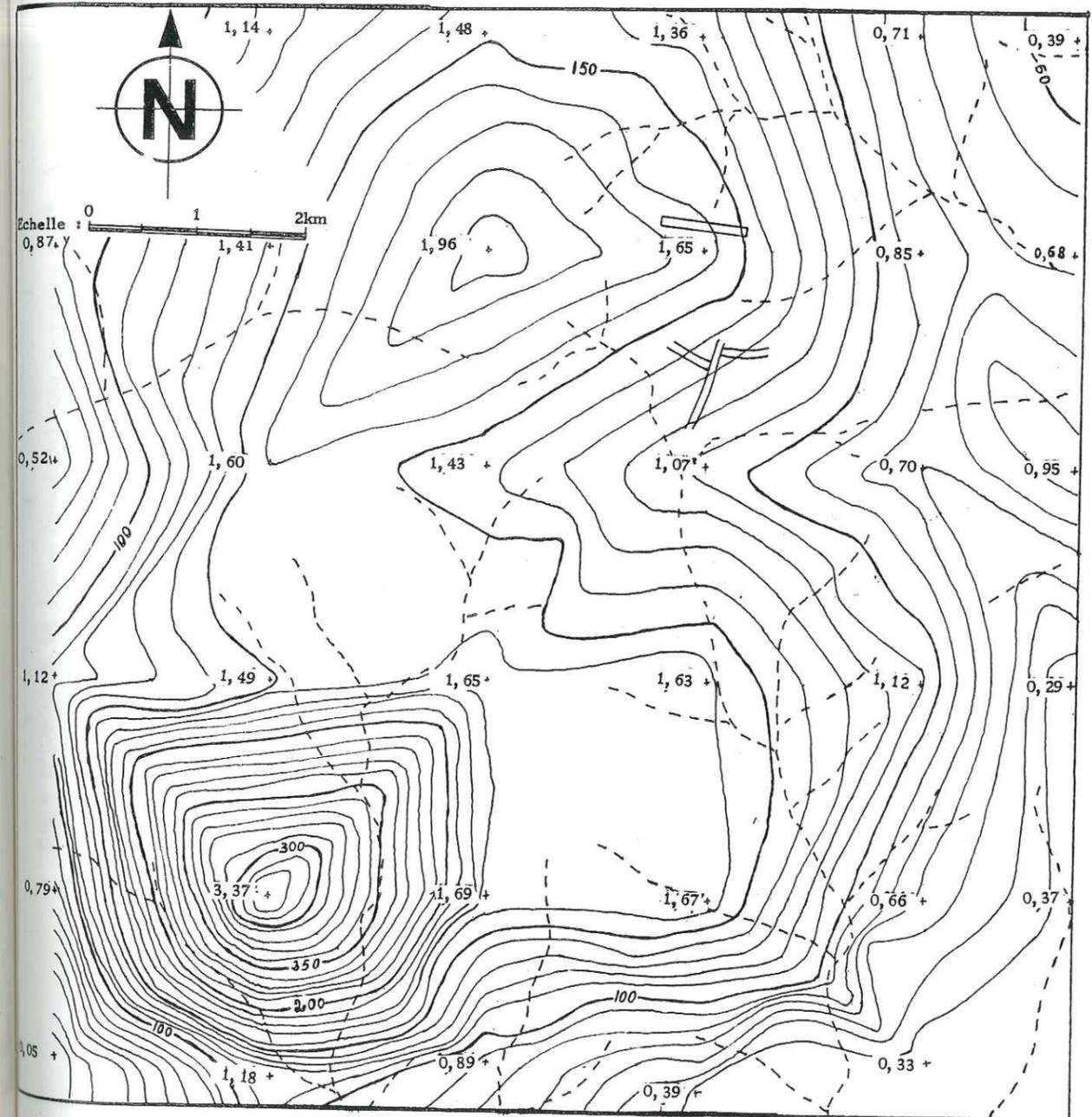
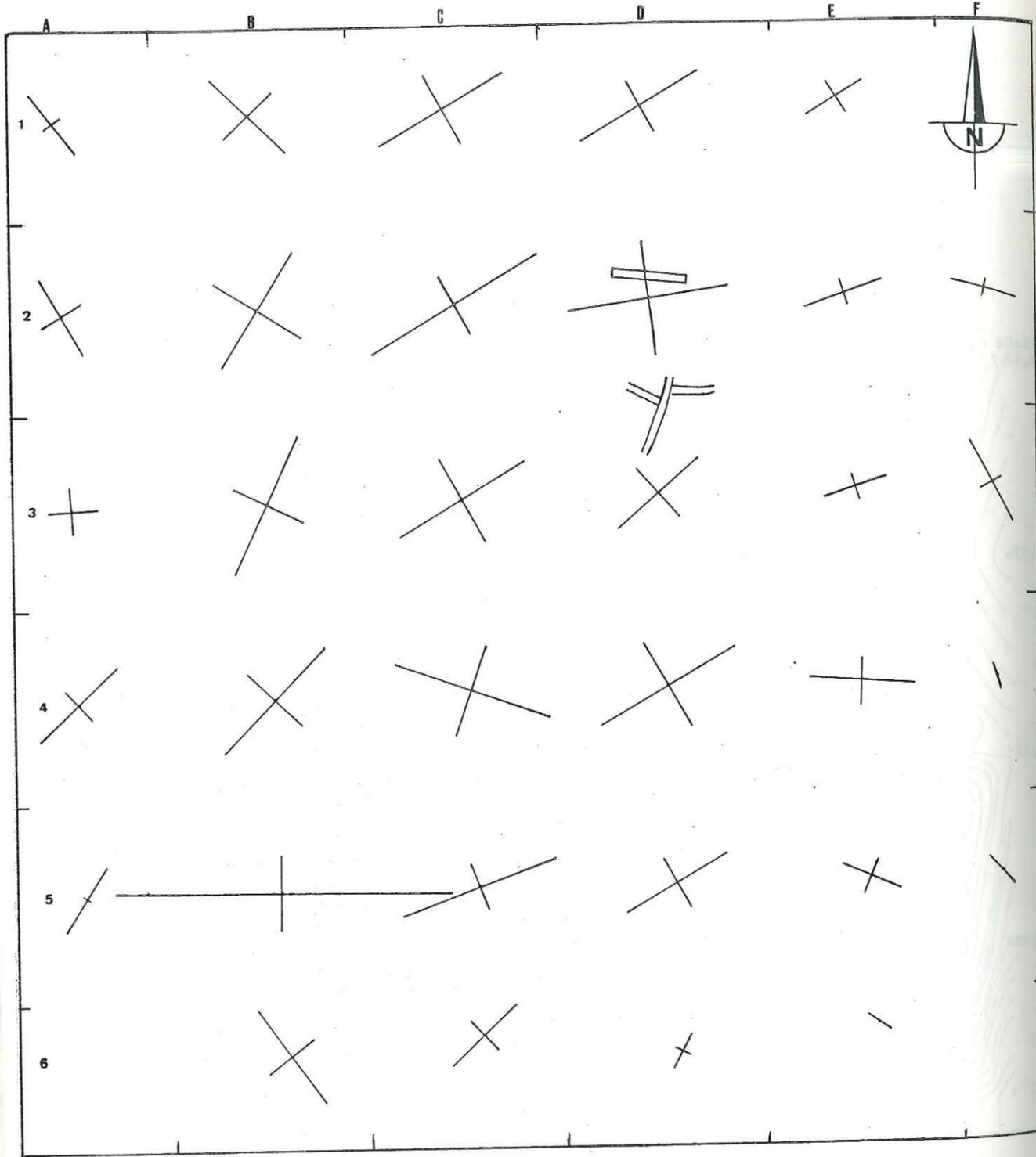
FIG. 37 : ENVIRONS DE PO
CARTE DE PERMEABILITES INDUITES (10^{-8} m/s)

FIG. 38 : DISTRIBUTION DES PERMEABILITES INDUITES DANS LES ENVIRONS DE PO
(directions par rapport au nord; valeurs : $1\text{cm} = 10^{-8} \text{ m/s}$)



RANCH D'EMBOUCHE DE LEO - Perméabilités induites (10^{-8} m/s)

n° du cercle	λ_1	λ_2	K1	K2	$\frac{K1+K2}{2}$	K1/K2
A1	76	-13	1,12	0,135	0,74	3,18
A2	-87	2	0,11	0,025	0,068	4,38
A3	-70	19	0,09	0,014	0,052	6,49
A4	-76	13	0,056	0,002	0,029	25,24
A5	-78	11	0,023	0,032	0,013	7,18
A6	-52	37	0,033	9×10^{-6}	0,0016	
B1	60	-29	0,098	0,011	0,055	8,90
B2	84	-5	0,165	0,038	0,10	4,34
B3	82	-7	0,16	0,018	0,087	8,86
B4	-89	1	0,12	0,016	0,065	7,32
B5	78	-11	0,17	0,042	0,11	4,05
B6	23	-66	0,036	0,027	0,032	1,32
C1	72	-17	0,081	0,012	0,047	6,61
C2	84	-5	0,16	0,063	0,11	2,55
C3	-70	19	0,32	0,024	0,17	13,33
C4	81	-8	0,16	0,023	0,093	7,08
C5	70	-19	0,18	0,027	0,11	6,58
C6	81	-8	0,082	0,016	0,049	5,20
C7	-63	26	0,094	0,008	0,051	18,13
D1	75	-14	0,034	0,0013	0,018	26,49
D2	-79	10	0,044	0,042	0,093	3,45
D3	-87	2	0,059	0,023	0,041	2,57
D4	80	-9	0,16	0,022	0,09	7,02
D5	-87	2	0,143	0,057	0,10	2,50
D6	88	-1	0,12	0,043	0,082	2,83
D7	76	-13	0,18	0,051	0,011	3,50

Tableau 26

n° du cercle	λ_1	λ_2	K1	K2	$\frac{K1+K2}{2}$	K1/K2
E1	69	-20	0,034	0,004	0,019	8,03
E2	85	-4	0,095	0,027	0,061	3,50
E3	80	-9	0,071	0,0069	0,039	10,34
E4	82	-7	0,13	0,012	0,07	10,31
E5	-84	5	0,18	0,041	0,11	4,47
E6	-51	38	0,11	$0,69 \times 10^{-2}$	0,057	162,44
E7	86	-3	0,24	0,052	0,15	4,65
F3	82	-7	0,082	$0,36 \times 10^{-2}$	0,043	22,66
F4	82	-7	0,13	0,011	0,072	11,44
F5	-72	17	0,114	0,027	0,082	5,01
F6	-76	13	0,08	0,017	0,049	4,60
F7	-80	9	0,12	0,032	0,076	3,79

RANCH D'EMBOUCHE DE LEO
CARTE DE PERMEABILITES INDUITES

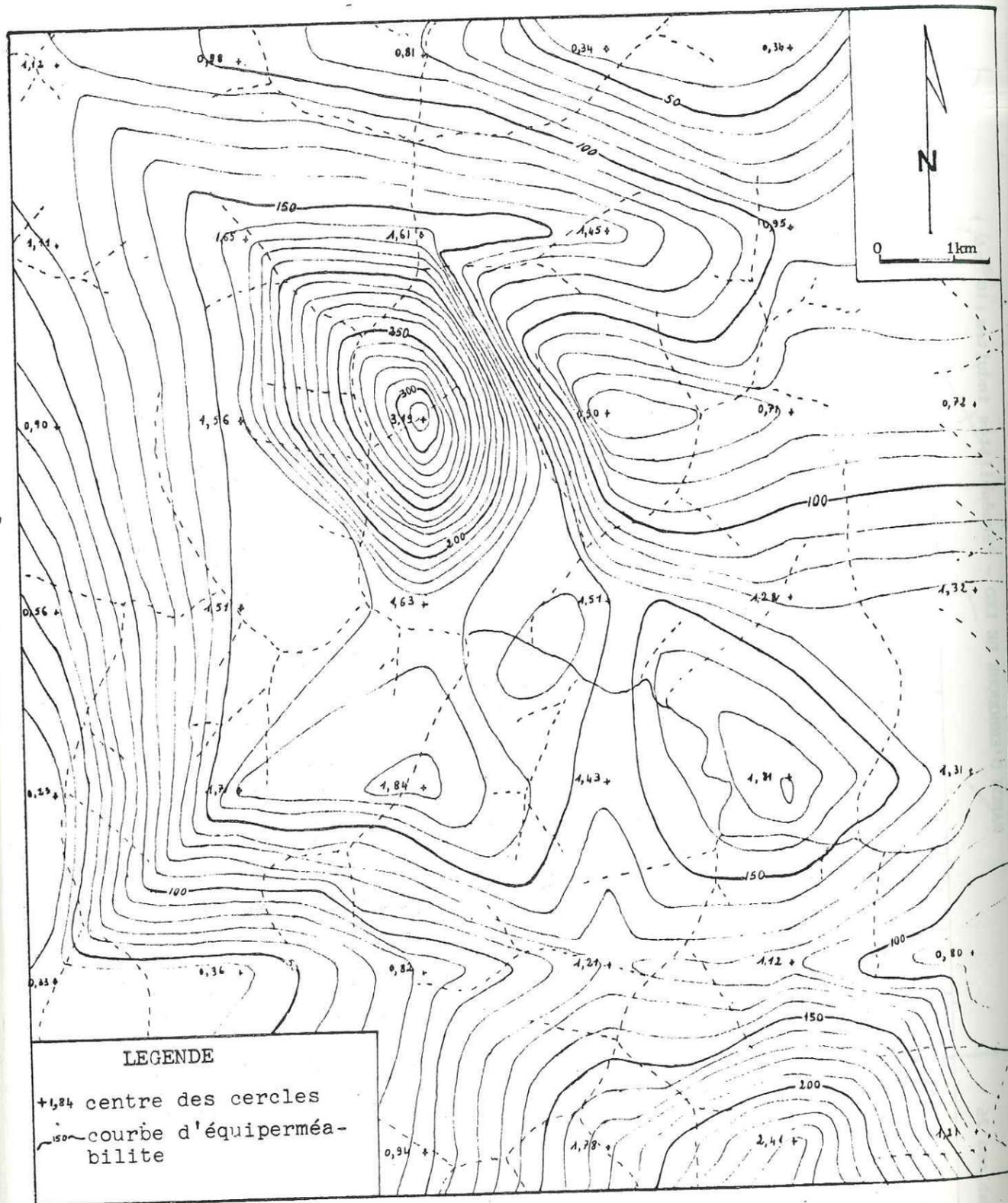


Figure 39

On peut donc dire que l'approche des perméabilités induites par la méthode FRANCIS aboutit aux mêmes résultats quel que soit le type d'image dont on tire les linéaments. Ces résultats corroborent aussi le fait que les linéaments vus sur images satellites sont les mêmes que ceux repérables sur les photos-aériennes.

Tout se passe, lorsque nous considérons les axes de perméabilités maximales et les branches du réseau hydrographique, comme s'il y avait une relation alimentation-drainage entre la rivière et la nappe d'eau souterraine des altérites. Or, comme nous l'avons déjà noté en 1975, la rivière est souvent perchée par rapport à sa nappe et son lit mineur colmaté par des argiles imperméables qui autorisent par leur présence l'existence le long des cours d'eau d'un chapelet de mares temporaires ou pérennes suivant leur importance.

On pourrait alors penser à l'existence d'un inferoflux. Même s'il en existe un, ce dernier n'est pas continu et susceptible de présenter un écoulement souterrain permanent dans le même sens que le ruissellement. C'est ce que laisse voir la distribution irrégulière des perméabilités le long des axes. Toutefois, on peut dire que les bas-fonds (lit mineur excepté) constituent des zones d'infiltration et de circulation préférentielles d'où les eaux rejoignent la nappe souterraine, puis par débordement remplissent les poches liées aux fractures et situées au niveau des interfluves. Cette hypothèse de l'existence, au moment des apports de réalimentation d'un front hydraulique partant des bas-fonds (qui correspondent souvent à des inversions de relief), est conforme avec l'allure des courbes de fluctuation des nappes (la remontée est presque instantanée aux abords des bas-fonds, alors qu'elle ne se produit qu'en fin Août pour les poches des interfluves) mais aussi avec la chimie des eaux (minéralisations et teneurs isotopiques) que nous aborderons plus loin. Elle est donc aussi conforme avec le schéma que nous avons donné de la circulation des eaux souterraines dans les formations du socle.

2.2.5.2.6. Perméabilités induites et échelle de levé de linéaments

La deuxième remarque que nous pouvons faire sur les résultats obtenus est que lorsque nous traitons les linéaments à des échelles différentes, comme nous l'avons fait (au 1/200000 et au 1/50000), les valeurs des perméabilités induites obtenues dans le même secteur croissent dans le même sens que l'échelle. Ce qui n'est que la traduction du fait qu'au 1/50000 par exemple, nous intégrons dans les cercles considérés un nombre et une longueur plus élevés de fractures qu'au 1/200000. Donc plus l'échelle permet d'intégrer des fractures repérées et plus les perméabilités induites trouvées se rapprocheront des perméabilités réelles.

2.2.5.2.7. Portée de l'effet d'induction des fractures

Les perméabilités obtenues à partir de l'application de la méthode FRANCIS sont faibles dans notre cas quelle que soit d'ailleurs l'échelle de travail choisie. On trouve en moyenne 10^{-8} m/s.

Or, parmi les coefficients que nous avons adoptés, K est une valeur expérimentale moyenne tirée de nombreux essais de pompage; la valeur 10^{-3} pour C , même si elle paraît faible, n'est cependant pas sous-estimée par rapport aux données empiriques.

Nous pensons que la faiblesse des perméabilités induites tient à un phénomène important dans les aquifères du socle cristallin de Haute-Volta: la rareté de co-existence entre fonction capacitive et fonction conductrice dans des formations ou dans des niveaux de grande épaisseur (ENGALENC, 1980).

Dans les aquifères formés de roches sédimentaires non ou partiellement cohérentes (alluvions, grès, conglomérats), la porosité totale se double d'une porosité utile élevée, qu'elle soit d'instertices ou de fissures. Les pores contenant l'eau ont des dimensions et une intercommunication telles qu'elles permettent une bonne circulation de celle-ci. Les fonctions capacitive et conductrice sont donc conjuguées. Dans les poches d'eau du socle cristallin, on a généralement une grande épaisseur d'argile latéritique et d'arène fluente qui ont une porosité totale voisine de 40 %, alors que leur porosité utile n'est que de 5 % (LE LONG, 1966). Ces formations qui ont une faible perméabilité (10^{-7} à 10^{-6} m/s) n'ont guère qu'une fonction capacitive parcequ'elles sont gorgées d'une eau, mais celle-ci ne se libère qu'en partie et très difficilement. Par contre, les arènes grenues et la roche fissurée constituent une couche qui, bien que d'épaisseur réduite (5 à 10 mètres) présente une conductivité hydraulique élevée par rapport à sa porosité totale qui est relativement faible. Elle a une fonction essentiellement conductrice. Elle assure dans un espace réduit le drainage des couches encaissantes.

Pour le cas de notre étude on pourrait interpréter la faiblesse des valeurs de perméabilités induites obtenues comme étant la traduction du fait que le passage d'une mégafracture n'induit pas une perméabilité élevée en dehors de sa zone de broyage. La fracture draine les formations environnantes qui s'essorent dans la zone broyée avec des vitesses liées à leur perméabilités propres.

Cet état de fait explique bien les grandes variations constatées dans la productivité des ouvrages en fonction de leur implantation. Il nécessitera par voie de conséquence une adaptation des méthodes de recherche d'eau souterraine aux conditions propres aux systèmes cristallins de nos climats.

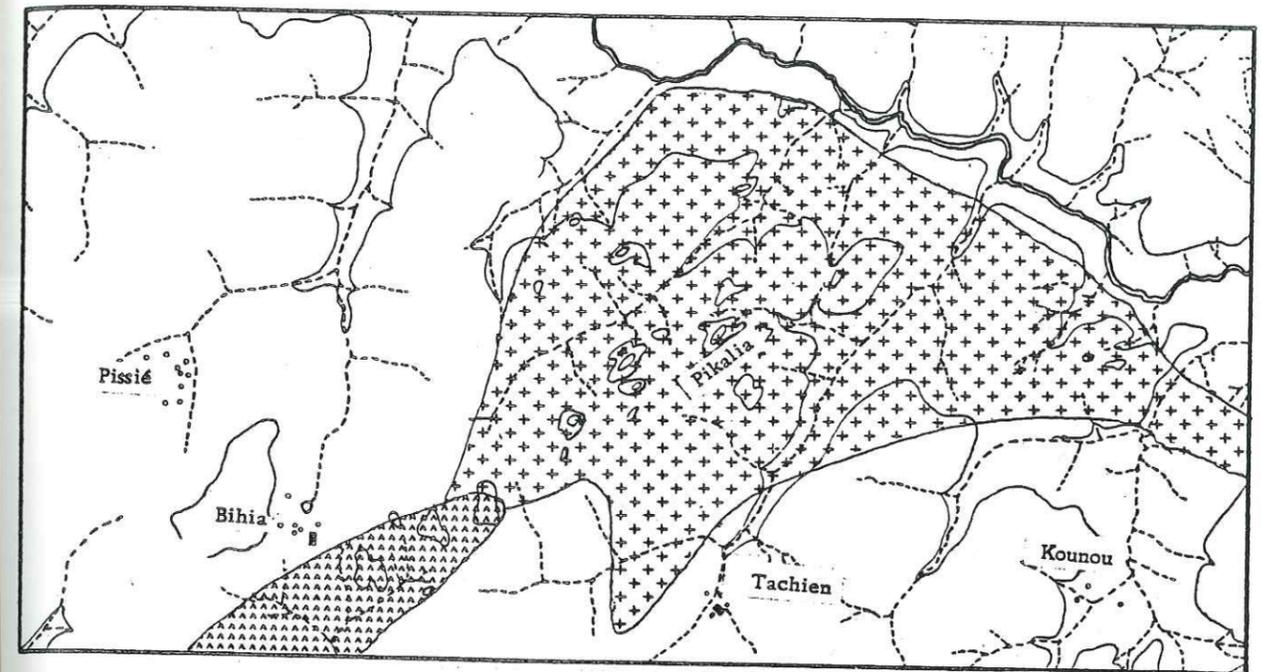
2.2.5.2.8. Relation entre les variations spatiales des perméabilités induites et la composition pétrographique

La carte des perméabilités induites présente deux types de plages: des noyaux de faibles perméabilités et des zones conductrices. Les premiers que l'on retrouve autour de Bonapio, Niansou, Thiou, Léo-Mouna, Boala (Nord-Est), Taré, Sia-Sala, Vrassan correspondent pour la plupart aux zones occupées par les deux types de granites intrusifs que nous avons décrits. Les plages conductrices se localisent dans les secteurs de migmatites et de roches vertes.

Il apparaît donc que ce sont les zones de granites intrusifs et de granites homogénéisés de type Sapouy qui sont les moins fissurées des formations du bassin versant de la Sissili. Ce phénomène s'expliquerait non pas par une mise en place tardive postérieure aux grandes contraintes ayant affecté les migmatites et les roches vertes, mais par une résistance plus grande de ces formations aux contraintes ayant ébranlé les migmatites et les roches basiques.

2.2.5.3. Géologie et densité du réseau hydrographique

Les études hydrogéologiques du bassin versant de la Haute Sissili (SAVADOGO, 1975) avaient montré que la densité du réseau hydrographique du bassin versant était moins élevée dans le Nord que dans ses parties sud et est. Le levé géologique détaillé de l'ensemble du bassin versant de la Sissili nous a permis de voir que la densité du réseau dépend directement de la nature du bedrock (fig 41 et 42).

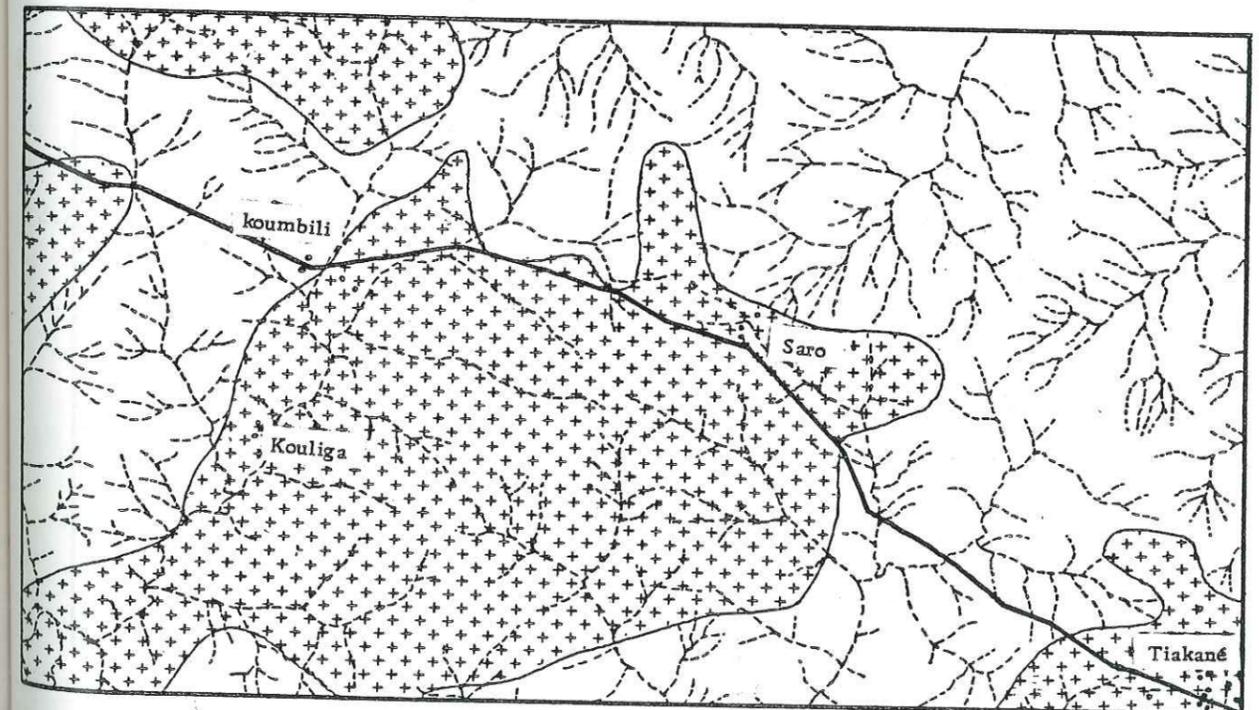


Amphibolites

Granite rose de Pikalia

Migmatites

Echelle : 1/200000



Migmatites et granites

Amphibolites et schistes

Echelle: 1/200000

41 : EXTRAITS DE LA CARTE GEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA SISSILI MONTRANT LES VARIATIONS DE DENSITE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE EN FONCTION DES FACIES PETROGRAPHIQUES

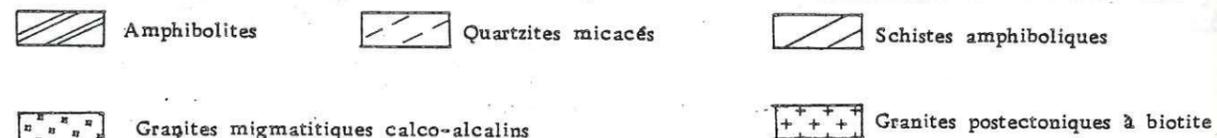
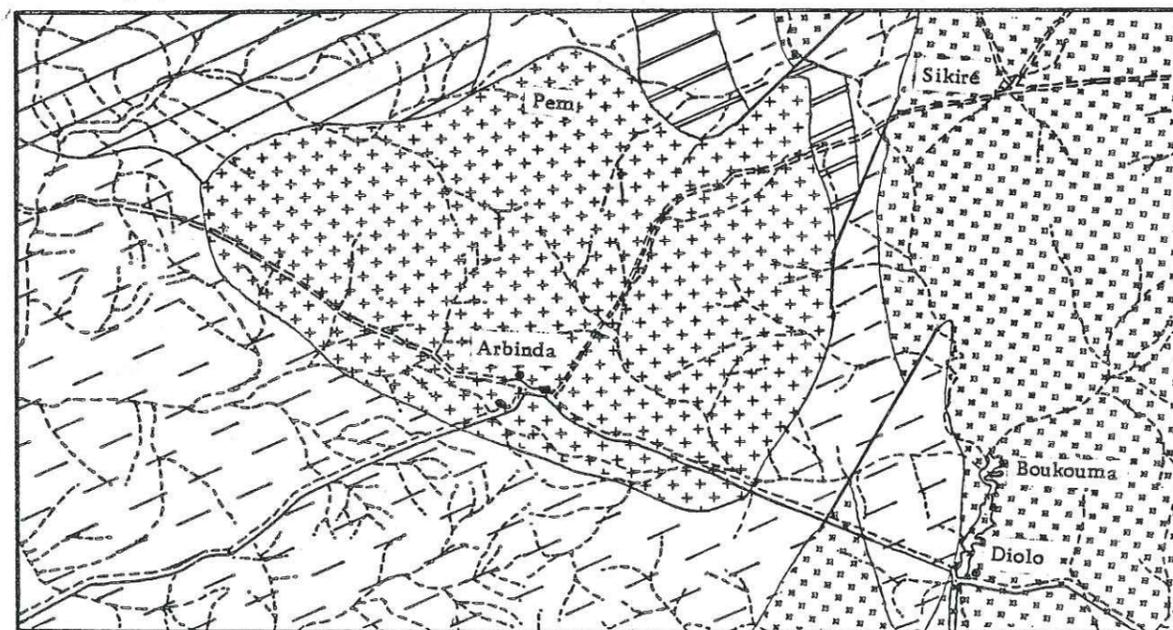
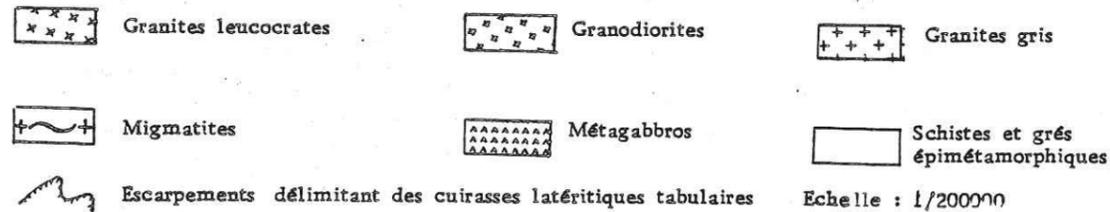
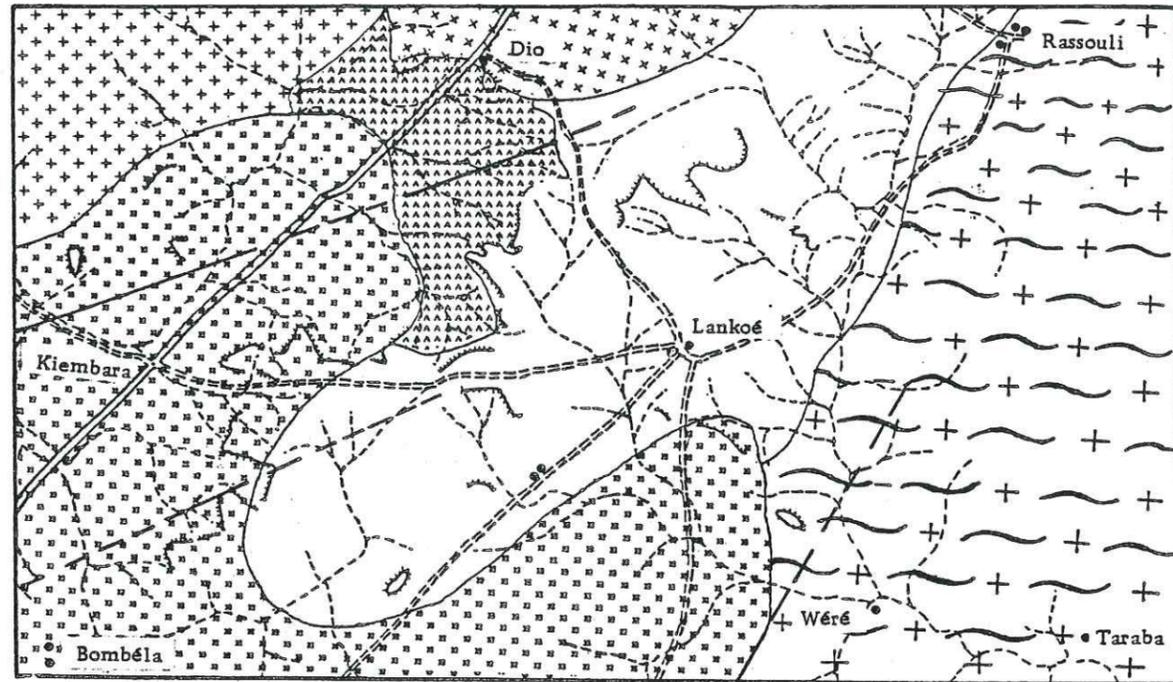


FIG. 42 :

Echelle : 1/200000

VARIATION DE LA DENSITE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE AVEC LES FACIES PETROGRAPHIQUES

(Extraits de la carte géologique de Ouahigouya et de Dori d'après E.P. Gamsonré et J. Ducellier)

En effet lorsque nous parcourons le bassin du Nord vers le Sud, on remarque une fréquence de plus en plus grande des affleurements rocheux. Ce phénomène est lié à l'érosion régressive de la rivière. C'est aussi dans la partie sud et sud-est que l'on peut noter que la densité du réseau est beaucoup plus élevée sur les formations basiques que sur les granites et les migmatites.

Nous y avons vu la conséquence d'une différence de perméabilité entre les altérites argileuses des roches basiques et les arènes granitiques beaucoup plus propices à l'infiltration des eaux de pluie.

Quelques observations faites dans différentes régions du socle cristallin (tab 27) viennent appuyer cette thèse et permettent d'avoir une hiérachisation dans les conductivités hydrauliques des différentes formations de recouvrement du substratum qui s'établit comme suit: cuirasse latéritique, arène granitique et altérites des roches vertes. Cette remarque doit être prise en compte lors de levés géologiques car dans nos régions où les affleurements sont rares, la densité du chevelu hydrographique pourrait aider à cerner avec plus de précision les contours des formations géologiques, notamment celles des formations basiques des sillons éburnéens. Un des traits marquants du relief des régions cristallines de Haute-Volta est l'individualisation des sillons éburnéens sous forme de collines isolées ou de chaînes plus ou moins interrompues émergeant des encaissements constitués de migmatites et de granites. Cet aspect du relief amenait tout naturellement à penser que la densité élevée du réseau hydrographique constatée au niveau des sillons est imputable à la seule orographie. Or les extraits de la carte géologique de l'Est du bassin versant de la Sissili que nous donnons indiquent bien que le réseau hydrographique est bien lâche autour des chaînes de collines de granites roses de Pikalia qui constituent cependant la zone du bassin où le relief est le plus ardu (C'est dans cette chaîne que se situe le plus haut sommet du bassin qui est Pichikalia avec 439 mètres d'altitude). Le réseau hydrographique est nettement plus dense entre Saro-Guiaro et Koumbili où nous avons décrit des amphibolites. La densité du réseau hydrographique varie donc avec la nature pétrographique du substratum et plus précisément avec la nature et la perméabilité des altérites de recouvrement qui en dérivent.

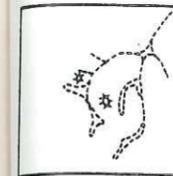
2.2.5.4. Comparaison avec des résultats obtenus dans les régions voisines

BOURGUET L. et al. (1981) ont trouvé, entre autres renseignements tirés de nombreux forages réalisés dans les régions cotonnières de la Côte d'Ivoire, que l'altération et la fissuration conditionnaient le modelé hydrographique. Ils se sont appuyés sur ce dernier pour tirer des relations entre épaisseur d'altération et géométrie du réseau hydrographique. Les résultats, en ce sens qu'ils font ressortir des relations altération, fissuration et réseau hydrographique, corroborent ce que nous avons dit des relations entre perméabilités induites et réseau hydrographique; densité hydrographique - nature et perméabilité des altérites. Toutefois, il est à noter qu'en dehors de la relation densité et nature du substratum l'examen des résultats fournis par les forages et les puits dans l'ensemble du socle cristallin de la Haute-Volta ne permet pas encore de dégager une relation épaisseur d'altération et géométrie du réseau hydrographique. La figure ci-jointe de Bourguet montre que si l'on peut parler de géométrie dans les différents cas présentés, un des aspects les plus frappants de ces réseaux hydrographiques est aussi la variation de la densité remarquable d'un faciès pétrographique à l'autre. L'auteur n'écrit-il pas lui-même à propos des zones à réseau de type 4, et qui est avec le type 6 le plus dense: "Malgré une épaisseur altérée satisfaisante (20 à 25 mètres comme en réseau 1), c'est ici la qualité très argileuse des altérations de gneiss qui est responsable de la plupart des échecs en sondage CALWELD (47 %)" (fig. 43).

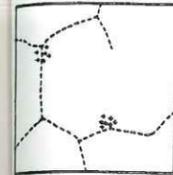
Perméabilités et transmissivités rencontrées dans les diverses régions cristallines de l'Afrique de l'Ouest.

Quelques exemples de perméabilités et de transmissivités rencontrées en Afrique de l'Ouest

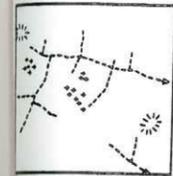
PAYS	REFERENCES	PERMEABILITES en m/s
Haute-Volta (Ranch Léo)	HER Géohydraulique 1975	3×10^{-6} à $1,3 \times 10^{-5}$
Bénin	Kawuti - 1968	10^{-7} à 10^{-5}
Haute-Volta & Côte d'Ivoire	Burgeap - 1976	10^{-7} à $1,5 \times 10^{-5}$ (moy. $4 \cdot 10^{-6}$)
Côte d'Ivoire	Burgeap - 1972	2×10^{-6} à 3×10^{-5}
Haute-Volta Boughriba	AVV-PNUD - 1976	$4,6 \times 10^{-7}$ à $1,5 \times 10^{-5}$
Transmissivité		
Bénin	Kawuti - 1968	$T = 10^{-6}$ à $5,75 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Haute-Volta (Ranch Léo)	HER - Géohydraulique-1975	$T = 3 \times 10^{-5}$ à $1,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Côte d'Ivoire	Forkasiewicz-1968 Margat -1968	$T = 3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Togo	Italconsult-1967	$T = 3 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$



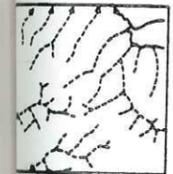
RESEAU TYPE 1
Réseau hydrographique d'allure courbe ou arrondie ("choux fleur") délimitant des interfluvies larges, arrondis ou allongés.
Thalweg à fond plat, nombreuses zones inondables.
— d'après carte topographique 1/200 000 de Boundiali.



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° UNDP 45/192.1/50 000.

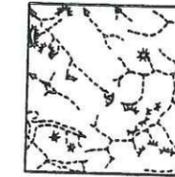


RESEAU TYPE 3
Réseau rectiligne à 2 directions orthogonales ou obliques, avec petits affluents courts.
Inselbergs à parois verticales.
— calqué sur photo aérienne n° 72 CIV 026/500/039.1/50 000.

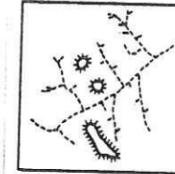


RESEAU TYPE 4 : ZONE GEOLOGIQUE DU BOUCLIER LIBERIEN
Le bouclier libérien formé essentiellement de roches gneissiques, comprend également des granites, des granito-gneiss et des roches vertes.
Le réseau hydrographique de cette zone est très varié, le plus souvent à tendance polygonale, il est parfois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

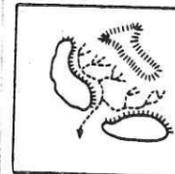
RESEAU TYPE 5 : ZONE FORESTIERE
La couverture forestière ne permet pas de percevoir sur photos l'allure du réseau hydrographique.



RESEAU TYPE 6 : ZONE INDETERMINEE SCHISTES GRANITE
Réseau mixte d'allure parallèle ou courbe avec présence de quelques zones inondables et de lambeaux de cuirasse sur l'interfluve.
— 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 épaisseur d'altération, soit une fracturation moins importante.
— d'après cartes topographiques 1/200 000.



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

Réseaux en zone birrimienne

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

Figure 43

Réseaux en zone granito-gneissique

2.2.6. COMPORTEMENT HYDROGÉOLOGIQUE DES DIVERSES FORMATIONS DU BASSIN VERSANT DE LA SISSILI

Les récentes données que nous avons sur la pétrographie et la fracturation viennent mieux éclairer l'hydrogéologie du bassin versant de la Sissili, dès lors que nous la comparons à celle des autres régions du socle cristallin de Haute Volta.

2.2.6.1. Pétrographie, fracturation et productivité hydraulique

La cartographie "détaillée" (au 1/200 000) du bassin versant de la Sissili nous a permis de distinguer parmi les formations géologiques qui en constituent le bed-rock: des migmatites gneissiques, des granites migmatitiques hétérogènes, des migmatites porphyroïdes, des granites grossiers et de type Sapouy Ouest, des granites gris de type Mouna, des granites roses de type Pikalia, des amphibolites diverses, des granodiorites et enfin des filons de quartz et d'aplite.

Le traitement général des mégafractures par la méthode FRANCISS nous a permis de cerner l'organisation générale des perméabilités induites et de voir qu'il existait une relation étroite entre dessin du réseau hydrographique et les axes de perméabilités induites maximales.

Les ouvrages de captages d'eau existant montrent des différences de productivité énormes pouvant aller du simple au décuple dans des zones proches ou éloignées mais d'égale perméabilité induite. Il apparaît donc qu'il existe en marge de la fracturation en grand des facteurs locaux dont nous avons pensé que la pétrographie mais aussi la fracturation à petite échelle étaient ceux qui influaient le plus sur la productivité des forages.

2.2.6.1.1. Les faciès pétrographiques du bassin versant de la Sissili et leur état de fissuration en petit: Du point de vue de leur état de fissuration à l'affleurement, les formations géologiques du bassin versant de la Sissili peuvent se regrouper en quatre grandes catégories qui sont:

- les migmatites gneissiques et les granites migmatitiques hétérogènes;
- les granites migmatitiques porphyroïdes;
- les granites de type Sapouy Ouest, les granites roses et les granites gris;
- les roches basiques et les filons de quartz et de pegmatites.

-Les migmatites gneissiques et les granites migmatitiques hétérogènes
Ce n'est que très rarement que leurs affleurements constituent des dômes importants semblables à ceux du Sud de Nébou. Ils sont souvent de dimensions réduites et sont recouverts non pas de boules, mais d'un fatras de blocs angulaires de tailles variables. La roche présente souvent un débit planaire, et elle est parcourue par de nombreux filonnets de pegmatite qui viennent accentuer l'hétérogénéité granulaire existant déjà entre les minéraux ferromagnésiens fins et les minéraux blancs, plutôt grossiers. Les veines surmicacées et amphiboliques microplissées sont fréquentes dans les faciès métamorphiquement moins évolués, c'est-à-dire les gneiss. C'est dans ces formations que le phénomène de décompression agit le plus. En effet:

A l'approche de la surface topographique et à mesure que l'érosion agit, se produit en l'absence de toute autre contrainte tectonique, une variation de l'état des contraintes due à la diminution de la composante verticale de la pression lithostatique. Ce phénomène étudié principalement dans les roches cristallophyliennes (GILBERT C.K., 1904, BAIN G.W., 1971, BEROT P., 1962, HILLS 1966, PRICE N.I., 1966, AVIAS J., 1967, BORDET C., 1971) peut intervenir jusqu'à des profondeurs dépassant 300 mètres.

Il provoque dans les séries métamorphiques des fractures souvent parallèles à la surface topographique. C'est le "scheeting" de HILLS E.S. (1966) ou foisonnement, fracturation ouverte de surface guidée à la fois par des fractures préexistantes et probablement par des plans de moindre résistance d'origine tectonique.

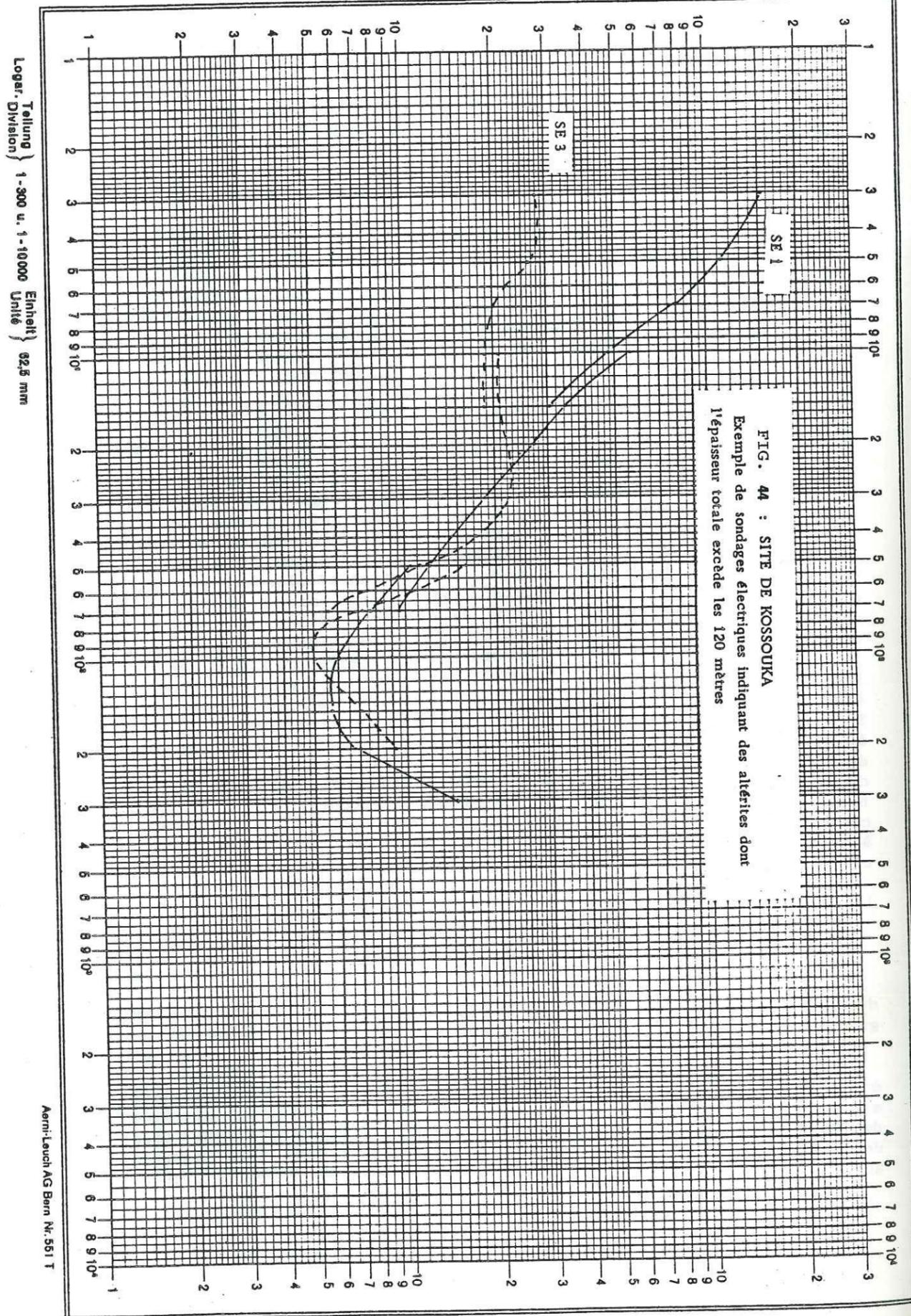
Nous sommes presque partout, dans les régions du socle cristallin de Haute-Volta, dans un domaine arasé et pénéplané par l'érosion ou les ouvertures par décompression latérale sont atténuées par rapport à la composante verticale de ce phénomène actif entre 30 et 40m en moyenne.

Certains auteurs, dont ENGALENC M. (1979), estiment que, dans nos régions cristallines, la recherche d'eau au-delà de 120 mètres de profondeur devient aléatoire. En Haute-Volta, les ateliers de forages existants ne nous ont pas permis d'atteindre des profondeurs supérieures à 100 mètres dans les formations cristallines. Notons cependant qu'à Fada N'Gourma, dans la mégafracture affectant les migmatites et située au Sud-Ouest de la ville (secteur de l'Hopital, de la résidence du Préfet et de l'O.R.D.) on est descendu jusqu'à 95 mètres de profondeur, tout en restant dans la roche fissurée tendre. Ce forage, arrêté avant d'avoir atteint le bed-rock sain, se trouve être le moins productif de tous ceux que nous avons implantés dans cette zone. Les grandes profondeurs ne garantissent pas une grande productivité des ouvrages. En effet, débit et profondeur ne sont pas linéairement corrélés. Par contre, certains sondages électriques réalisés sur les formations cristallines (ex.: celui de Kossouka) montrent qu'on peut facilement descendre à plus de 120 mètres avant de toucher le substratum sain. L'opération si elle est réalisable ne garantit pas une meilleure productivité; aussi est-il nécessaire de poser avant de réaliser des forages de cette profondeur, le problème du coût de revient du mètre cube exploitable. C'est peut-être de ce point de vue qu'on pourrait mettre en cause les forages très profonds dans les formations cristallines; autrement, même si nous ne pouvons comparer les données recueillies dans nos régions à celles des Alpes où des venues d'eau sont observées à plus de mille mètres de profondeur (tunnel de Trient, D. JAMIER 1975), on constate que l'on rencontre des venues d'eau à plus de 300 mètres de profondeur dans les galeries des mines situées dans les conglomérats aurifères et métamorphiques Tarkwaïen du Ghana que nous avons visitées en 1981. La profondeur à laquelle il y a fermeture totale des fractures, n'est pas connue avec précision, mais elle est certainement supérieure à 120 mètres. On doit cependant avoir toujours à l'esprit que nous sommes dans les parties basales des reliefs anciens; c'est ce qui sans doute explique que les importants débits rencontrés dans des formations identiques de chaînes jeunes comme les Alpes (200 l/s en galerie) ne soient jamais effleurés dans nos régions.

Les granites de type Sapouy Ouest, les granites roses et les granites gris

Le premier type affleure en dômes massifs peu fissurés aux abords desquels de gros blocs anguleux assurent un passage progressif aux granites migmatitiques.

Les granites gris et les granites roses présentent une altération en boules typiques. Ces boules de taille variée, mais souvent métrique, atteignent des diamètres supérieurs à 3 mètres dans les granites roses de Pichikalia. Parfois les dômes de ces granites peuvent être dégarnis de leurs boules pour laisser émerger un massif très peu fissuré, presque aussi compact que celui des granites de type Sapouy.



Dans ces divers types de granite la fissuration en petit qui est de règle dans les migmatites tend à disparaître. Il apparaît que l'homogénéité granitique, qu'elle soit congénétique ou qu'elle résulte de processus anatectiques au sein des migmatites, est un facteur défavorable au développement de la fissuration en petit.

Les granites migmatitiques porphyroïdes

Ils se situent entre les granites migmatitiques hétérogènes et les granites de type Sapouy Ouest. Les fissures en petit se raréfient, mais le massif se débite en énormes boules qui peuvent côtoyer des dômes de petites dimensions (décamétriques à pluridécamétriques).

Les roches basiques, les filons de quartz et de pegmatite

Ils se présentent lorsqu'ils affleurent en massifs très fissurés, très diaclasés. L'état de déchiquetage de ces formations peut-être tel qu'il devient difficile d'identifier avec certitude les directions des principaux joints et diaclases. Un bel exemple de ce type d'affleurement déchiqueté est offert par les amphibolites de Bihia Est. Les boules peuvent constituer aussi le mode d'altération de ces roches basiques, mais alors celles-ci sont de taille bien plus petite que celles observables dans les granites.

Productibilité hydraulique en fonction de la fissuration en petit accompagnant, au niveau des massifs, les mégafractures

L'état de fracturation des roches basiques qui, comme nous l'avons vu, sont les avant-dernières à se mettre en place dans le bassin versant de la Sissili, montre que la fissuration des formations n'est point tellement liée à leur âge relatif. Elle a dépendu surtout des aptitudes de chacune d'elles à se casser en réponse aux sollicitations tectoniques qui ont affecté le bassin versant de la Sissili. La densité de fracturation à l'affleurement permet de dégager la hiérarchie suivante entre les roches du bassin versant de la Sissili:

- 1°/ roches basiques et filons de quartz et de pegmatites;
- 2°/ migmatites gneissiques et granites migmatiques;
- 3°/ migmatites ocellées ou porphyroïdes;
- 4°/ enfin, les granites intrusifs divers.

Venons-en à la productivité des ouvrages implantés dans ces différentes formations. Le bassin versant de la Sissili qui est sous-peuplé est aussi sous-équipé en forages d'eau. On en dénombre seulement une vingtaine, dont sept pour la seule ville de Pô, trois pour celle de Léo et six dans la zone du ranch de Léo. La répartition de ces ouvrages est telle qu'elle ne touche pas toutes les catégories de formations que nous avons décrites plus haut.

Les données sur la productivité des diverses formations nous seront fournies par les résultats des diverses campagnes d'équipement en points d'eau auxquelles nous avons pris part.

Les résultats des forages réalisés depuis 1974 (date à partir de laquelle l'introduction des ateliers équipés de marteau-fond-de-trou a permis de descendre aisément dans la roche fissurée, voire dans la roche saine) montrent que les plus forts débits ont été atteints plus fréquemment dans les migmatites et dans les roches vertes (amphibolites, dolérites et roches volcano-sédimentaires des sillons éburnéens). Par contre, les débits supérieurs à 5 m³/heure dans les massifs intrusifs homogènes sont très rares. Les faibles débits rencontrés à Léo, à Koupéla, Arbinda, Kiembara, Kossouka sont des exemples qui montrent l'improductivité de ces formations dans lesquelles la recherche des filons de quartz

et de pegmatites (c'est le cas des forages les plus productifs de Koupela-Hopital et adduction d'eau) devient impérative.

Nous pouvons donc dire eu égard à ces résultats qu'il faudrait reconsidérer l'opposition qu'on a souvent faite entre roches granitoïdes d'une part et roches vertes et schistes d'autre part.

Le problème très important qu'il faut noter au niveau des roches vertes et des schistes est celui de l'alimentation de leur frange fissurée. En effet, ces roches donnent, en s'altérant des argiles très peu perméables, sinon imperméables. Nous avons déjà noté que cela se traduisait dans les zones où s'étendent ces formations par une élévation considérable de la densité du réseau hydrographique. Les altérites argileuses peuvent également venir colmater partiellement ou entièrement la frange fissurée du substratum. Ce phénomène expliquerait les débits généralement moins élevés atteints dans ces formations que dans les migmatites dont la couche fissurée bénéficie de l'effet de gravillon de filtrage produit par la présence des arènes grenues.

Contrairement à BERNARDI A. et MOUTON J. (1980) qui opposent roches cristallophylliennes et granitogneiss en écrivant: " Dans les roches cristallophylliennes la fracturation du rocher accompagne les dislocations tectoniques qui peuvent avoir plusieurs kilomètres de longueur. Ces fractures ont souvent conditionné le réseau hydrographique qui reflète en partie sa distribution. Elles constituent d'excellents drains pour la circulation d'eau souterraine. Dans les roches granito-gneissiques, la liaison avec les accidents tectoniques est moins nette" - nous pensons qu'il n'y a pas opposition entre les deux types de formations cela d'autant plus que les granito-gneiss ne sont rien d'autres que des roches cristallophylliennes de la catazone. Il faut plutôt à l'intérieur de ces granito-gneiss faire des différenciations en fonction de l'élévation du degré de métamorphisme dont la tendance évolutive se ramène à une homogénéisation des roches qui se traduira par une résistance plus grande aux contraintes et une raréfaction des diaclases, surtout celles planaires. La nature pétrographique n'est pas tellement en cause. Elle ne joue qu'au niveau de la distinction roches acides - roches basiques. Ces dernières ayant un mode de fissuration dense différente de celui des premières.

2.2.6.1.2. Conclusions

La rareté des affleurements semble avoir joué en faveur d'un désintérêt des hydrogéologues aux investigations directes sur le terrain en Afrique de l'Ouest. Or ce que nous venons de dire montre l'importance que revêt cette approche surtout dans les domaines libériens, où l'hétérogénéité et les variations fréquentes de faciès sont de règle. Elle est également la seule à permettre de proposer pour les sites à l'étude une genèse possible des fractures et donc de connaître celles d'entre elles qui sont les plus ouvertes.

Le repérage des mégafractures sur images aériennes est important, mais ces fractures ne peuvent présenter une grande productivité que lorsqu'elles sont accompagnées d'une microfissuration intense. Celle-ci est liée au faciès pétrographique. Importante dans les schistes, les roches basiques, les gneiss migmatitiques, elle voit son intensité s'atténuer considérablement avec l'homogénéisation granitique.

Localité	Profondeur		Débit en m ³ /h	Après étude géophysique		Nature du substratum
	PT	NH		Oui	Non	
				+	-	
Wendou	45,0	7,88	4,5	+		Migmatites
Boulaye	40,04	9,50	5,1		-	Migmatites
Tiblini	35,56	4,77	4,6		-	Quartzites
Gangaoal	30,65	7,09	6,1		-	Métasédiments basiques
Babirka	38,8	6,4	6,0			Schistes amphiboliques
Diatou	32,7	4,80	3,2			Gabbros
OPT Fada	47,00	21,89	6	+		Migmatites
Tyekamyebi	30,10	6,66	5,1		-	Migmatites
Pâte d'Oie F1	54,10	10	3,40	+		Migmatites
Pâte d'Oie F2	38,12	10	3,0	+		Migmatites
Pâte d'Oie F3	42,30	10,68	3,3	+		Migmatites
Saint-Camille	49,50	13,47	8		-	Migmatites
Tenkodogo	54,50	0,90	6	+		Migmatites
Koupela II	54,10	4,00	7,6	+		Filon quartz
Boromo	75,50	4,33	9	+		Migmatites
Gaoua I	28,18	7,10	15	+		Métasédiments basiques
Gaoua II	50,70	7,0	8	+		" "
PO SE ₂	40,00	13,74	8	+		Migmatites
PO SE ₃	30,00	11,67	15	+		Migmatites

Tableau 27 - FREQUENCE DES DEBITS ELEVES RENCONTRES DANS LES DIFFERENTES FORMATIONS CRISTALLINES DE HAUTE - VOLTA

Le problème le plus important à résoudre est celui de l'alimentation des fractures. Il ne peut également s'apprécier qu'à partir des études des documents photo-aériens, suivies encore une fois d'une investigation directe sur la géomorphologie des sites. L'expérience de ces dix dernières années montre qu'il existe en effet des zones fissurées profondes, mais sèches.

L'hydrogéologie du bassin versant de la Sissili ne constitue qu'un cas particulier de l'hydrogéologie de l'ensemble des formations cristallines de Haute-Volta.

Contrairement à la partie nord du plateau mossi, ici il n'existe pas de nappe de cuirasse noyée. Les nappes d'alluvions sont également rares. Les nappes exploitables se trouvent au niveau des arènes et de la roche fissurée.

L'alimentation en eau du ranch de Léo en projet ayant été la raison qui nous a amené à nous intéresser à l'hydrogéologie du bassin versant de la Sissili, nous concluons cette étude en proposant une nouvelle investigation avec prise en compte des caractéristiques pétrographiques des formations en présence. On implantera alors les plate-formes soit sur les migmatites gneissiques hétérogènes, soit sur les roches vertes, dans les zones de filons de quartz et de pegmatites, en cherchant à les situer aux intersections des mégafractures qui affectent ces formations.

Quelques sites d'aménagement de retenue d'eau de surface avaient été indiqués en 1975 pour servir de solution de rechange au cas où les plate-formes seraient imposées et se situeraient sur des formations peu productives. A ces sites, notre étude récente permet d'ajouter, pour l'ensemble du Bassin versant de la Sissili, ceux de : Tékourou, Bonapio, Panassin, Boutiourou, Vrassani, Soubaré, Kiao, Kounou, Daworo, Nétiana.

L'analyse du relief permet de voir que pour un aménagement de type hydro-agricole, un site de barrage pourrait être étudié sur la Sissili elle-même au niveau de Kounou à 5 km en amont de la confluence avec l'affluent Dawélé. La planéité du relief fait qu'une digue à cet endroit serait longue d'au moins 6 km, mais elle donnerait un lac long de 40 km environ.

2.2.7. ETUDE GEOCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES EAUX

2.2.7.1. INTRODUCTION

Plusieurs géologues dont notamment PALAUSSI (1952), DEFOSSEZ (1952), DUCELLIER (1953) et REICHEL (1958) se sont intéressés à la chimie des eaux souterraines en Haute-Volta avant l'essor que devaient connaître les études hydrogéologiques qui firent suite aux années de sécheresse depuis 1973. La Direction de l'Hydraulique et de l'Équipement rural (H.E.R.) dispose donc de ce fait d'un nombre important d'analyses chimiques d'eaux relatives à des points d'eaux traditionnels (puits traditionnels et puisards). Cependant on est encore bien loin de pouvoir associer à tout point d'eau créé une analyse chimique, bien que la découverte récente d'arsenic, responsable de maladies dans un des périmètres de l'Aménagement des vallées des Volta (A.V.V.) eût pu pousser les responsables de l'équipement en points d'eau vers un tel effort. Néanmoins, l'H.E.R. dispose d'un laboratoire de chimie des eaux fonctionnel depuis 1977.

Les anciennes analyses d'eau (antérieures à 1960) furent réalisées grâce à des troussees portatives. Elles sont malheureusement incomplètes et le doute que nous avons sur leur précision nous a amené à ne pas les prendre en compte dans les données que nous traitons.

Les nombreuses analyses réalisées au sein de l'H.E.R. sont également incomplètes. En effet, le sodium et le potassium ne sont pas dosés et l'on ne peut donc pas apprécier la balance ionique. Nous avons retenu 136 de ces analyses réalisées sur des eaux de sites dont nous connaissons le cadre géologique pour y avoir travaillé. Ces analyses nous serviront par leur nombre et par leur diversité à donner une idée sur les concentrations moyennes et leurs intervalles de variation. (Tab. 28).

La troisième série d'analyses dont nous disposons a été réalisée depuis 1975 au Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Institut Dolomieu à Grenoble et au Laboratoire de Géologie de l'Université de Niamey au Niger. Ces analyses qui portent sur les anions et les cations principaux ont été effectuées sur des eaux prélevées essentiellement dans le bassin versant de la Sissili, et dans la région de Dori et de l'Oudalan au Nord de la Haute-Volta. Quelques analyses ont également été réalisées sur des eaux des départements du Nord (Yatenga) et du Centre nord (Kaya), afin de vérifier les hypothèses avancées à propos de la minéralisation et du mode d'alimentation des nappes.

2.2.7.2. CARACTÉRISTIQUES MOYENNES DES EAUX DU SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE VOLTA

Nous les dégagerons de l'étude statistique des 136 analyses d'échantillons d'eaux de l'ensemble des régions cristallines.

Localité	PH	1/R	R	TH	TAC	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Fe ⁺⁺	NH ⁺ ₄	NO ⁻ ₂	NO ⁻ ₃	Cl ⁻	PO ³⁻ ₄	HCO ⁻ ₃
Pô A.E.G.C.	6,7	300	3250	2,25	2,70	0,95	1,3	0	0	0,021	2,80	0,32	tr.	2,7
Diabo-Monast.	6,7	120	8500	0,60	1,30	0,40	0,20	0,004	0	0,007	0,06	0,2	0,005	1,3
Kamboinse	5,9	140	7000	1,22	1,50	0,64	0,58	0	0	tr.	0	0,15	0	1,7
Thiou II	7,6	135	7500	1,58	1,35	0,59	0,55	0	tr.	tr.	0,003	0,2	tr.	1,35
Thiou	6,4	250	4000	2,60	2,56	2,2	0,4	0	tr.	0	0,47	0,7	tr.	1,0
Komtoega	6,4	330	3000	2,36	2,18	1,2	1,16	0	0	tr.	0,019	0,7	0	2,16
Bangagou 1	6,6	450	2300	3,06	4,70	1,34	1,72	0,005	0,001	0,01	0,1	0,60	0,004	4,7
Dori	8,3	460	2200	4,06	7,0	2,6	1,48	0	0,002	tr.	0,134	0,6	0	6,36
Bangagou 2	6,9	160	6000	1,10	1,74	0,22	0,89	tr.	0	0,000	0,086	0,5	tr.	1,73
Mankarga 1	7,1	300	33000	4,68	5,0	2,36	2,32	tr.	0,01	0	0	0,4	0,0036	5,0
Mankarga 2	8,4	280	36000	4,68	6,44	2,80	1,88	tr.	0,01	0,005	0,052	0,5	tr.	6,47
Mankarga 3	8,0	390	22700	4,36	4,10	1,90	2,46	0	0,068	0	0	0,5	tr.	4,1
Boromo	7,2	230	4500	3,24	1,64	1,36	1,88	0	0	0	0	0,5	0	1,64
Pô	7,1	160	9000	1,44	3,68	0,40	1,04	0	0	0	0,034	0,5	tr.	3,64
Djibo	7,0	606	1650	7,56	10,10	4,80	2,76	0	0,018	0	0,296	1,9	0,0045	10,1
Kalam Baogo	7,2	362	2762	3,96	5,6	0,73	3,23	0,007	0,142	0	0,026	1,45	0,003	5,6
Dawaoba	7,2	110	9000	0,84	0,84	0,36	0,48	0	0	0	0,024	0,4	tr.	0,84
Wawousse	7,3	160	6300	1,06	1,04	0,8	0,26	tr.	0,0012	tr.	1,23	1,6	tr.	1,04
Bazanwara	7,8	263	3802	2,2	2,88	1,12	1,08	0	0	0	0,024	0,6	0,009	2,56
Bonapio	7,4	220	4700	2,16	2,08	0,76	1,4	0	0,003	tr.	0,023	3,0	tr.	2,08
Tchiba	7,0	418	2392	5,76	6,42	2,22	3,54	0	tr.	0	0,332	1,9	0,005	6,42
Bissiri	6,4	212	4717	2,64	2,32	1,24	1,4	0	0,203	0,013	0,11	0,9	tr.	2,32
Namyini	6,6	117,3	5640	1,8	1,9	1,08	0,72	tr.	0,05	0,13	0,16	0,5	0,002	1,9
Kombissiri	6,8	220	4545	2,16	2,9	1,8	0,36	0,05	0,018	tr.	tr.	0,4	tr.	2,9
Bélégré	6,6	172	5814	1,8	1,22	1,08	0,72	0,003	0,012	tr.	0	0,5	0	1,21
Tingnoma	6,6	165	6060	1,84	1,98	0,98	0,86	0,002	0,017	0	0	0,4	0,012	1,95
Kilahoré	6,4	82	12195	0,86	0,94	0,40	0,46	0,012	0,005	0	0	0,4	0,005	0,94
Kankamogré	6,7	295,5	3384	3,24	4,06	1,82	1,42	0,007	0,006	0	0	0,5	0,003	4,05
Bitou	7,4	153	6536	1,08	1,8	0,54	0,54	0,017	0,04	0	0,002	0,7	tr.	1,8
Mengao	7,2	410	2420	2,52	3,4	0,34	2,18	0	0	tr.	0,276	1,0	tr.	3,4
Baraboulé	6,8	1400	730	18,0	6,54	11,16	6,84	0	0	0,027	0,005	5,60	tr.	6,64
Togomael	6,7	750	1350	7,92	5,62	3,08	4,84	0	0,020	0,0014	0,136	2,55	0	5,62
Tendogo	12,8	1650	700	12,6	15,9	9,8	2,8	0	0,08	0,0095	0,018	5,0	0,026	2,66
Pétégoli	6,9	265	3774	2,88	3,4	0,7	2,18	0	0	0	0,032	0,6	0	3,39
Pô	5,7	132	7576	1,08	1,6	0,55	0,53	0,018	0	0	0,0	0,3	0	1,6
Tiakané	7,2	128	7813	1,08	0,74	0,62	0,46	0,03	0,076	0,01	0,04	0,4	0	0,74
Walème	8,1	320	3125	3,6	4,84	1,04	2,56	0,0	0,069	0,0	tr.	0,3	0	4,52
Saro	7,3	192	5028	1,8	27,05	0,79	1,01	0,028	0,124	0,006	0,001	0,3	0	2,20

Tableau 28: Eaux des formations du socle cristallin de Haute-Volta

Tableau 28 (suite)

Localité	PH	1/R	R	TH	TAC	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Fe ⁺⁺	NH ⁺ ₄	NO ⁻ ₂	NO ⁻ ₃	Cl ⁻	PO ³⁻ ₄	HCO ⁻ ₃
Gabou	7,5	241	4149	2,76	2,68	0,54	1,62	0,009	0,05	0,0	0,15	1,5	0,005	2,68
Biédogo	6,9	132	6579	1,44	1,2	0,45	0,54	0,026	0,055	0,002	0,011	0,5	0,002	1,2
Goundri	6,8	124	8064	1,08	1,12	0,72	0,36	0,032	0,019	0,001	0,011	0,3	0,005	1,11
Lamzoudo	7,0	292	3425	3,98	4,28	2,88	1,08	0,003	0,000	0,002	0,006	0,4	0,003	4,27
Kalwiga	7,0	97	10309	1,44	1,6	0,72	0,72	0,0	0	0	0,001	1,5	0,005	1,6
Banga	7,3	400	2500	7,6	5,3	5,2	2,4	tr.	tr.	0,00	0,10	2,0	tr.	5,3
Gorgadji 1	7,2	800	1300	18,26	5,9	9,68	8,6	0	0	0,0015	0,012	2,35	tr.	5,9
Gorgadji 2	6,1	420	2400	10,96	5,44	7,28	3,68	tr.	0	tr.	0,34	1,15	tr.	5,44
Nongtaba 1	6,5	200	5000	5,30	3,35	4,3	2,0	tr.	tr.	0	0,002	1,0	0,003	3,55
Nongtaba 2	6,9	250	4000	6,88	4,2	5,08	1,8	0,03	0,06	0	tr.	1,2	0,05	4,2
Yako	7,2	150	650	4,0	2,66	1,80	2,20	tr.	0	0	0,004	1,05	0,09	2,66
Fada N' Gourma	7,1	330	3000	7,8	4,02	2,8	5,0	0	0	0	0,008	0,8	0,009	4,02
Koupéla	6,0	100	1000	1,4	0,92	0,60	0,80	tr.	0	0	0,0042	0,7	0,14	0,92
Tenkodogo	6,8	280	3500	7,1	3,96	1,70	5,4	tr.	0	0	0,005	0,9	0,009	3,96
Sidéradougou 1	5,4	37	2700	0,217	0,374	0,099	0,118	tr.	tr.	tr.	0,013	0,2	0,04	0,374
Sidéradougou 2	6,6	40	25000	1,96	1,164	1,03	0,93	0,14	0	0,004	0,015	0,3	0,1	1,264
Pô SE 2	6,3	170	6500	0,88	1,6	0,42	0,46	0	0,002	0	0	0,3	tr.	1,6
Pô SE 3	6,2	170	6500	0,90	1,80	0,42	0,48	0	0,001	0	0,0068	0,4	tr.	1,80
Gaoua 1	7,0	400	2500	3,80	4,20	1,82	1,98	0	0	0	0,28	0,4	0,007	4,20
Gaoua 2	6,6	200	5000	1,38	2,08	0,98	0,40	0	0	tr.	0	0,2	0,016	2,08
Daramandougou	5,4	2,0	50000	0,20	0,12	0,16	0,04	0,04	0	0,003	0,05	0,2	0	0,12
Sidéradougou	5,6	40	25000	0,32	0,40	0,24	0,08	0,002	0,005	0,002	0,04	0,22	0	0,4
Gorom-Gorom H	7,1	450	2250	5,09	4,72	2,30	2,80	0,002	0,005	tr.	1,14	0,6	0	4,72
Zini-Béogo 1	6,0	85	13000	0,55	0,56	0,39	0,15	0,003	0	tr.	0,09	0,05	0	0,56
Zini-Béogo 2	6,0	85	13000	0,55	0,56	0,39	0,15	0,003	0	tr.	0,09	0,05	0	0,56
Fada M'Gourma 1	9,0	900	1100	5,33	7,02	3,37	1,96	0,01	0	tr.	0,0014	0,18	0	7,02
Fada M'Gourma 2	8,2	460	2200	4,20	4,70	2,05	2,15	0	0	0	0,0017	0,04	0	4,70
Fada M'Gourma 3	8,2	360	2800	4,00	4,85	1,85	2,15	0	0	tr.	0,0086	0,04	0	4,85
Fada - PTT 1	7,1	150	5300	1,03	1,26	0,43	0,60	0,04	0,005	tr.	0,2	0,12	0,001	1,26
Fada - PTT 2	6,6	160	5300	1,03	1,26	0,40	0,63	0	0	tr.	0,12	0	1,26	
Fada - PTT 3	6,6	150	5300	1,03	1,26	0,40	0,63	0	0	tr.	0,2	0,12	0	
Dapelgo	8,0	155	6500	1,72	2,04	0,88	0,84	0,014	0,006	0	tr.	0,07	tr.	2,04
Ouaga StCamille	6,4	250	4000	1,87	2,44	1,11	0,72	0	0	0	0	0,12	0	2,44
Tougan-Gendar.	6,3	220	4500	1,87	2,0	1,11	0,72	0,050	0,05	0	0,005	0,20	0	2
Pô-élevage	6,2	180	6000	1,33	2,30	0,91	0,42	0	0	0	0,2	0,16	tr.	2,3

Tableau 28 (suite)

Localité	PH	1/R	R	TH	TAC	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Fe ⁺⁺	NH ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	PO ₄ ³⁻	HCO ₃ ⁻
Guiaro "ORD"	7,4	1128	886,4	13,68	8,21	4,00	5,69	0,02	0,069	0,04	0,042	2,1	0	8,10
Guiaro "Chef"	7,4	141	7092	1,08	1,656	0,56	0,56	0,005	0,1	tr.	0,02	0,4	0	1,65
Kontorio	7,2	197	5076	2,52	2,68	0,71	1,81	0,02	0,062	tr.	0,044	2,2	0,01	2,68
Dialo	6,8	132	7576	1,44	1,7	0,57	0,87	0,134	0,062	0,002	0,002	1,5	0,05	1,69
Foube	7,5	576	1736	4,68	7,202	0,32	4,36	0,03	0,142	0,008	0,100	2,00	0,002	7,2
Tougan	6,4	250	4000	1,90	2,32	0,92	0,98	0	tr.	tr.	0,026	0,40	0	2,32
Boromo	7,6	400	2500	4,08	5,283	2,02	2,06	0	tr.	tr.	0,0	0,2	tr.	5,293
Gampela	7,2	350	2500	3,94	4,74	2,00	1,94	0	0	0	0,0108	0,3	tr.	4,74
Bissiga	5,8	130	8000	0,77	0,86	0,53	0,24	0	0,08	0,043	0,084	0,5	0,020	0,86
Zorgho 1	6,5	250	4000	1,80	2,36	1,30	0,50	0	0	0,037	0,072	0,4	tr.	2,36
Zorgho 2	7,2	250	4000	1,82	2,12	1,02	0,8	0	0	tr.	0,074	0,4	tr.	2,12
Medega	6,7	200	5000	1,56	2,00	1,39	0,18	0,002	tr.	0,0069	0,066	0,3	0,252	2,00
Golagou	6,9	220	4500	2,18	1,52	0,66	tr.	0	0	0,0037	0,048	0,25	tr.	2,98
Boutaya	7,4	300	3250	1,70	4,10	1,30	0,40	tr.	0	0,0058	0,114	0,40	0,0126	4,10
Boussougou	6,9	200	5000	2,64	4,12	1,38	1,26	0	0	0,0059	0,068	0,25	0,0034	4,12
Wangala	7,1	550	1800	4,30	6,64	2,30	2,00	0,004	tr.	tr.	0,072	0,3	0,0016	6,64
Zabré ville	7,4	330	3000	2,4	3,96	1,28	1,20	0,002	0	tr.	0,068	0,55	0	3,96
Wanda	8,8	180	5500	1,24	1,36	0,64	0,60	tr.	0	tr.	0,068	0,3	0,025	1,36
Yaoungou	7,3	150	6500	1,16	1,56	0,66	0,50	0,003	0	0,001	0,08	0,6	0,024	1,56
Saoupo	9,6	230	4500	0,76	2,56	0,52	0,24	tr.	0	0,004	0,08	0,4	0,005	2,56
Guinenoto	7,7	280	3500	2,52	3,56	1,72	0,80	tr.	0,005	0,026	0,06	0,3	0,021	3,56
Diara Betongo	7,6	165	6000	1,46	1,80	0,96	0,50	0,003	tr.	tr.	0,08	0,3	0,017	1,80
Yarespiaga	7,4	300	3250	3,40	4,06	3,00	0,40	0,006	0	0,009	0,0072	0,25	0,0045	4,06
Beya	7,4	250	4000	1,90	3,34	1,60	0,30	0,025	0	tr.	0,018	0,3	0,026	3,34
Zabré Bangou	7,4	350	2800	3,88	5,44	2,40	1,48	tr.	0	0,002	0,0156	0,2	0,002	5,44
Gnentaya	7,0	280	3500	2,25	3,68	1,75	0,50	tr.	0	0,0065	0,068	0,30	0,0108	3,68
Doun	7,4	330	3000	2,72	3,80	2,00	0,72	0,01	tr.	0	0,08	0,50	0,0034	3,80
Ouanda	7,8	160	6000	1,68	1,84	0,70	0,98	tr.	0	0	0,081	0,30	tr.	1,84
Béka	9,2	200	5000	1,08	2,46	0,9	0,18	0	0	tr.	0,024	0,30	0,021	9,46
Zitougou	9,1	185	5250	1,10	2,24	0,64	0,36	tr.	0	0	0,034	0,2	0,008	2,24
Zispanga	7,0	360	2800	4,22	4,94	2,88	1,34	tr.	0	0,0056	0,048	0,8	tr.	4,94
Zorma	9,0	200	5000	0,96	2,30	0,80	0,16	tr.	0	0	0,0127	0,20	0,009	2,30
Sabou	6,2	130	7900	1,25	1,90	0,75	0,50	0	0	0	0,0046	0,30	12,60	1,90
Foligne	6,9	320	3100	3,02	3,10	1,96	1,06	0	0	0,0062	0,064	0,70	0	3,10
Moukounouré	7,0	300	3250	3,72	4,70	2,26	1,46	0	tr.	0,0046	0,074	0,3	tr.	4,70
Tissila	6,9	330	3000	3,82	4,30	1,92	1,90	0	tr.	tr.	0,0026	0,3	tr.	4,30
Bagre	7,50	180	5500	2,05	2,74	0,93	1,12	0	0	tr.	0,044	0,2	tr.	2,74
Boundougua	7,1	360	2750	3,0	4,7	1,77	1,23	0,002	0	0,006	0,16	0,20	tr.	4,70

Tableau 28 (suite)

Localité	PH	1/R	R	TH	TAC	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Fe ⁺⁺	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	PO ₄ ³⁻	HCO ₃ ⁻
Bonfora	6,8	290	3400	2,92	3,0	1,05	1,87	0,006	0	tr.	0,26	0,50	tr.	3,0
Bossey-Onairé	7,4	370	2700	3,96	5,5	0,93	3,03	0,002	0	0,006	0,09	0,74	tr.	5,50
Ouro-Seyno	7,0	395	2550	3,84	4,2	2,38	1,46	0,002	0	0,006	0,6	0,35	tr.	4,20
Nobiol	6,0	122	8400	0,87	1,2	0,27	0,6	0,031	0	0,001	0,0016	0,60	0,003	1,20
Débéré Talata	6,8	1500	670	13,20	6,0	9,4	3,8	0,002	0	0,01	0,92	5,6	0,003	6,0
Féterdé	6,2	150	6500	1,52	5,60	1,04	0,48	0	0	0	0,05	0,2	0	5,6
Bossey-Dogabé	7,2	280	3500	2,88	3,68	2,20	0,76	0	0	tr.	0,019	0,2	0	3,68
Zongoy	7,2	450	2300	4,64	4,84	2,56	2,08	0	0	0,002	0,72	0,5	0	4,84
Gorom-Gorom-Ecole	7,0	600	1700	6,88	5,68	3,60	3,28	0	tr.	0,001	1,48	0,6	0	5,68
Gorom-Dispensaire	7,0	500	2000	5,21	4,80	3,20	2,08	0	0	0,004	1,56	0,5	0	4,80
Gourtouwala	7,0	280	350	3,60	3,28	2,20	1,40	0	0	0,002	0,07	0,2	0	3,28
Banga	7,0	250	4000	2,52	3,20	1,72	0,80	0,004	0	0,001	0,06	0,4	0	3,20
Gorouol-Kolé	7,4	420	2300	4,80	2,96	2,80	2,0	0,004	0	0,004	1,05	0,8	0,002	2,96
Tiafoulboy	6,8	300	3250	2,40	3,80	1,72	0,68	0	0	0,009	0,09	0,4	0	3,8
Lamdamol	7,2	170	6000	1,52	1,44	1,0	0,52	0,002	0	0,005	0,17	0,6	0,003	1,44
Guiddé	7,8	570	1800	4,00	7,08	2,64	1,36	0,002	0,01	0,02	0,2	0,6	0	7,08
Timboulel	7,0	420	2400	4,0	5,36	2,76	1,28	0	0,008	0,005	0,03	0,2	0,005	5,36
Watakalinga	6,8	250	4000	2,76	3,24	1,56	1,20	0	0	0,007	0,016	0,2	0	3,24
Bossey-Boubakary	7,4	400	2500	4,44	4,04	3,32	1,20	0,003	0,1	0,003	0,3	0,6	0	4,04
Billy	6,6	200	5000	1,68	2,16	0,56	1,12	0,025	0,01	0,005	0,04	0,40	tr.	2,16
Bossey-Ouaire	7,0	300	3250	6,48	5,92	3,36	3,12	0,002	0	tr.	0,12	0,8	tr.	5,92
Dabouga	8,0	370	2650	4,12	5,00	3,40	0,70	0,006	0	tr.	0,07	0,2	0	5,0
Kittagou	7,2	300	3250	2,40	2,76	1,6	0,8	0,002	0	0,003	0,3	0,6	0	2,76
Assinga	7,6	600	1650	7,52	6,92	3,96	3,56	0	0,01	tr.	0,64	0,8	0	6,92
Demnoué	7,8	240	4250	2,32	2,2	1,52	0,8	0,002	0	tr.	0,18	0,4	0	2,2

Caractéristiques moyennes des eaux du socle cristallin de Haute-Volta
(les teneurs sont données en milliéquivalents)

Tableau 29

	PH	1/R	R	TH	TAC	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Fe ⁺⁺	NH ₄ ⁻	NO ₂ ⁻	Cl ⁻	PO ₃ ³⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
Moyenne	7,10	365,22	5272,56	4,76	3,81	1,82	1,46	0,01	0,01	0,01	0,68	0,07	3,80	0,15
Ecart-Type	0,87	533,88	6563,23	16,47	4,84	1,88	1,52	0,03	0,03	0,02	0,89	0,43	4,72	0,36

Les valeurs du tableau ci-dessus font bien ressortir les moyennes des différentes variables, mais elles indiquent surtout par leurs écarts-types très élevés (ils sont tous, exception faite de celui du PH, supérieurs à la moyenne) qu'il y a une nécessité et une possibilité de distinguer plusieurs types d'eaux.

La matrice de corrélation de l'analyse en composantes principales n'est pas aisément exploitable en raison de la non prise en compte des variables Na⁺ et K⁺, en l'absence desquelles on remarque, par exemple, que les teneurs en chlorures s'expliquent à 74 % par celles des ions calcium.

Nous essaierons d'analyser, beaucoup plus en détail, la chimie des eaux des formations du socle cristallin de Haute-Volta, en partant des données concernant les eaux du bassin versant de la Sissili et celles des régions de Dori et de l'Oudalan.

2.2.7.3. CHIMIE DES EAUX DU BASSIN VERSANT DE LA SISSILI ET DU NORD

2.2.7.3.1. CARACTERISTIQUES GENERALES ET CLASSIFICATION

Nous considérons d'abord toutes les analyses ensemble puis, après avoir dégagé les moyennes des différentes variables, nous tenterons une classification des eaux.

Le traitement statistique de la cinquantaine d'analyses réalisées sur les eaux du bassin versant de la Sissili donne les résultats du tableau ci-dessous.

Tableau 30 - Caractéristiques moyennes des eaux du bassin versant de la Sissili

	PH	1/R	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	Σ ⁻	Σ ⁺⁻
Moyennes	7,39	228,52	1,09	0,83	0,70	0,24	2,86	0,31	0,14	2,13	2,58	5,43
Ecart-Types	0,55	201,15	1,02	0,58	1,58	0,24	2,62	0,42	0,18	1,45	1,77	4,35

On peut remarquer que, du point de vue écarts à la moyenne, les différents paramètres varient nettement moins que dans le tableau relatif aux prélèvements effectués sur l'ensemble des régions du socle cristallin de Haute-Volta.

Ce qui indique une certaine homogénéité du chimisme des eaux souterraines du bassin versant de la Sissili.

Tableau 31 - Eaux du bassin versant de la Sissili (méq)

Localités	1/R	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	Σ ⁺	Ca/Mg	Na/K	Na/Cl
Sissili S.O.	130	0,99	0,44	0,13	0,12	0,06	0,04	1,40	3,18	2,25	1,08	2,17
Sissili N.E.	170	0,88	0,56	0,69	0,10	0,02	0,08	2,10	4,43	1,57	6,90	34,50
Sapouy 1	185	1,02	0,41	0,97	0,12	0,15	0,56	2,12	5,35	2,49	8,08	6,47
Sapouy 2	185	1,02	0,35	0,79	0,10	0,03	0,08	2,26	4,66	3,0	7,90	22,33
Bola	310	1,90	1,11	0,92	0,07	0,04	0,05	3,77	7,86	1,71	13,14	23
Saro	192	0,79	1,01	0,44	0,15	0,3	0,05	2,205	4,90	0,78	2,93	1,47
Guiaro ORD	1128	4,00	5,69	1,19	0,28	2,10	0,05	8,10	21,41	0,70	4,25	0,57
Guiaro Chef	141	0,56	0,52	0,26	0,20	0,40	0,05	1,66	3,65	1,08	1,30	0,65
Kada	215	0,84	0,46	0,1	0,19	0,25	0,02	1,50	3,36	1,83	0,53	0,40
Sourou	295	1,0	0,72	0,24	0,19	0,20	0,28	1,48	4,11	1,39	1,26	1,20
Nokourou	210	1,20	0,48	0,75	0,22	0,35	0,00	1,70	4,7	2,25	3,41	2,14
PO 1	132	0,55	0,53	0,73	0,10	0,30	0,05	1,6	3,86	1,04	7,3	2,43
PO 2	180	0,42	0,48	0,90	0,50	0,46	0,05	1,8	4,61	0,88	1,80	1,96
Danfouna	200	1,12	0,36	0,63	0,18	0,09	0,04	2,00	4,42	3,11	3,50	7,00
Tachien	180	0,90	0,46	0,73	0,13	0,02	0,06	2,02	4,32	1,95	5,62	36,50
Fyin	109	0,46	0,20	0,46	0,13	0,03	0,37	1,04	2,69	2,30	3,54	15,33
Névri	170	1,16	0,39	0,14	0,39	0,50	0,10	1,40	4,08	2,97	0,36	0,28
Tabou	121	0,55	0,08	0,86	0,19	0,09	0,02	1,33	3,12	6,88	4,53	9,56
Prata	130	0,53	0,26	0,73	0,15	0,06	0,35	1,42	3,50	2,04	4,87	12,17
Boala	145	0,58	0,36	0,76	0,14	0,04	0,06	1,72	3,66	1,61	5,43	19,00
Léo Marché	126	0,60	0,16	0,48	0,13	0,02	0,02	1,52	2,93	3,75	3,69	24,00
Léo Zone 1	210	1,04	0,56	1,44	0,26	0,40	0,10	2,75	6,56	1,85	5,54	3,60
Léo Zone 2	250	0,78	0,57	2,16	0,24	0,80	0,62	2,22	7,37	1,36	9,00	2,70
Léo Zone 3	265	1,40	0,30	1,92	0,30	0,58	0,50	2,80	7,8	4,66	6,40	3,31
Léo 5-1978	200	1,38	0,36	0,62	0,22	0,38	0,10	2,20	5,26	3,83	2,82	1,63
Léo-5-1981	280	1,47	1,13	0,63	0,20	0,04	0,08	2,94	6,49	1,30	3,15	15,75
Léo-Diasso	135	0,45	0,33	0,73	0,10	0,04	traces	1,55	3,25	1,36	7,30	18,25
Mouna	90	0,73	0,08	0,09	0,12	0,02	0,04	1,10	2,18	9,13	0,75	4,50
Walème	340	2,07	1,22	1,17	0,12	0,02	0,06	4,42	9,08	1,70	9,75	58,50
Gao	217	1,25	0,45	0,15	0,23	0,06	0,07	2,39	4,60	1,78	0,65	2,50
Nébou	179	0,90	0,49	0,74	0,14	0,03	0,01	1,93	4,24	1,84	5,29	24,67
Léo-Abattoir	258	1,96	0,32	0,93	0,14	0,01	0,04	3,12	6,52	6,13	6,64	93
Po-ad	170	0,68	0,52	0,20	0,08	0,01	0,04	2,08	3,61	1,31	2,50	2,50
Po b-f	495	2,00	1,88	0,35	0,16	0,20	0,71	4,81	10,05	1,06	3,50	1,75
Kouli	31	0,04	0,05	0,24	0,16	0,06	0,06	0,13	0,74	0,80	1,50	4,00
Dialo	132	0,57	0,87	0,77	0,10	1,50	0,05	1,70	5,56	0,66	7,70	0,51
Nilini	197	1,1	0,42	0,10	0,39	0,35	traces	0,98	3,34	2,62	0,26	0,29
Tiakané	96	0,15	0,78	0,06	0,37	0,40	0,05	0,74	2,24	0,19	0,16	0,15
Kounou mare		0,12	0,11	0,17	0,19	0,02	0,06	0,28	0,86	1,09	1,33	8,50

a) MATRICE DE CORRELATION

PH	1/R	R	TH	TAC	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Fe ⁺⁺	NH ₄ ⁻	N ₂ O ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	PO ₄ ⁺⁺⁺	HCO ₃ ⁻
+1.00	+0.20	-0.15	-0.01	+0.28	+0.28	+0.12	-0.13	+0.09	-0.04	-0.02	+0.23	+0.08	+0.16
	+1.00	-0.26	+0.07	+0.18	+0.43	+0.32	-0.09	+0.00	+0.16	+0.34	+0.34	-0.02	+0.15
		+1.00	-0.05	-0.14	-0.21	-0.19	+0.17	+0.00	-0.06	-0.14	-0.16	-0.03	-0.14
			+1.00	+0.04	+0.13	+0.14	-0.04	-0.01	+0.01	-0.00	+0.11	-0.01	+0.03
				+1.00	+0.33	+0.31	-0.10	+0.03	+0.00	-0.01	+0.21	-0.01	+0.95
					+1.00	+0.64	-0.13	+0.00	+0.22	+0.14	+0.74	-0.06	+0.24
						+1.00	-0.09	+0.16	+0.13	+0.10	+0.61	+0.01	+0.27
							+1.00	+0.10	-0.01	-0.07	-0.01	+0.06	-0.07
								+1.00	+0.17	-0.08	+0.23	-0.03	-0.02
									+1.00	+0.14	+0.32	-0.00	+0.01
										+1.00	+0.11	-0.02	+0.02
											+1.00	-0.08	+0.10
												+1.00	-0.03
													+1.00

b) MATRICE DE CORRELATION

PH	1/R	CA ⁺⁺	MG ⁺⁺	MA ⁺	K ⁺	Z ⁺	CL ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃	Z ⁻	Z ⁻⁺
+1.00	+0.08	+0.24	+0.02	+0.17	-0.09	+0.13	-0.20	+0.06	+0.30	+0.21	+0.16
	+1.00	+0.88	+0.88	+0.25	+0.50	+0.97	+0.66	+0.20	+0.89	+0.91	+0.96
		+1.00	+0.67	+0.14	+0.66	+0.88	+0.44	+0.33	+0.83	+0.82	+0.86
			+1.00	+0.16	+0.20	+0.91	+0.74	+0.00	+0.82	+0.85	+0.89
				+1.00	-0.10	+0.34	+0.29	+0.44	+0.47	+0.50	+0.41
					+1.00	+0.44	+0.21	+0.39	+0.26	+0.30	+0.39
						+1.00	+0.70	+0.25	+0.93	+0.96	+0.99
							+1.00	+0.10	+0.56	+0.71	+0.71
								+1.00	+0.19	+0.28	+0.27
									+1.00	+0.98	+0.96
										+1.00	+0.98

MOYENNE

ECART-TYPE

PH	7.09849	0.8654
1/R	365.21811	533.8833
R	5272.55507	6563.2287
TH	4.75453	16.4737
TAC	3.80454	4.8383
CA ⁺⁺	1.81866	1.8825
MG ⁺⁺	1.45460	1.5244
FE ⁺⁺	0.00968	0.0334
NH ₄ ⁻	0.01299	0.0323
NO ₂ ⁻	0.00515	0.0152
NO ₃ ⁻	0.15383	0.3565
CL ⁻	0.67691	0.8909
PO ₄ C ₃	0.06586	0.4294
HCO ₃ ⁻	3.79472	4.7227

EAUX ISSUES DE L'ENSEMBLE DES FORMATIONS CRISTALLINES DE HAUTE-VOLTA

Tableau 32

	MOYENNE	ECART-TYPE
PH	7.38472	0.5527
1/R	228.52361	201.1496
CA ⁺⁺	1.09666	1.0152
MG ⁺⁺	0.82694	1.5770
MA ⁺	0.70361	0.5227
K ⁺	0.23666	0.2373
S ⁺	2.86222	2.6160
CL ⁻	0.31361	0.4227
SO ₄ ⁻⁻	0.13638	0.1806
H ₂ CO ₃	2.13141	1.4509
Z ⁻	5.42836	4.3458

EAUX DU BASSIN VERSANT DE LA SISSILI

Tableau 33

	1/R	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	Σ ^{+ -}	Ca/Mg	Na/k	Na/Cl	PH
Songodin	360	0,96	3,12	0,76	0,07	0,90	0,24	4,12	9,77	0,31	10,86	1,52	
Foubé centre	576	0,32	4,36	4,32	0,04	2,00	0,23	7,20	18,47	0,07	108	2,16	
Foubé Ecole	210	1,42	0,51	0,68	0,08	0,19	0,04	2,46	5,38	2,78	8,50	3,57	
Kossouka 1	125	0,72	0,12	0,75	0,10	0,15	0,44	1,10	3,38	6,00	7,50	5,00	
Kossouka 2	105	0,95	0,10	0,20	0,06	0,05	0,06	1,11	2,52	9,4	3,33	4,00	
Koumbri-Source	47	0,18	0,08	0,28	0,05	0,03	0,04	0,50	1,16	2,25	5,60	9,33	
Ankouna	370	2,59	1,27	0,76	0,07	0,60	0,08	3,79	9,16	2,04	10,86	1,27	
Gabou	241	0,54	1,62	0,77	0,04	1,50	0,23	1,34	6,04	0,33	19,25	0,51	
Dwoaba	240	1,48	0,92	0,40	0,15	0,03	0,08	2,67	5,73	1,61	2,67	13,33	
Gorom-Gorom	441	2,36	1,68	1,30	0,12	0,18	0,33	3,83	9,90	1,40	10,83	7,22	
Ounaré-Forage		1,56	0,56	0,65	0,19	0,37	0,21	2,47	6,01	2,78	3,42	1,76	
Ounaré-Puits	311	1,70	0,82	1,22	0,33	0,39	0,25	3,12	7,82	2,07	3,70	3,13	
Béiga		1,40	0,76	2,87	0,09	0,23	0,19	5,16	10,70	1,84	31,80	12,48	
Tin-Agadel		2,60	1,20	1,0	0,05	0,23	0,15	4,24	9,47	2,16	20,00	4,35	
Bam-ga-Forage	308	1,85	0,80	0,73	0,04	0,11	0,14	3,31	6,98	2,31	18,25	6,64	
Bam-ga-Puits	301	1,85	0,82	1,13	0,41	0,27	0,16	2,72	7,36	2,26	2,76	4,19	
Charam-Chram	971	2,0	3,20	4,00	0,06	1,01	0,48	7,80	18,50	0,62	66,60	3,96	
Bani	469	2,32	1,88	1,09	0,03	0,12	0,33	4,55	10,32	1,23	36,33	9,08	
Gangaol	400	3,65	2,34	1,26	0,05	0,51	0,17	6,60	14,58	1,56	25,20	2,47	

Tableau 34 - Quelques eaux du Nord, du Centre Nord et du Sahel (méq)

Tableau 35 Eaux de roches basiques (méq)

	1/R	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄	HCO ₃	Σ ⁺	Ca/Mg	Na/k	Na/Cl
Guiaro-ORD	1128	4,00	5,69	1,19	0,28	2,10	0,05	8,10	21,41	0,70	4,25	0,57
Walème	340	2,07	1,22	1,17	0,12	0,02	0,06	4,42	9,08	1,70	9,75	58,50
Foubé-Centre	576	0,32	4,36	4,32	0,04	2,00	0,23	7,20	18,47	0,07	108	2,16
Saro	192	0,79	1,01	0,44	0,15	0,30	0,05	2,205	2,90	0,78	2,93	1,47
Gabou	241	0,54	1,62	0,77	0,04	1,50	0,23	2,68	7,38	0,33	19,25	0,51
Songodin	360	0,96	3,12	0,76	0,07	0,50	0,24	4,12	9,77	0,31	10,86	1,52
Pama 1	393	1,85	1,12	3,38	0,05	0,80	0,20	2,90	10,30	1,65	67,6	4,23
Pama 2	302	1,52	1,06	1,65	0,05	0,04	0,08	3,10	7,86	1,43	33	4,13
Ankouna	370	2,59	1,27	0,76	0,07	0,60	0,08	3,79	9,16	2,04	10,86	1,27
Gangaol	400	3,65	2,34	1,26	0,05	0,51	0,17	6,60	14,58	1,56	25,20	2,47
Bani	469	2,32	1,88	1,09	0,03	0,12	0,33	4,55	10,32	1,23	36,33	9,08
Gorom-Gorom	441	2,36	1,68	1,30	0,12	0,18	0,33	3,83	9,90	1,40	10,83	7,22

Tableau 36 - Eaux de surface (méq)

	PH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ ⁺	Cl ⁻	SO ₄	HCO ₃	Σ ⁻	Σ ⁺	1/l	Ca/Mg	Na/K	Na/Cl
Kounou mare	6,7	0,12	0,11	0,17	0,15	0,5	0,02	0,06	0,28	0,36	0,86	4,8	1,09	1,33	8,50
		24	22	64,0			5,56	16,67	77,28						
Ouaga 1	7,6	0,61	0,3	0,38	0,19	1,29	0,29	0,06	1,15	1,50	2,79	170	2,03	2	1,31
		47,29	23,26	44,19			19,33	4,0	76,67						
Ouaga 2	7,6	0,63	0,31	0,38	0,19	1,51	0,28	0,0	1,2	1,48	2,99	185	2,03	2	1,36
		47,72	20,53	37,75			18,92	0	81,08						
Pluie Ouaga-81	7,2	0,04	0,02	0,42	0,50	0,98	0,45	0,12	0,46	1,03	2,51	160	2	0,42	0,93
		2,70	1,35	95,95			43,69	11,65	44,66						
Volta Blanche	6,5	0,55	0,245	0,695	0,04	1,53	0,18	0,645	0,95	1,775	3,305	215	2,45	17,38	3,86
		35,95	16,01	48,04			10,14	36,33	53,52						
Pluie Ouaga-82	7,6	0,898	0,197	0,63	0,353	2,078	0,353	0,052	1,571	1,976	1,976	194	4,56	1,78	1,78

MATRICE DE CORRELATION

PH	1/R	CA ⁺⁺	MG ⁺⁺	MA ⁺	K ⁺	Z1	CL-	SO ₄ --	HCO ₃ -	Z2	Z3
+1,00	-0,05	-0,09	-0,02	-0,23	+0,14	-0,12	-0,25	+0,14	-0,12	-0,11	-0,13
+1,00	+0,68	+0,87	+0,87	+0,87	+0,51	+0,97	+0,61	+0,48	+0,53	+0,66	+0,89
	+1,00	+0,35	+0,35	+0,32	+0,72	+0,64	-0,02	+0,50	+0,13	+0,22	+0,48
		+1,00	+0,10	+0,09	+0,88	+0,75	+0,20	+0,75	+0,81	+0,90	+0,90
			+1,00	-0,33	+0,23	+0,45	-0,14	+0,38	+0,46	+0,35	+0,35
				+1,00	+0,37	-0,05	+0,84	-0,32	-0,16	+0,14	+0,14
					+1,00	+0,65	+0,39	+0,67	+0,79	+0,76	+0,76
						+1,00	+0,26	+0,57	+0,60	+0,67	+0,67
							+1,00	-0,23	+0,06	+0,20	+0,20
								+1,00	+0,96	+0,84	+0,84
									+1,00	+0,93	+0,93
										+1,00	+1,00

Tableau 37

Eaux carbonatées magnésiennes et chlorurées des roches basiques

	MOYENNE	ECART-TYPE
PH	7,62727	0,4125
1/R	458,36363	278,3861
CA ⁺⁺	2,07272	1,5707
MG ⁺⁺	2,64545	2,5638
MA ⁺	1,48090	1,2431
K ⁺	0,22363	0,4174
Z1	6,42272	3,7095
CL-	0,79818	0,7366
SO ₄ --	0,20827	0,1597
HCO ₃ -	4,25590	2,1334
Z2	4,99227	2,8500
Z3	11,40045	6,2101

Tableau 38

Eaux de surface et de pluie

	MOYENNE	ECART-TYPE
PH	7,12000	0,5069
1/R	155,60000	63,6341
CA ⁺⁺	0,39000	0,2859
MG ⁺⁺	0,19700	0,1270
MA ⁺	0,40900	0,1875
K ⁺	0,31400	0,3883
Z1	1,26200	0,4365
CL-	0,24400	0,1582
SO ₄ --	0,17700	0,2650
HCO ₃ -	0,80800	0,4155
Z2	1,22900	0,5543
Z3	2,49100	0,9567

Du point de vue pondéral, le tableau ci-dessus devient:

	PH	1/R	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	Σ ⁺⁻
Poids moyens en mg/l	7,34	228,52	22,24	10,06	16,19	9,27	11,13	6,53	130,2	205,62
Ecart-types	0,55	201,15	20,34	19,19	12,03	9,27	15,0	8,69	88,66	173,18

On note que les eaux sont dans l'ensemble très faiblement minéralisées. Ce qui se traduit par de faibles conductivités.

Le PH quant à lui est d'une manière générale légèrement basique et varie peu par rapport aux concentrations des différents éléments (le PH le plus basique: 8,2 est atteint dans l'eau du forage de Sapouy et celui le plus acide dans celle de Tiakané: 5,2). C'est dire donc que généralement, l'eau ne contient pas de carbonates, mais seulement des bicarbonates.

Nous disposons d'analyses d'eaux de pluies et de marigots qui peuvent nous permettre d'apprécier l'évolution de la concentration totale des éléments dissous lors de l'infiltration (Tab.36).

Tableau 39 Caractéristiques moyennes des eaux de pluie et de surface

	PH	1/R	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	Σ ⁻	Σ ⁺⁻
Moyennes	7,12	155,60	0,39	0,20	0,41	0,31	1,26	0,24	0,18	0,81	1,23	2,49
Ecart-types	0,51	63,63	0,29	0,13	0,19	0,39	0,44	0,16	0,27	0,42	0,53	0,96

En comparant les eaux de surface aux eaux souterraines, on peut distinguer du point de vue concentration totale en ions dissous: des eaux très peu minéralisées dont la teneur en éléments dissous est égale ou inférieure à celle de la moyenne des eaux de pluie et de surface, des eaux moyennement minéralisées dont la teneur totale en ions principaux dissous est supérieure à 3,5 milliéquivalents par litre.

2.2.7.3.1.1. Classification des eaux

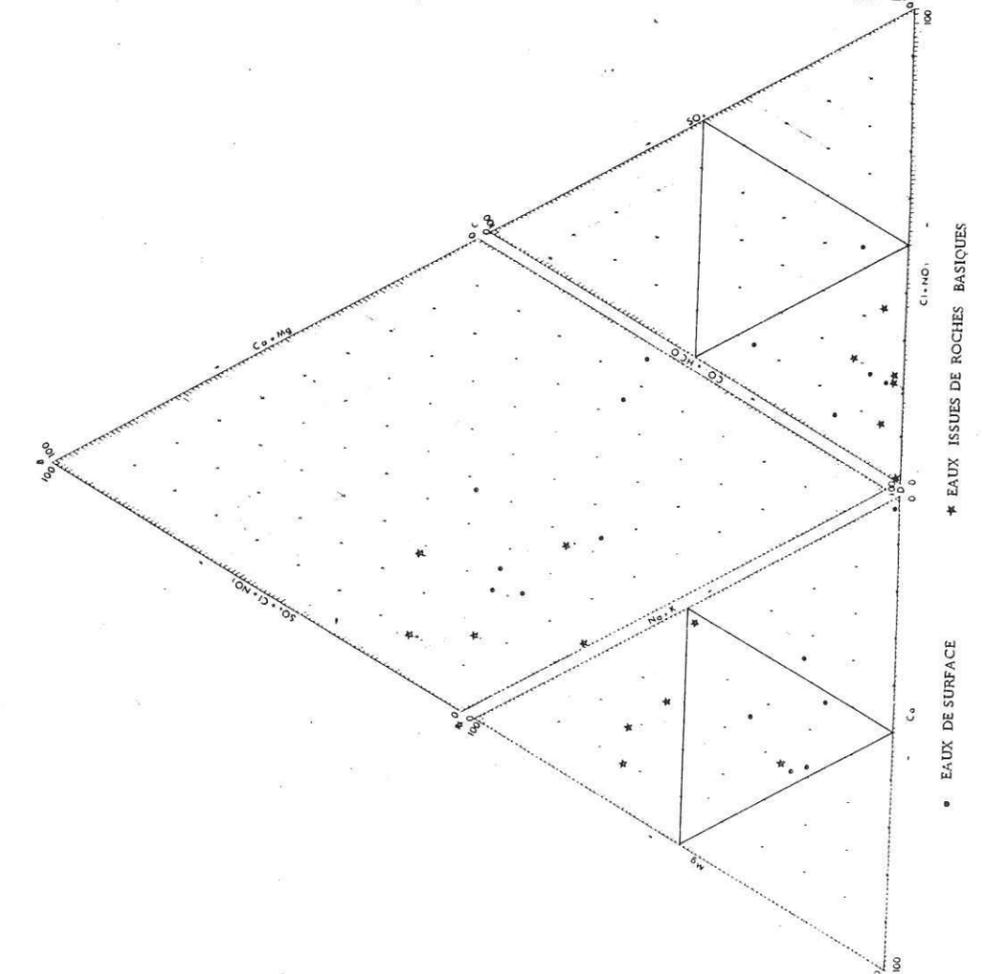
Toutes les eaux du bassin versant de la Sissili et des régions nord sont très bicarbonatées. En effet, les données des tableaux des caractéristiques générales des eaux indiquent des concentrations ioniques et pondérales importantes en HCO₃⁻. La concentration en bicarbonates représente l'essentiel de la teneur des anions et environ la moitié de la concentration totale des ions.

En effet, en considérant un ensemble de 54 analyses, nous obtenons en teneurs cumulées 146,50 méq. de HCO₃⁻, sur un total de 348,65 méq., soit donc 42 %. Les eaux analysées sont toutes bicarbonatées et les distinctions de sous classes ne peuvent se fonder que sur les teneurs en magnésium, calcium sodium et potassium. Ainsi on aura donc:

FIG. 45 : Diagrammes d'analyse d'eaux de surface et issues des roches basiques

DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU

DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU



CLASSIFICATION DES EAUX NATURELLES

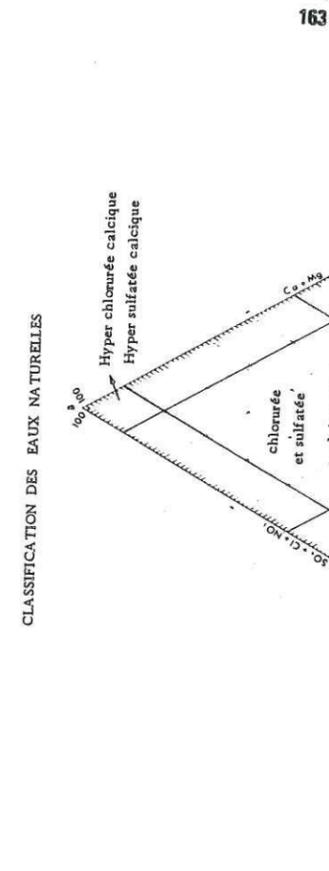


DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU

d'après PIPER (U.S. Geological Survey)

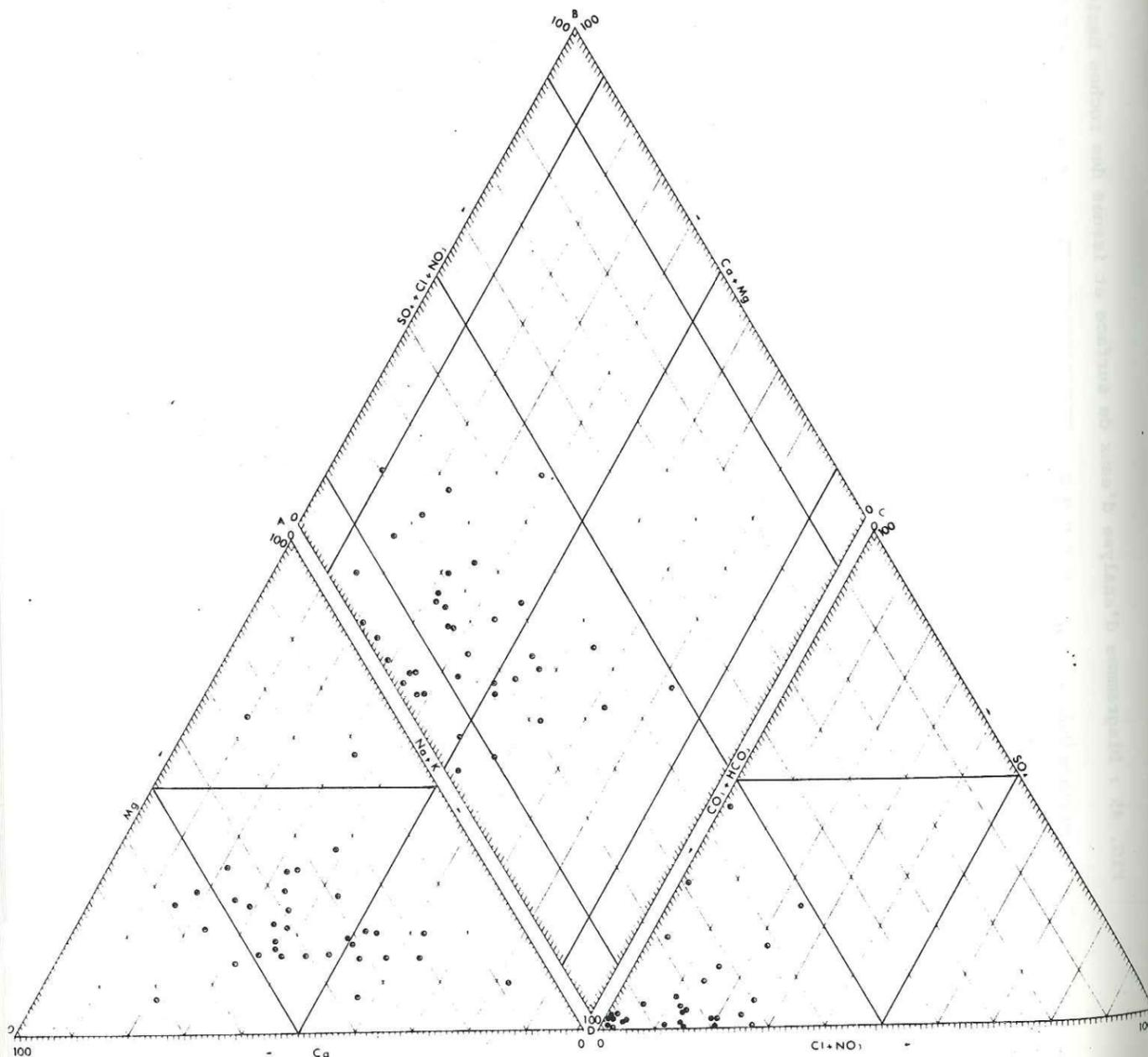
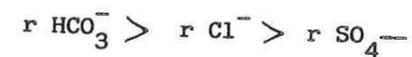
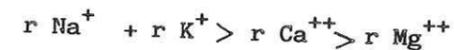


Figure 46: LES EAUX DU BASSIN VERSANT DE LA SISSILI

- des eaux bicarbonatées sodiques avec:



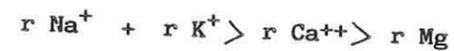
et



ou encore

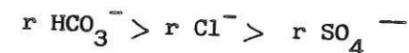


et

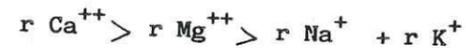


Ce sont les eaux de PO₁, zone 1, zone 2, zone 3, Léo-Diasso, PO₂ Béiga, puis de Sapouy 1, Fyin, Prata, Boala, Kossouka 1, Koumbri-source. Le premier groupe correspond à des eaux d'arènes granitiques ou de migmatites à orthose ou microcline et biotite, le second à des eaux de la base de la cuirasse reposant sur des substratums pétrochimiquement variés.

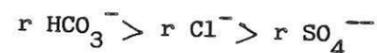
- des eaux bicarbonatées calciques avec:



et



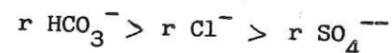
ou



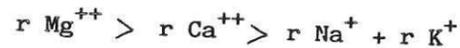
et

$r \text{Ca}^{++} > r \text{Na}^+ + r \text{K}^+ > r \text{Mg}^{++}$ auxquelles appartiennent les eaux de Sissili S.O., Kada, Guirao Chef, Ankouna, Tin-agadel, Banga Puits, Gangaol, Ounaré Puits et forage, Walème, puis celles de Nokourou, Danfouna, Névri, zone 5, Nébou, Niliri et Foubé-école. Ces eaux baignent des alluvions (Niliri Kada, Nokourou) ou la base de la cuirasse (Sissili S.O.) et surtout les altérites de migmatites gneissiques ou de gneiss francs, de granodiorites ou de roches vertes de l'éburnéen (Ankouna).

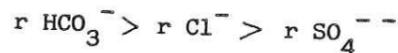
- des eaux bicarbonatées magnésiennes avec:



et



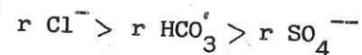
ou



et

$r \text{Mg}^{++} > r \text{Na}^+ + r \text{K}^+ > r \text{Ca}^{++}$. Ce sont les eaux de Guirao O.R.D., Saro, Songodin, puis celles de Dialo, Foubé-centre qui sont des eaux issues de formations basiques (diorites, amphibolites, dolérites et gneiss riches en enclaves micacées et amphiboliques (Dialo).(Fig.35).

- Enfin, une eau chlorurée magnésienne avec:



et

$r \text{Mg}^{++} > r \text{Na}^+ + r \text{K}^+ > r \text{Ca}^{++}$ qui est celle de Gabou. Ce type d'eau est exceptionnel.

Reportées sur diagrammes de Piper, les caractéristiques des différentes eaux apparaissent plus nettement:

- l'appartenance de toutes les eaux au type bicarbonaté est claire;
- on remarque, par contre, que c'est vis-à-vis des cations que l'hétérogénéité des eaux s'exprime le mieux.

En effet, même si la plupart des eaux sont mixtes dans le diagramme triangulaire Ca^{++} , Mg^{++} , $Na^+ + K^+$, on y note la présence d'eaux calciques et magnésiennes.

2.2.7.3.1.2- Les eaux souterraines dans le diagramme logarithmique de SCHOELLER

Le report de nos analyses sur le diagramme logarithmique de SCHOELLER fait mieux ressortir les différences qui existent entre les eaux issues des roches basiques et les autres types d'eau. On notera en particulier que les concentrations totales sont beaucoup plus élevées dans les eaux des roches basiques. En effet, l'eau la plus minéralisée du bassin versant de la Sissili qui est celle du puits de Guiaro O.R.D., n'est-elle pas issue d'amphibolite? B. OUSMANE (1983) fait la même remarque pour les eaux du Niger au sujet desquelles il écrit: "les eaux du secteur de Téra dans le Liptako-Gouma, ainsi que celles de Zinder sont les plus riches en sels. Cette charge saline apparaît associée à des circulations dans des roches basiques (gabbros, intrusions doléritiques) ainsi que dans des faciès métamorphiques comme les schistes et les gneiss".

Ce phénomène de minéralisation est en relation avec les mauvaises circulations des eaux dans ces formations dont nous parlerons plus loin à propos des teneurs en chlorures. Les teneurs élevées montrent, ainsi que dans les roches basiques, les apports d'eau circulent à travers la roche fissurée où ils dissolvent des substances disponibles qui viennent s'ajouter à celles surconcentrées par les mauvaises circulations dans les altérites argileuses.

Du point de vue potabilité, toutes ces eaux sont pratiquement de bonne potabilité. L'eau de Guiaro O.R.D., qui fait l'exception, a une mauvaise saveur liée à la forte concentration en magnésium et en nitrates. Cependant, même la potabilité de cette dernière n'est que médiocre (Fig.48).

2.2.7.3.2. ORIGINE DES SUBSTANCES DISSOUTES

2.2.7.3.2.1. GEOCHIMIE DES ALTERATIONS

La faible minéralisation des eaux de pluie et de surface par rapport à celle des eaux souterraines montre que l'eau acquiert la plupart des éléments qu'elle renferme lors de son infiltration et de sa circulation dans les formations géologiques qu'elle traverse. La minéralisation s'effectue par dissolution ou par échanges de bases (SCHOELLER, 1951).

Pour comprendre l'origine des éléments qu'on retrouve dans les eaux souterraines, il convient de rappeler la géochimie des altérites. C'est ce que nous ferons succinctement en nous inspirant des travaux sur la géochimie des altérites des formations cristallines sous climat tropical de LENEUF, 1959 - LELONG, 1967 - TARDY, 1969 et PION 1979.

DIAGRAMME LOGARITHMIQUE

(D'après H. Schoeller)

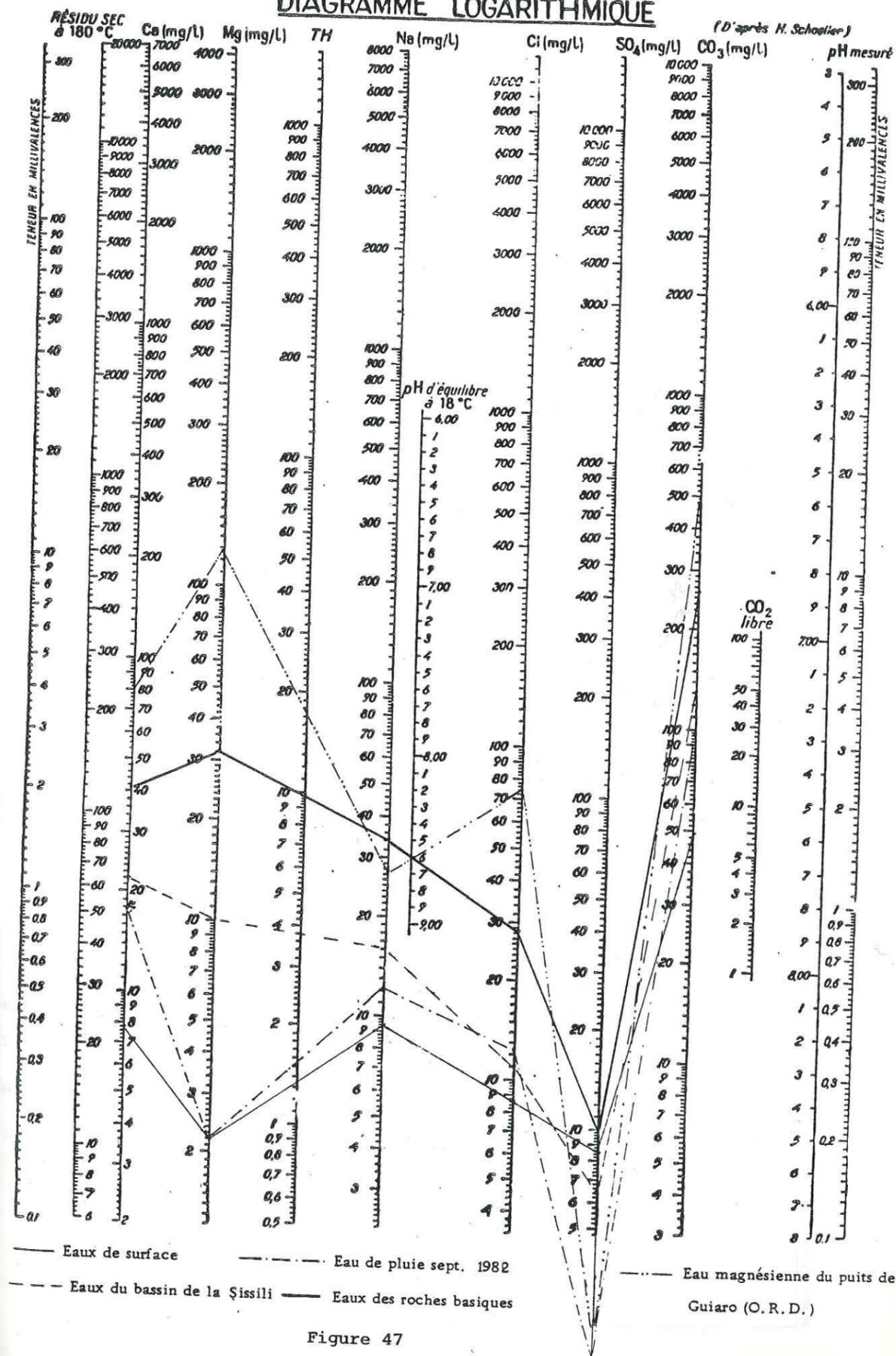
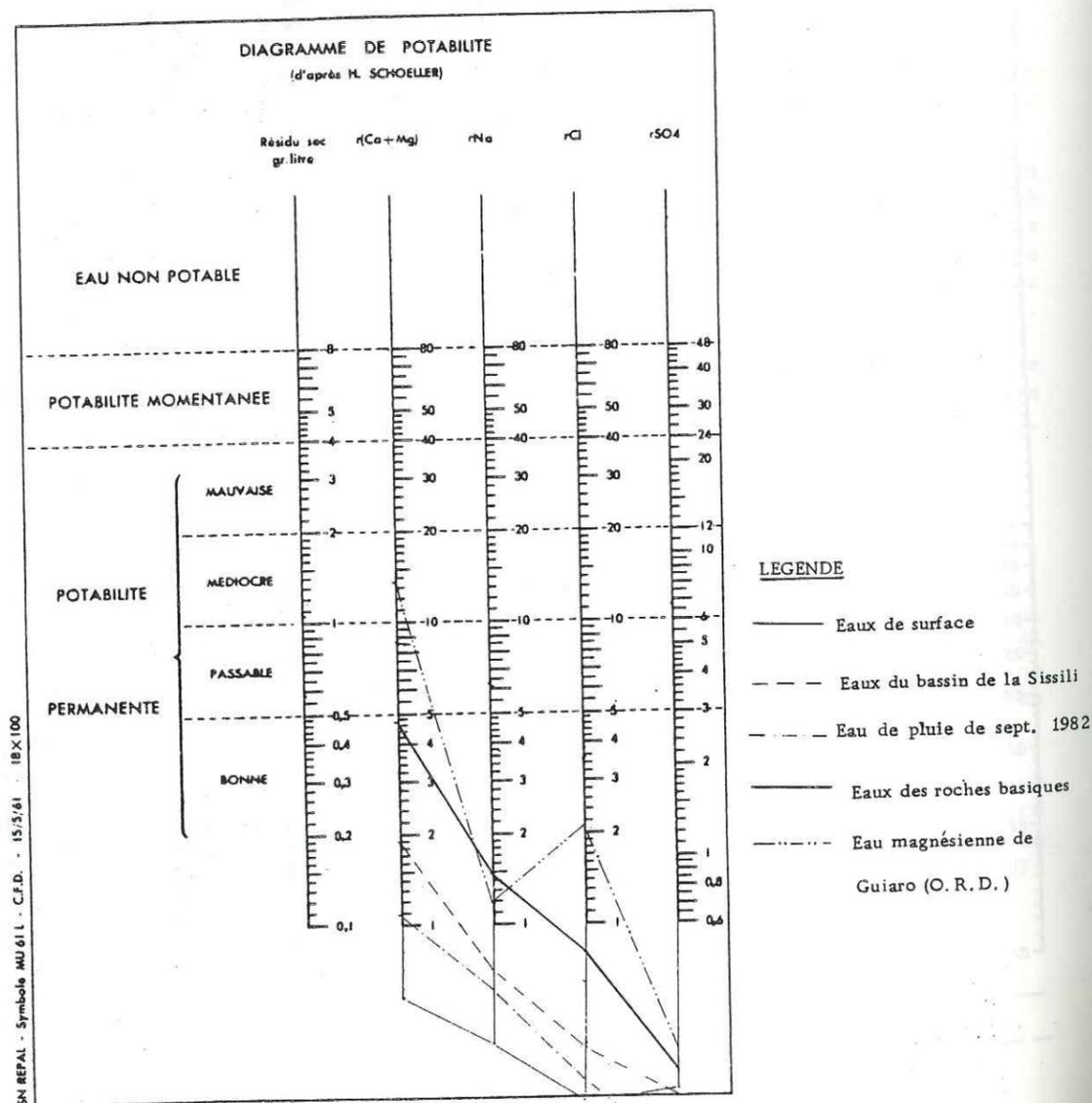


Figure 47

FIG. 48 : DIAGRAMME DE POTABILITE DES DIFFERENTS TYPES D'EAU



Les horizons du profil d'altération

Lorsqu'on se fonde sur l'évolution de la roche et de ses composants minéralogiques, on peut distinguer quatre horizons qui sont de bas en haut, donc en partant de la roche mère saine ou fissurée:

- une arène sableuse dans laquelle, la roche a perdu toute cohésion; les feldspaths sont craquelés, blanchis et partiellement hydrolysés;

- un horizon de roche meuble et plastique; les feldspaths complètement altérés sont blancs, les micas et les amphiboles plus résistants deviennent vert mordoré et ocre jaune;

- plus haut, c'est la lithomarge à texture conservée de TARDY, zone où tous les minéraux primaires sont détruits, tandis que l'architecture initiale de la roche reste maintenue. On entre ici dans la zone de battement de la nappe;

- dans la partie supérieure de la zone de battement, l'architecture de la roche disparaît. Des canaux apparaissent dans les argiles dont l'induration progresse. C'est l'horizon des argiles à canaux ou encore celui des argiles tachetées de PERRAUD et CHEROUX (1963).

Enfin, vient la cuirasse latéritique ferrugineuse et indurée.

Minéralogie et bilan chimique de l'altération sur toute la hauteur du profil

Les minéraux argileux rencontrés sont ceux de la famille de la kaolinite. Les micas donnent naissance dans la lithomarge à de la goethite. L'illite provenant de la biotite n'existe que dans les horizons de base du profil d'altération.

D'après TARDY (1969), le bilan de l'altération se ramène à:

- une perte pratiquement totale de Na, K, Ca, Mg, Sr, Ba, As et Zn;
- un important départ de Si, Mn, Cr, Cu, Ga, Ni, B, Pb, Co, Sn;
- un lessivage faible de Al;
- un apport de Fe, Ti et V.

L'altération des roches basiques (PION, 1969) (péridotites, granodiorites, amphibolites) se caractérise par une absence de l'horizon arénitique donc aussi par un contact niveau plastique - roche mère, entraînant une mauvaise circulation des eaux, et donc aussi une moindre altération de la roche mère qui constitue alors des reliefs accusés par rapport au substratum encaissant granito-migmatitique.

Mais même dans ces formations, on note des départs importants d'éléments chimiques aboutissant aux appauvrissements relatifs suivants calculés sur trois toposéquences différentes étudiées par PION en Haute-Volta: Fe (- 30%), Al (- 31%), Mg (- 34%), Si (- 43%), K (- 44%), Ca (- 59%) et Na (- 74%).

Migration des éléments chimiques - nécessité d'existence de circulation profonde des eaux souterraines par un réseau organisé de mégafractures drainantes

Le départ des ions des profils d'altération pose le problème de leur destination. Or à ce propos, PION note qu'on ne les retrouve pas dans les paysages proches. Selon cet auteur:

" Il n'y a aucune accumulation dans les plaines qui entourent les massifs;

- il n'y a pas d'accumulation dans les marigots, dont l'alluvionnement est faible (encore que le caractère perché des rivières ne permette pas aux éléments lessivés de rejoindre un écoulement à l'air libre).

On peut donc conclure que la majeure partie des éléments est exportée très loin vers les grandes zones déprimées (plaine du Sourou, fossé du Niger, bassin de Volta-Lake au Ghana), et vers les océans ".

Une telle conclusion entraîne une autre qui est celle de l'existence de circulations sur de très longues distances des eaux souterraines impliquant aussi nécessairement l'existence d'un réseau drainant lié à l'organisation des mégafractures. Ces conclusions corroborent celles auxquelles nous sommes parvenu en traitant le problème des perméabilités induites des mégafractures par la méthode FRANCISS.

P. BERARD (1977) décrit dans le bloc A.V.V. de Mogtédó-Bomboré un exemple d'organisation des fractures en réseau drainant. Tout se passerait comme si les différentes fractures formaient un bassin versant souterrain dont l'axe majeur correspond au tracé de la rivière principale. Cette interprétation du réseau de fractures explique bien les résultats positifs des forages 1 et 2 et l'échec du forage 4. Elle devient insuffisante pour justifier l'échec du forage 3. Comme nous le verrons, on doit tenir compte de la profondeur des zones broyées par rapport à celle des zones d'infiltration préférentielle que constituent les bas-fonds, où les "inversions de relief" sont fréquentes pour expliquer l'existence des zones broyées sèches.

2.2.7.3.2.2. Origine des substances dissoutes

PRINCIPES D'ACQUISITION DE LA MINERALISATION PAR L'EAU

Selon SCHOELLER (1951):

- l'eau qui percole peut simplement dissoudre des substances disponibles dans la roche qu'elle traverse;

- certaines roches dites permutantes peuvent céder à l'eau des alcalins contre des alcalino-terreux, ou vice-versa. L'échange de bases peut s'exprimer par les rapports ou indices suivants:

- $r \text{ (Cl - (Na+K))} / \text{Cl} = \text{indice d'échange de bases.}$

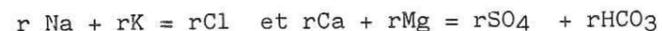
Il est positif lorsque:

$r \text{ Cl} > r \text{ (Na+K)}$ et $r \text{ (Cl - (Na+K))} / r \text{ (So}_4 + \text{CO}_3) > 0$

et négatif pour

$r \text{ Cl} < r \text{ (Na+K)}$.

Dans le premier cas, les ions $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ de l'eau sont échangés contre des ions $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ du terrain, et dans le deuxième cas, c'est l'eau qui cède des ions $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ contre $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ du terrain. Tout ceci s'opère en admettant qu'avant l'échange il y avait primitivement l'équilibre:



* Voir définition à la page suivante.

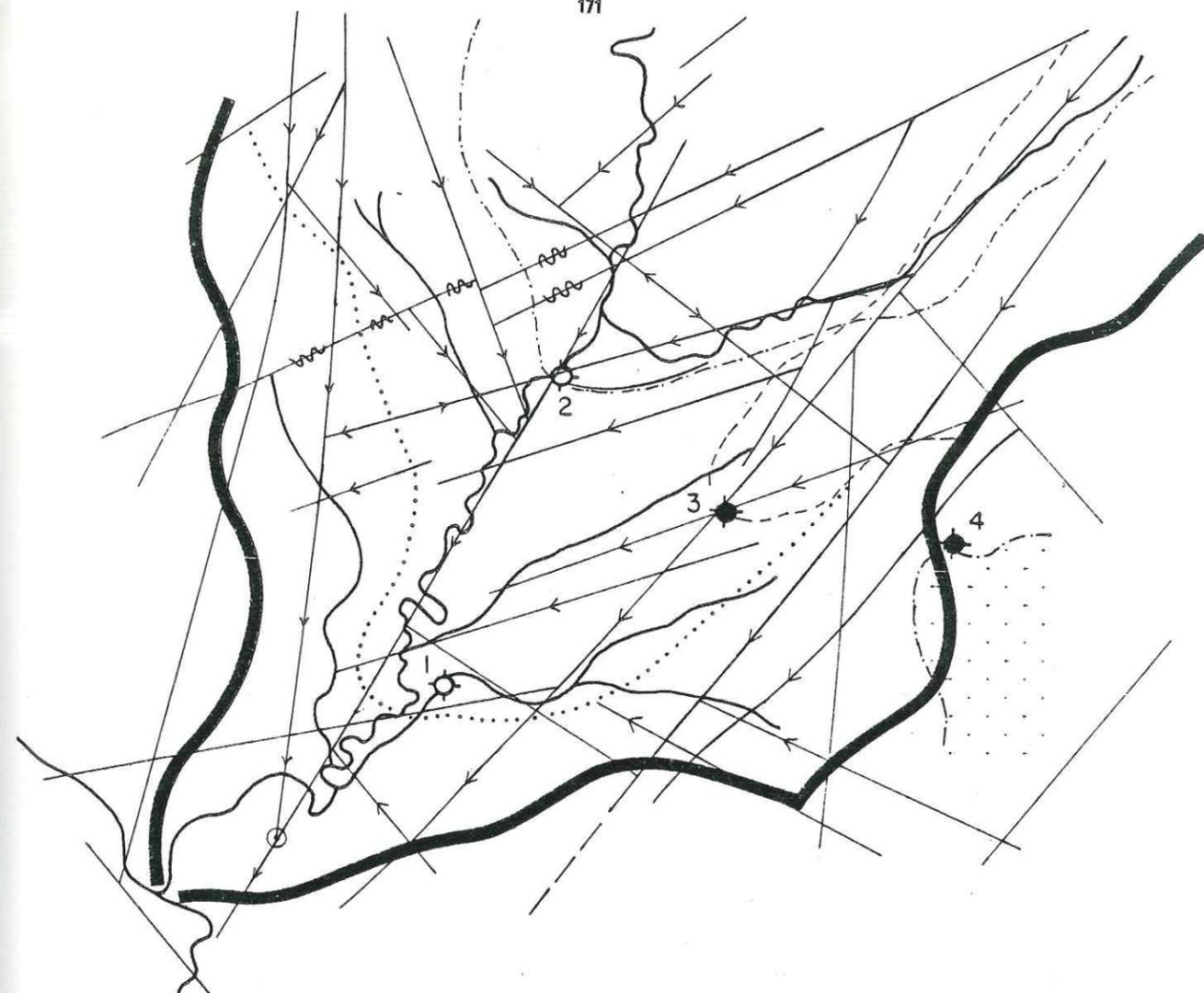


Fig. 49 - Interprétation des résultats par l'aire d'alimentation des forages - bloc de Mogtédó Bomboré - A.V.V. 1977 - fractures d'après Bérard P. 1/20000

	forage productif		aire d'alimentation du forage n°1
	forage sec		" " " 2
	site préférentiel		" " " 3

forage 1 - débit = $5 \text{ m}^3/\text{h}$. profondeur = 49,5 m.

aire d'alimentation vaste - proximité du drain majeur - bonne profondeur

forage 2 - débit = $4 \text{ m}^3/\text{h}$. profondeur = 43 m.

bassin d'alimentation important - axe de drainage majeur - bonne profondeur

forage 3 - sec - profondeur 35 m. certainement insuffisante

aire d'alimentation faible sur interfluve

forage 4 - sec - sur interfluve -

aire d'alimentation nulle - maille non fracturée avec socle affleurant

ORGANISATION DU RESEAU DE FRACTURES EN BASSIN DE DRAINANCE

Il est à noter que selon BARIAND et CESBRON (1957) certains minéraux argileux du groupe de la montmorillonite ont la propriété de pouvoir échanger des cations (principalement Na^+ et Ca^{++} , mais aussi K^+ , H^+ , Mg^{++}) interfoliaires, ou seulement les absorber en surface en vue de compenser des charges négatives résiduelles lorsque des substitutions sont intervenues dans la constitution de ceux-ci.

Ce dernier phénomène pourrait expliquer les déséquilibres ioniques existant dans certaines eaux analysées.

Les bicarbonates

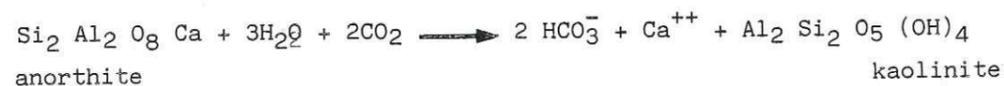
La teneur en acide carbonique HCO_3^- de l'eau de pluie indique qu'avant de parvenir au sol l'eau météorique contenait déjà du gaz carbonique dissous mais en petite quantité (0,45 méq.).

Lorsque nous examinons les concentrations en bicarbonates des eaux de surface (mares, marigots, barrages), on se rend compte que l'eau s'enrichit beaucoup en bicarbonates au cours du ruissellement (la concentration double entre les deux stades).

Toutefois, les eaux souterraines présentent une teneur moyenne en HCO_3^- trois fois supérieure à celle des eaux de surface et 10 fois celle des eaux de pluie. Ceci tend à montrer que la plus grande partie des bicarbonates des eaux souterraines est acquise lors de l'infiltration et montre aussi que l'eau des marigots ne provient pas des nappes souterraines. Ce fait confirme donc l'état perché des rivières dont nous avons déjà parlé (SAVADOGO, 1975).

Les fortes teneurs en bicarbonates sont liées à la couverture végétale, ce qui montre que celle-ci est importante lors des plus grandes infiltrations. Tel est bien le cas puisque les précipitations les plus importantes ont lieu partout au mois d'Août suivies par une remontée générale des nappes et particulièrement des nappes d'interfluves comme le montrent bien les courbes de fluctuation des niveaux piézométriques. C'est aussi à cette période que le tapis végétal est important et généralisé même dans le Sahel. L'altération des feldspaths libère également des ions qui en se combinant donnent des bi-carbonates qu'on retrouvera dans les eaux souterraines.

Ainsi on pourra avoir:



Comme nous l'avons déjà noté, les bicarbonates sont abondants, puisqu'ils représentent plus de 40 % de la teneur en anions. Ils vont donc influencer la conductivité de nos eaux souterraines. Le graphe $\text{HCO}_3^- = f(1/R)$ indique que les deux variables sont linéairement corrélées.

* L'expression "inversion de relief" est employée pour que le substratum est moins profond dans les qu'au niveau des plateaux.

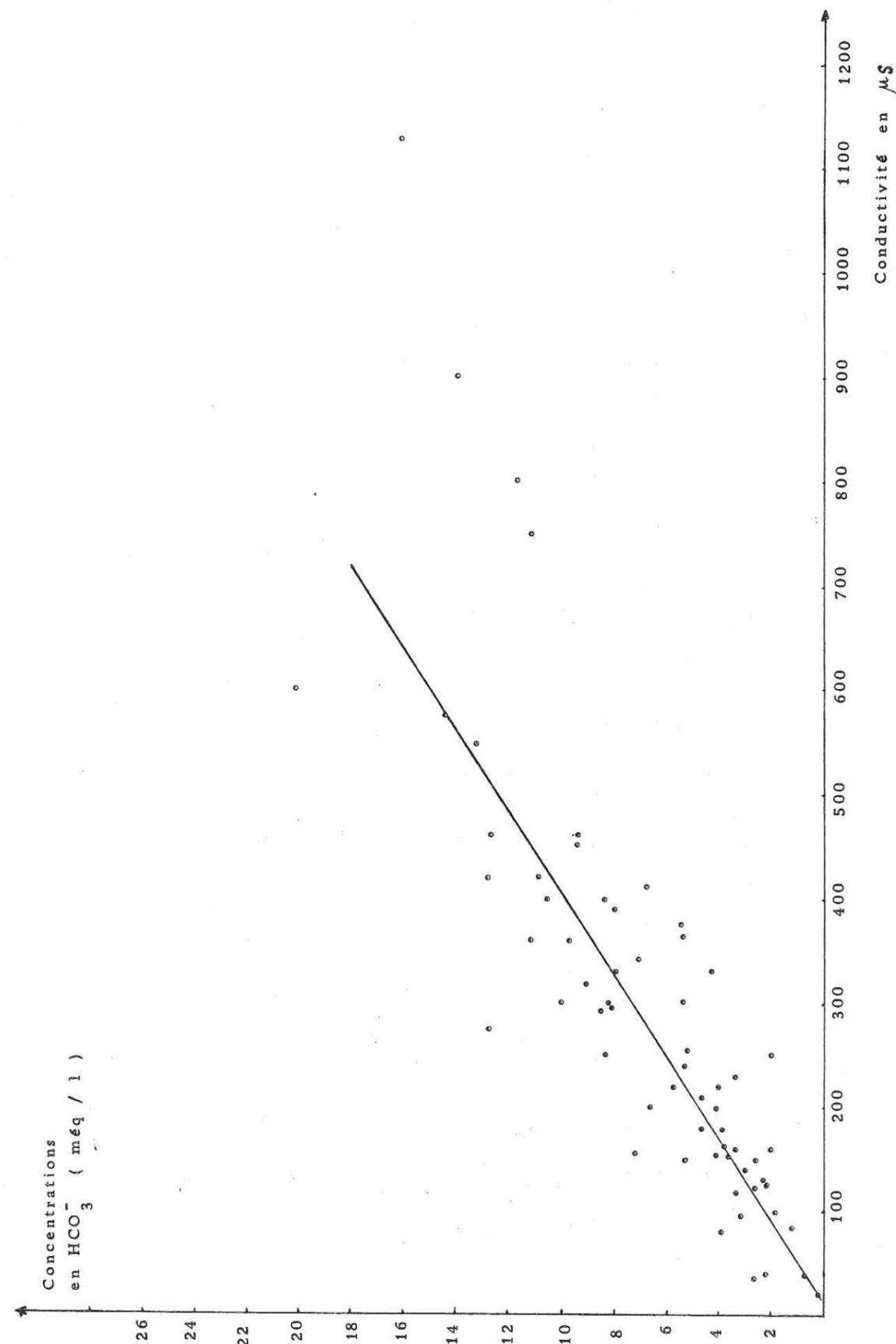


Fig.50 - RELATION ENTRE CONDUCTIVITE ET TENEURS EN CHLORURES

LES IONS CHLORE SODIUM ET POTASSIUM

L'eau de pluie contient des quantités pratiquement égales d'ions Cl^- , Na^+ et HCO_3^- (respectivement 0,45 - 0,42 et 0,46 méq./l dans l'eau de pluie de septembre 1981 recueillie à Ouagadougou).

L'équilibre entre les ions Na^+ (0,42 méq./l) et chlore (0,46 méq./l) permet de penser que ces deux ions sont bien liés, au départ, dans les eaux météoriques.

On remarque dans les eaux de surface, une baisse relative des concentrations des ions, chlore, sodium et potassium vis-à-vis de celles du calcium, du magnésium et des bicarbonates qui augmentent.

Dans les eaux souterraines, les concentrations en sodium et potassium croissent, tandis que d'une manière générale, la teneur en chlore se maintient ou baisse par rapport à ce qu'elle était dans certaines eaux de pluie.

On peut expliquer la baisse énorme de la teneur du potassium dans les eaux de surface par l'absorption de cet élément par les plantes. En effet, R. RAPP (1971) et d'autres pédologues ont montré que le potassium est environ 10 à 20 fois plus abondant dans les végétaux et que son absorption par les plantes est réalisée dans le sol. Contrairement donc aux ions, chlore et sodium, l'ion potassium est introduit au niveau du sol dans le cycle de la matière organique. Très généralement d'ailleurs, la teneur en potassium restera faible dans les eaux souterraines que nous avons prélevées, tant dans le bassin versant de la Sissili que dans les autres régions à substratum cristallin. Le rapport $r_{\text{Na}/r_{\text{K}}}$, s'il varie dans des limites très larges de (0,16 à 108) reste bien souvent supérieur à 1. Il en est ainsi dans 55 analyses sur 62, c'est-à-dire dans 89% des cas. On remarque en outre que les eaux où ce rapport Na/K est inférieur à 1 correspondent à des eaux de pluie ou de surface ou encore plus souvent à des eaux sous latéritiques ou alluviales (eau de Kada, Niliri, Bihia, Mouna, Tiakané Névri) c'est-à-dire des eaux ayant rapidement rejoint la nappe sans avoir permis pendant leur infiltration un prélèvement important du potassium par les plantes ou autorisé un enrichissement de l'eau en sodium par le lessivage des minéraux altérés du substratum.

Le sodium présente par rapport à sa concentration dans l'eau de pluie et dans les eaux de surface des teneurs croissantes dans les eaux souterraines. Ce fait a pour conséquence une augmentation du rapport $r_{\text{Na}^+}/r_{\text{Cl}^-}$ qui va passer de 1 dans l'eau de pluie à 30, voire plus dans certaines eaux souterraines. Il y a donc un apport de sodium, et on peut penser que dans le contexte géologique où se situe notre étude, cet élément provient essentiellement de la décomposition des feldspaths potassiques et sodiques (orthose, microcline, albite) mais aussi de l'altération des micas.

Mais un fait important à noter est que le rapport Na^+/Cl^- peut être parfois inférieur à 1. Il en est ainsi dans quelques eaux de surface, mais aussi dans de nombreuses eaux magnésiennes. Dans le premier cas, la baisse de la teneur en sodium qui peut s'opérer par échanges de bases s'explique facilement. Dans le second cas, l'élévation des teneurs en chlorure des eaux dans des roches qui ne renferment pas plus de minéraux riches en chlore que les autres pose le problème de l'origine des ions chlore. En Afrique de l'Ouest, et à ce jour aucun auteur ne s'est penché sur ce problème de l'abondance des ions chlore pourtant frappante dans certains types d'eaux.

Parmi les échantillons que nous avons analysés, les eaux des puits et des forages de Guiaro O.R.D., Foubé-centre, Gabou, Songodin, Pama I, Kalam-baogo, Charam-Charam présentent des concentrations anormalement élevées en chlorures par rapport à ce que l'on a comme teneur dans les eaux de pluie de la zone cotière sud comme celle d'Accra où les précipitations devraient renfermer plus de chlorures.

Tableau 40
Tableau de variation des teneurs en ions chlore dans les eaux de pluie d'Accra (AKITTI T., 1980)

Date	24/6/77	11/10/77	10/4/78	10/5/78	13/5/78	4/6/78	27/9/78	Moyenne
Teneur en mg/l	24,0	38	1,8	2,4	16,6	5,8	6,6	13,6
Teneur en méq./l	0,677	1,072	0,051	0,0678	0,468	0,164	0,186	0,38

Deux autres remarques peuvent être faites au niveau de ces eaux:

- Les fortes concentrations en chlore accompagnent presque toujours des teneurs élevées en magnésium;
- On retrouve ces eaux dans des roches vertes ou dans des gneiss et des schistes;

On notera aussi que les remarques que l'on peut faire au sujet de ces eaux chlorurées ne sont pas propres aux eaux des formations cristallines de Haute-Volta, mais se retrouvent également dans des eaux similaires du Niger, de la Côte d'Ivoire et du Ghana.

- Les résultats de l'analyse en composantes principales montrent par la matrice de corrélation des différents éléments que dans les eaux souterraines l'ion chlore est bien corrélé au magnésium. Ce qui n'est pas le cas pour les eaux de surface pour lesquelles les deux éléments sont indépendants.

Les eaux chlorurées s'accompagnent également tant dans le bassin versant de la Sissili que dans les autres régions du socle cristallin de Haute-Volta de quantités appréciables de nitrates et d'ammoniaque.

Toutefois les graphiques de distribution de l'ion Cl^- en fonction des teneurs en magnésium et nitrates indiquent que les relations qui lient les chlorures au magnésium ou les premiers aux nitrates ne sont pas linéaires, mais plutôt complexes dans les deux cas.

L'origine des chlorures ne doit pas être recherchée dans la nature pétrographique ou pétrochimique des roches contenant les eaux chlorurées, car comme nous l'avons déjà indiqué, il n'y a pas dans celles-ci plus de minéraux renfermant du chlore (apatite, par exemple) que dans les autres formations géologiques du socle cristallin de Haute-Volta ou des régions voisines.

Il est intéressant de se référer aux principes généraux de la classification géochimique des eaux dans laquelle il s'agit de trouver la relation existant entre la composition chimique et l'origine et le gisement des eaux tant superficielles que souterraines.

SCHOELLER (1963) écrit à ce propos qu'on peut traiter le problème de deux façons: " . partir des données chimiques et en déduire l'origine et le gisement des eaux; . partir de l'origine des eaux et de leur gisement et en conclure la composition chimique".

L'auteur poursuit en faisant remarquer que la première façon aboutit à des indéterminations, car de nombreux phénomènes, dont notamment l'hydrodynamique, l'influence du climat et des phénomènes modificateurs (dilution, concentration par évaporation ou par dissolution) peuvent intervenir pour altérer les relations directes entre la composition chimique des eaux, leur origine et leur gisement. Les influences climatiques et les phénomènes modificateurs conduisent selon SCHOELLER à des convergences chimiques par rapport auxquelles nous allons placer nos analyses et tenter d'expliquer d'où viennent les chlorures.

Convergences chimiques de concentration

Toutes les eaux en se concentrant tendent vers la séquence suivante: $r\text{Cl} > r\text{SO}_4 > r\text{HCO}_3 - r\text{Na} > r\text{Mg} > r\text{Ca}$ en raison de la solubilité relative des éléments dans l'eau. Cette séquence n'est pas connue au niveau des eaux que nous avons analysées. Par contre on dénombre 19 séquences différentes dont les plus fréquentes sont:

- $r\text{HCO}_3 - r\text{Na} > r\text{Ca} > r\text{Mg} > r\text{Cl} > r\text{SO}_4$ (27,27 %);

- $r\text{HCO}_3 - r\text{Na} > r\text{Mg} > r\text{SO}_4 > r\text{Cl}$ (23,64 %);

et $r\text{HCO}_3 - r\text{Na} > r\text{Mg} > r\text{Ca} > r\text{Cl} > r\text{SO}_4$ (10,91 %). Cette multiplicité des séquences est liée à la faiblesse généralisée de la minéralisation des eaux que nous avons analysées.

Convergences vers les types $r\text{Cl} - r\text{Na} - r\text{K} < 0$ ou $r\text{Cl} - r\text{Na} - r\text{K} > 0$ (indices alcalins négatifs ou positifs).

Pour 95 % des eaux analysées, l'indice alcalin est négatif. Les eaux à indice positif correspondent à celles chlorurées rencontrées dans les roches basiques. Ces résultats sont conformes à ceux de H. SCHOELLER (1934) qui trouve que les indices négatifs sont fréquents dans les eaux souterraines des régions arides, mais aussi dans les eaux souterraines issues des roches cristallines, telles que les granites et les basaltes. Nous n'avons pas rencontré d'eau chlorurée issue de granite au sens strict.

Convergences des eaux riches en HCO_3

Les concentrations pondérales en HCO_3 des eaux analysées varient énormément allant d'un minimum de 8 mg/l à un maximum de 495 mg/l, avec toutefois une moyenne de 159 mg/l qui permet de situer leurs caractéristiques dans celles des eaux souterraines d'origine atmosphérique comme c'est bien sûr le cas.

Convergences des rapports $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$

Le rapport $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$ est supérieur à 1 dans 65% des cas. Mais dans les eaux chlorurées, il est toujours inférieur à 1.

ORIGINE DES CHLORURES

Si en bien de points les données de nos analyses d'eau sont en accord avec les tendances de convergences chimiques de H. SCHOELLER, notamment en ce qui concerne les indices alcalins, il nous paraît nécessaire de nous référer à la classification de V.A. SOULINE (1948) et à l'interprétation qu'il donne des eaux chlorurées magnésiennes pour expliquer les teneurs élevées en chlorures de certaines de nos eaux. D'après S.A. SOULINE, les eaux chlorurées magnésiennes caractérisent des zones à circulation difficile, ainsi que des eaux de mers et d'océans. Dans notre cas, si nous examinons l'ensemble de nos eaux chlorurées, on constate que si dans bien des cas les ions chlore et magnésium sont associés (c'est ce qui ressort au niveau de la matrice de corrélation), il existe aussi des eaux magnésiennes sans chlorures et des eaux chlorurées sans magnésium. Ce qu'il faut surtout remarquer, en outre, c'est qu'il existe une caractéristique constante commune aux formations géologiques desquelles proviennent les eaux chlorurées: c'est le caractère argileux des altérites auxquelles donnent naissance ces formations.

Ce phénomène apparaît encore beaucoup plus nettement au niveau des analyses d'eau réalisées par J.P. FAILLAT (Tab.41) en Côte d'Ivoire où l'on voit les concentrations en chlorures croître avec la possibilité qu'offrent les diverses roches considérées à donner des altérites argileuses. Si les eaux chlorurées ne se rencontraient que dans les intrusions basiques en zone tectonisée on aurait pu penser à des remontées gazeuses magmatiques, mais l'ancienneté du jeu tectonique et la présence d'eau chlorurée dans les gneiss et la nature de l'eau (météorique) nous font écarter cette hypothèse.

A notre avis, les concentrations exceptionnelles en chlorures sont liées à la présence de recouvrement argileux sur le substratum. Recouvrement qui rend difficile les circulations d'eau en leur sein et même dans les parties fissurées du bed-rock qu'il colmate; d'où une surconcentration des chlorures et du magnésium par évaporation et dissolution qui fait évoluer les eaux vers un type chloruré magnésien qui correspond selon H. SCHOELLER à l'évolution chimique normale de toutes les eaux souterraines.

Au niveau du bassin versant de la Sissili, cette interprétation explique les différences de concentration en chlorures entre les eaux des puits de Walène et celles de Guiaro O.R.D. et de Guiaro chef prélevées toutes dans des amphibolites. A Walène, la proximité de la roche fissurée affleurant à 150 m au nord-ouest du puits indique que cet ouvrage reçoit ses eaux par infiltration directe à partir de la roche fissurée, non colmatée, puisque décapée. L'eau y lessive directement les amphibolites, sans traverser d'altérites d'où sa faible teneur en chlorures et sa concentration importante en magnésium.

La position du puits de Guiaro ORD indique par contre que l'essentiel de son alimentation provient des berges du marigot sud après une nécessaire percolation à travers des altérites argileuses recouvrant et colmatant la roche fissurée. Le puits du Chef de la même localité a plutôt une alimentation par descensus rapide à travers les alluvions du petit talweg sur lequel il est implanté, alluvions d'ailleurs drainées par le filon de quartz visible dans le puits.

Cette explication des concentrations en chlorures rencontrées est en accord avec les résultats des travaux de RAPP (1971) qui montre que comme la quantité d'eau diminue lors de l'infiltration, l'évapotranspiration conduit obligatoirement au niveau du sol, donc aussi de l'eau qui y percole, à une reconcentration en sodium et en chlorures, mais non en potassium.

C'est en effet ce que nous remarquons car, dans nos eaux riches en chlorures, il y a également un accroissement important des teneurs en sodium.

LES COMPOSÉS AZOTÉS

L'air atmosphérique avec 78 % de teneur en N est pratiquement en équilibre avec celui du sol qui en contient 79 à 81%. L'azote du sol peut provenir de l'air avec ou sans intermédiaire de l'eau de pluie, et de la matière organique vivante ou morte.

En fait le sol est pauvre en azote (0,5 à 2% de N), car la pluie apporte 0,1 à 22 mg/l de NH_3 , 0,03 à 12 mg/l de NO_3 et $2,5 \cdot 10^{-4}$ mg/l de NO_2 . L'azote est fixé par la matière organique et se retrouve sous forme de NH_4 , NO_2 , NO_3 et NO_2 gazeux (SCHOELLER, 1962).

LES NITRATES DES EAUX SOUTERRAINES

Ils ont plusieurs origines possibles:

- nitrates de synthèse industrielle (engrais);
- nitrates provenant d'oxydation de matières organiques liées aux activités humaines, agricoles ou urbaines;
- nitrates synthétisés dans le sol par dégradation microbienne (minéralisation puis nitrification) de la matière organique.
- des nitrates provenant de matières organiques contenues dans les schistes d'Amérique du Nord ont été également signalés (Colloque International sur l'Hydrogéologie Isotopique et la mise en valeur des ressources en eau Vienne Autriche - Septembre 1983).

Selon A. MARIOTTI (1983), toutes ces sources peuvent être différenciées en étudiant les variations de teneur en azote 15, seules ou en association avec d'autres paramètres isotopiques (3H) ou chimiques.

L'usage peu répandu des engrais dans nos régions d'étude nous amène à ne retenir pour les composés azotés de nos eaux que les deux dernières origines possibles.

Si les eaux que nous avons analysées renferment généralement peu ou pas de composés azotés, on note cependant que quelques unes d'elles présentent des teneurs appréciables en ammoniacque (jusqu'à 2,6 m/l dans les eaux du puits de Foubé centre et de Kalambaogo) et en nitrates (71 mg et 88 mg/l dans les eaux de Gorom-Gorom Hopital et de Borguiendé).

J.F. ARANYOSSY et al. (1983) qui trouvent des teneurs élevées en nitrates (80 mg/l) dans des eaux du bassin des Illemenden (Niger) lient ces composés azotés à la destruction d'un tapis végétal existant dans la région il y a 10 à 30 000 ans. Nous ne les suivrons pas dans cette explication, vu le mode de gisement des eaux, et la nature géologique des aquifères de nos eaux riches en nitrates, qui à notre avis conditionnent cette présence de composés azotés.

L'AMMONIAQUE

Il est produit dans le sol par un grand nombre de micro-organismes (SCHOELLER, 1962). Cette ammonification s'accompagne de production de CO_2 ; mais l'ammoniacque est vite oxydé à l'état niteux et nitrique, si bien que l'ammoniacque n'apparaîtra notamment que là où l'oxydation se trouve entravée.

Nous remarquons que pour nos eaux, ce sont celles chlorurées qui renferment non seulement les nitrates, mais aussi l'ammoniacque en quantité appréciable.

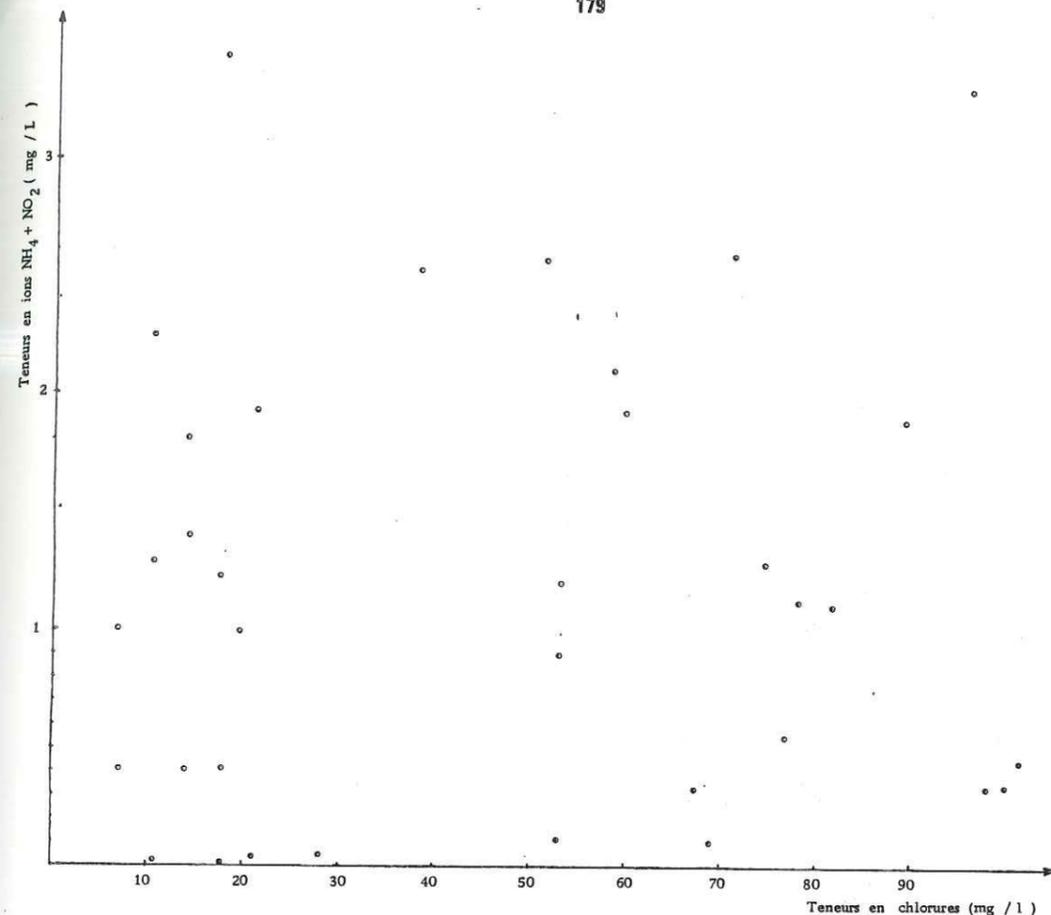
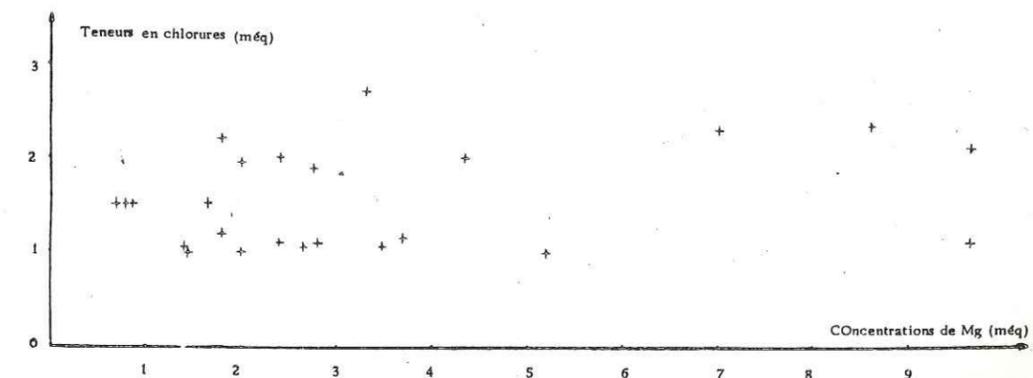
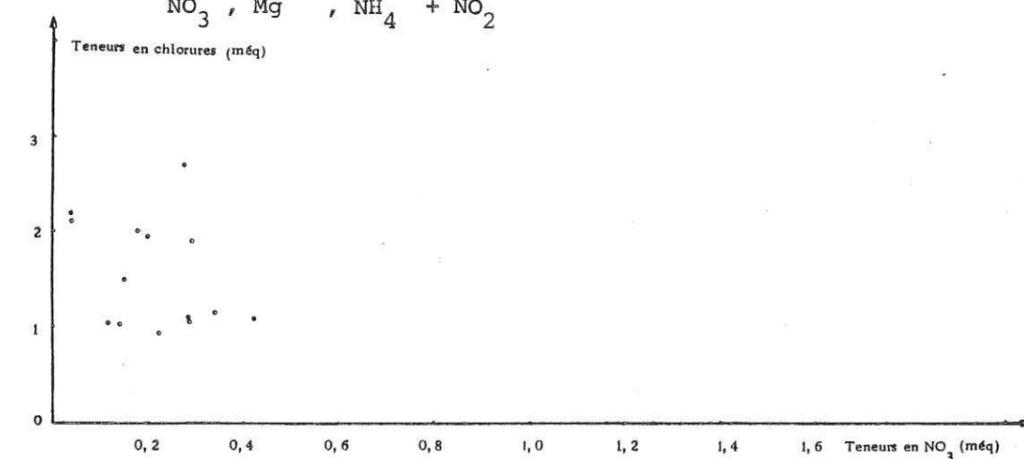


FIG. 51 : CORRELATIONS ENTRE LES TENEURS EN CHLORURES ET LES CONCENTRATIONS DES NO_3^- , Mg^{++} , NH_4^+ + NO_2^-

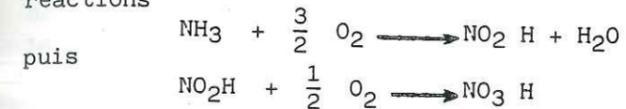


Nature du Substratum	Granites et granodiorites	Granites, granodiorites, schistes	Quartzites à biotites, schistes	Roches-vertes	Schistes
Ca ⁺⁺	1,0	1,50	2,30	1,30	0,12
Mg ⁺⁺	0,2	1,50	0,85	3,50	0,08
Na ⁺	1,0	0,80	2,50	0,60	1,52
K ⁺	0,10	0,10	0,15	0,20	0,08
Σ ⁺	2,30	3,90	5,80	5,60	1,80
Cl ⁻	0,04	0,1	0,4	1,0	1,50
SO ₄ ⁻	0,04	0,07	1,4	0,20	0,05
HCO ₃ ⁻	2,22	3,73	4,0	3,50	0,15
NO ₃ ⁻	0,01	0,01	0,01	0,90	0,10
Ca + Mg	2,0	3,0	3,15	4,80	0,20
Na/K	10	8	16,70	3,0	19
Mg/Ca	0,2	1	0,37	2,70	0,67
Na+K / Ca+Mg	0,92	0,30	0,84	0,17	8
Na+K / Ca	1,20	0,60	1,15	0,62	13,3
Na+K / Cl	27,50	9	6,60	0,80	1,07
Cl-(Na+K) / Cl	-26,50	-8	-5,60	0,20	-0,07
SO ₄ / Cl	1,0	0,70	3,50	0,20	0,03
NO ₃ / Cl	0,0	0,0	0,0	0,90	0,07
Nombres d'analyses	21	11	3	2	4

Tableau 41-Caractéristiques hydrochimiques des principaux types d'eau de COTE D'IVOIRE

J.P. FAILLAT (PICG, 1981)

Nous avons déjà expliqué les surconcentrations en chlorures en évoquant des difficultés de circulation des eaux dans des milieux colmatés par des argiles d'altération auxquelles donnent naissance les roches basiques, les schistes et les gneiss. On peut penser que la présence de la couverture argileuse rend certains de ces milieux peu aérés, et réducteurs. Ainsi, les réactions



qui se produisent, non pas successivement mais simultanément, avec comme aboutissement NO₃H prédominant ou seul présent dans le milieu, se font de façon inachevée faute d'oxygène. Ce qui permet d'obtenir la coexistence de trois composés azotés (NH₄, NO₂ et NO₃) chose qui aurait été impossible dans un milieu oxydant où la plus grande activité des ferments nitriques l'aurait emporté sur les ferments nitreux.

Nous pouvons lier la présence des composés azotés dans certaines eaux à des pollutions. C'est le cas notamment des eaux de Foubé centre, mais surtout de Guiaro O.R.D. dont les puits sont situés à proximité de tas d'ordure constituées surtout de cendres. Mais pour les autres prélèvements, on pourrait rattacher la présence des composés azotés (celle de l'ammoniaque en particulier) aux milieux à circulations difficiles à eaux chlorurées et réducteurs. Cette dernière condition n'étant réalisée que là où la couverture argileuse n'autorise pas l'aération des eaux d'infiltration, on comprend qu'il n'y ait pas de relation linéaire entre les teneurs en chlorures et celles des composés azotés comme nous le montrent le tableau et le graphique ci-après.

Néanmoins, la matrice de corrélation entre les différents paramètres analysés pour l'ensemble des eaux des formations du socle de Haute-Volta (p.) indique qu'après le calcium et le magnésium, NH₄ et NO₂ sont les plus liés aux chlorures, mais cette relation n'est pas simple (graphe).

Les eaux contenant ammoniaque et nitrites, si elles ne tirent pas leurs composés azotés de sources polluantes vont donc se rencontrer dans les roches basiques (amphibolites, dolérites, volcano-sédimentaires), les schistes et les gneiss dont les altérites argileuses les protègent de l'aération et permettent aussi leur surconcentration qui se réalise en même temps que celle des chlorures.

Nous retrouvons donc ici aussi un autre argument qui vient appuyer l'hypothèse d'une circulation latérale des eaux de réalimentation s'effectuant dans la roche fissurée et sous les altérites argileuses.

LE FER ET LES SULFATES

Des études géochimiques réalisées par GRANDIN (1973), il ressort lorsque nous comparons le chimisme des cuirasses à celui de la moyenne des roches ignées (CLARK et WASHINGTON, 1924) les points suivants:

- il s'est accumulé dans les cuirasses 5 fois plus de Fe₂O₃ et deux fois plus de MnO que les roches n'en contiennent;
- par contre, dans ces cuirasses on ne retrouve que la moitié des teneurs en SiO₂ et 7% des teneurs en (MgO + CaO + Na₂O + K₂O) des roches;
- les teneurs en Al₂O₃ sont peu différentes et celles de TiO₂ restent constantes;

- certains éléments en traces (V, Cr, Co, Ni, Cu) s'accumulent également dans les horizons cuirassés.

Tableau 42 - Composition chimique moyenne des roches et des cuirasses

N = 55		SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Perte au feu
Roches	\bar{x} roches étudiées (X)	63,12	15,36	1,84	3,75	6,15	0,08	0,70	2,80	2,27	2,99
	σ	3,75	2,04	1,84	2,78	4,31	0,07	0,60	1,53	1,54	2,12
	\bar{x} roches écorce terrestre (X) (1)	59,12	15,34	3,49	5,08	6,88	0,12	1,05	3,84	3,13	1,15
Cuirasses	\bar{x} cuirasses étudiées (X)	36,48	14,33	0,14	0,10	33,43	0,17	0,67	0,06	0,33	9,14
	σ	17,84	4,79	0,09	0,09	3,82	0,15	0,40	0,05	0,24	1,84
	\bar{x} 58 cuirasses Côte d'Ivoire (2)	34,00	15,75	0,33	0,15	36,07	3,09	0,71	0,15	0,43	9,52
σ	12,89	4,68	0,47	0,12	12,31	3,61	0,80	0,14	0,36	2,62	
N = 46		Sr	Ba	V	Ni	Co	Cr	Zn	Ga	Cu	Pb
Roches	\bar{x} roches étudiées (p.p.m.)	189	405	154	34	26	156	121	27	36	13
	σ	139	323	141	29	20	137	78	17	34	3
Cuirasses	\bar{x} cuirasses étudiées (p.p.m.)	10	131	487	43	32	265	25	29	53	17
	σ	9	110	173	31	28	143	29	14	47	17

(1) Moyenne des roches ignées (CLARCK et WASHINGTON, 1924). (2) GRANDIN (1973).

Les 136 analyses d'eau réalisées sur l'ensemble des formations du socle cristallin de Haute-Volta ont montré que les teneurs en fer étaient faibles dans les eaux souterraines (4 mg/l maximum). Ces concentrations indiquent que, bien que le fer soit abondant dans les horizons latéritiques du profil d'altération, celui-ci n'est pas remobilisable par les eaux d'infiltration dans les conditions climatiques actuelles.

Les sulfates sont peu abondants dans tous les types d'eau que nous avons rencontrés. Les faibles accroissements de leurs teneurs, par rapport à celle des eaux de pluie, montrent que les formations lessivées sont pauvres en minéraux sulfureux comme la pyrite.

En effet, nous avons déjà noté à propos des traces de minéralisation que, dans ces roches généralement stériles on ne pouvait observer que des cristaux automorphes de magnétite. Les indices de minéralisation (or natif d'alluvions, or natif de filons, minéral de cuivre, graphite) sont signalés autour du village de Kombo qui correspond à une zone sans ouvrage de captage d'eau.

LE CALCIUM ET LE MAGNESIUM

L'eau de pluie contient très peu de calcium, mais les teneurs de cet élément augmentent très vite dans toutes les eaux souterraines analysées sans qu'on puisse lier ce fait au phénomène de circulation difficile, évoqué plus haut. Le calcium peut provenir des plagioclases que nous avons retrouvés dans toutes les roches du bassin versant de la Sissili, avec bien sûr des taux d'anorthite variables d'un faciès à l'autre, et aussi des amphiboles.

Les concentrations en magnésium sont inférieures à celles en calcium, mais elles vont croître dans les eaux des roches basiques, à tel point que le rapport Ca/Mg devient inférieur à 1. Le magnésium provient de l'altération des minéraux ferromagnésiens: biotite, amphiboles et pyroxènes.

2.2.7.3.2.3. Apport de la chimie des eaux à la connaissance de la nature du substratum et du mode d'alimentation des nappes

Le chimisme de l'eau souterraine étant en rapport avec celui de la roche qu'elle lessive et baigne, ce fait va se traduire dans les eaux baignant des roches basiques comme les amphibolites de Walème, Guiaro, Saro, par des concentrations élevées en magnésium avec parfois un rapport $r_{Ca^{+2}}/r_{Mg^{+2}}$ < 1. Cependant la notion de relation entre chimie de l'eau et nature du substratum en appelle une autre qui apparaît nettement à l'examen de certaines de nos analyses d'eau, et qui est la notion de distance de circulation de l'eau dans la frange altérée et fissurée du substratum. En effet, bien que cette dernière notion soit difficilement quantifiable, on peut remarquer que pour des ouvrages situés dans des formations géologiques semblables, et c'est le cas des puits de Walème, Saro, Guiaro O.R.D., Guiaro Chef, les concentrations totales et celles en calcium et en magnésium en particulier varient beaucoup d'un ouvrage à l'autre. De tous ces puits cités, seul celui de Saro n'est pas un "puits parfait". Tous les autres ouvrages après avoir traversé une épaisseur variable de cuirasse latéritique, d'alluvions ou d'altérites argileuses ont atteint le bed-rock fissuré à moins de 10 mètres de profondeur et y ont été foncés sur 7 à 8 mètres. Les eaux baignent des amphibolites intrusives qui par contagion de l'encaissant ont pris un faciès granodioritique à Guiaro, alors qu'à Walème on a encore une amphibolite typique.

Nous avons déjà expliqué la reconcentration des chlorures par les difficultés de circulation. Mais, pour des ouvrages ayant le même type d'alimentation et des concentrations totales différentes en substances dissoutes, nous pensons qu'il faut faire intervenir la notion de distance de percolation, seule ou en association avec les difficultés de circulation. Y. TARDY (1969) a montré en étudiant les eaux de formations géologiques semblables aux nôtres au Nord de la Côte d'Ivoire que les concentrations en éléments mobiles (HCO₃, SiO₂, Na, K, Mg, Rb, Li, Ba, Sr) augmentaient avec la longueur du chemin parcouru, mais aussi avec la proximité du bed-rock sain. Ces relations, ajoute l'auteur, s'apprécient mieux pour les quatre ions principaux dans l'ordre croissant suivant: Na, K, Ca, Mg qui est aussi l'ordre croissant dans lequel ces cations sont préférentiellement liés aux argiles sous forme échangeable.

Si nous ajoutons aux critères de classification des eaux le taux de minéralisation, qui comme nous l'avons vu est bien fonction de la distance de percolation, ainsi que de la nature des formations géologiques traversées, on peut distinguer plusieurs types d'eau:

Localité	Cl	NH ₄	NO ₂	NO ₃	NO ₂ +NO ₃
Bangagou	17,73	0,00	0,00	5,33	5,33
Zountoega	10,64	0,02	-	0,68	0,68
Dori	21,28	0,04	-	8,31	8,31
Koubé	81,56	0,65	0,45	0,15	0,60
Mankarga II	17,73	0,18	0,23	3,22	3,45
Mankarga III	17,73	1,23	0	0	0
Borguiéndé	39,0	0,20	19,50	68,2	87,71
Djibo	67,37	0,32	-	1,84	1,84
Firguindi	95,74	1,12	2,07	16,99	19,06
Bissiga	17,73	1,43	1,98	5,21	7,19
Dympal-Tenga	53,19	0,11	-	3,78	3,78
Ganso	38,46	0,43	2,11	1,24	3,35
Nyankorodougou	7,09	0,07	-	1,04	1,04
Bossy-Boukary	21,28	1,80	0,13	18,60	18,73
Billy	14,18	0,18	0,23	2,48	2,71
Assinga	28,37	0,18	-	3,97	3,97
Gorom-Gorom-Hopital	21,28	0,09	-	70,69	70,69
Fada-N'Gourma-PTT	4,25	0,01	-	12,40	12,40
Tougan-Gendarmerie	7,09	1,08	-	0,31	0,31
Biédogo	17,73	0,99	0,09	0,68	0,77
Goundri	7,09	0,34	0,05	0,68	0,73
Katchirga I	69,15	0	0,1	12,50	12,60
Tiakané	14,2	1,34	0,05	2,50	2,55
Walème	10,6	1,24	0	0	0
Guiaro O.R.D.	74,5	1,24	0,1	2,6	2,7
Guiaro Chef	14,2	1,80	0,00	0,10	0,10
Konkioro	78,1	1,12	0,00	2,70	2,70
Diallo	53,2	1,12	0,09	0,1	0,19
Gabou	53,2	0,9	0,00	9,3	9,3
Foubé centre	71	2,56	0,3	6,2	6,5
Kalambaogo	51,5	2,56	0,0	1,60	1,60
Saro	10,6	2,24	0,3	0,06	0,36

Tableau 43 - Concentration (mg/l) en nitrates et en chlorures d'eaux issues de roches basiques

- Des eaux très peu minéralisées, qui sont celles dont la concentration totale en ions dissous est inférieure ou égale à celle de la moyenne des eaux de pluie et de surface, c'est-à-dire environ 3 méq./litre. Appartiennent à cette catégorie les eaux de Fyïn, Bihia, Mouna, Kouli, Tiakané. Toutes ces eaux ont été prélevées dans des nappes de la base de la cuirasse latéritique ou dans des puisards de bas-fonds exploitant des nappes alluviales. Ce qui permet dans tous les cas de lier la faible minéralisation à une percolation verticale sur de très faibles parcours (10 à 15 mètres) et dans des matériaux dont les éléments solubles ont pratiquement tous été déjà lessivés et évacués. Cette hypothèse est très bien confirmée par les teneurs en éléments dissous de l'eau de la source de Koumbri qui émerge à la base de la cuirasse ainsi que par l'eau du puits de Kossouka 2, qui est une eau de cuirasse noyée.

Ces deux derniers prélèvements ont été réalisés en avril 1983, afin de vérifier l'hypothèse concernant l'augmentation de la minéralisation en fonction de la distance de percolation et des horizons de percolation.

- Toutes les autres eaux, surtout celles dont la concentration totale en ions dissous est supérieure à 3,50 méq., sont moyennement minéralisées et portent la marque distinctive du chimisme du substratum et des phénomènes modificateurs pouvant agir sur elles, lors de l'infiltration, ou après qu'elles aient rejoint la nappe.

A propos de phénomènes modificateurs, il convient de noter surtout l'évapotranspiration. En effet, lorsque nous comparons les teneurs en substances dissoutes des eaux du bassin versant de la Sissili à celles des eaux de la région de l'Oudalan, on remarque que pour les mêmes conditions de gisement et de réalimentation, les secondes sont nettement plus minéralisées que les premières. L'eau de la mare d'Ounaré est par exemple la plus minéralisée de nos eaux de surface. En outre, la moyenne des teneurs totales en substances dissoutes dans les eaux de l'Oudalan, est nettement supérieure à celle de l'ensemble des eaux du bassin versant de la Sissili. Cette surconcentration est liée à la différence de température et d'humidité relative entre les deux régions qui, bien que faible lorsqu'on considère les moyennes annuelles est suffisante pour que l'évapotranspiration différentielle qui en résulte se traduise au niveau des eaux par une élévation appréciable des teneurs totales en ions dissous.

Dans l'Oudalan, on remarque même que l'eau du toit des nappes est plus minéralisée que celle des parties profondes à cause de la surconcentration superficielle par évapotranspiration. On observe ce phénomène au niveau des eaux des puits et des forages des villages d'Ounaré et de Bam-ga où l'eau des forages sollicitée par des pompes aspirant en profondeur est moins minéralisée que celle des puits, quand bien même il s'agit de puits-forage comme à Ounaré où l'intercommunication des deux ouvrages réalisée par l'U.F.C. aurait permis de penser qu'il y avait un bon mélange des eaux.

On peut grâce à la chimie des eaux faire nettement la différenciation entre roches aquifères riches en ferromagnésiens et roches acides pauvres en minéraux sombres. Le cadre géologique local permet de préciser la nature pétrographique exacte des roches en présence en partant de la chimie des eaux. Un exemple démonstratif de ce cas est celui qu'offre le village de Foubé: ici la différence de chimisme entre les eaux du puits de Foubé-centre proche de la mosquée et celles du puits de l'école est significative.

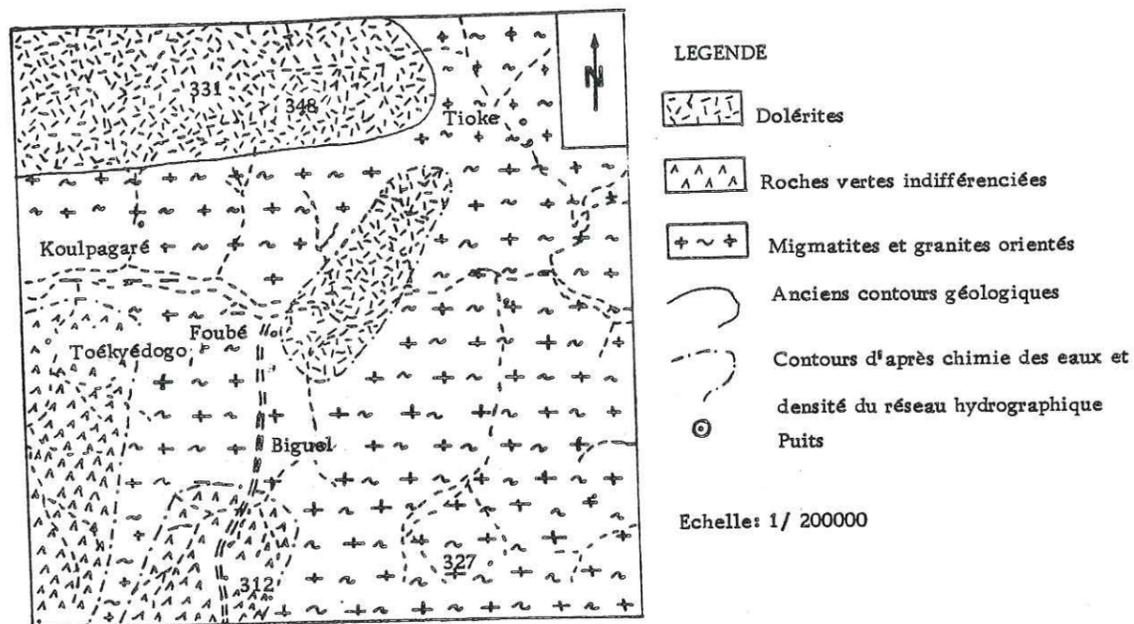


Figure 52
Carte géologique des environs de Foubé modifiée d'après les données de la chimie des eaux, des résultats des forages récents, et des affleurements rencontrés

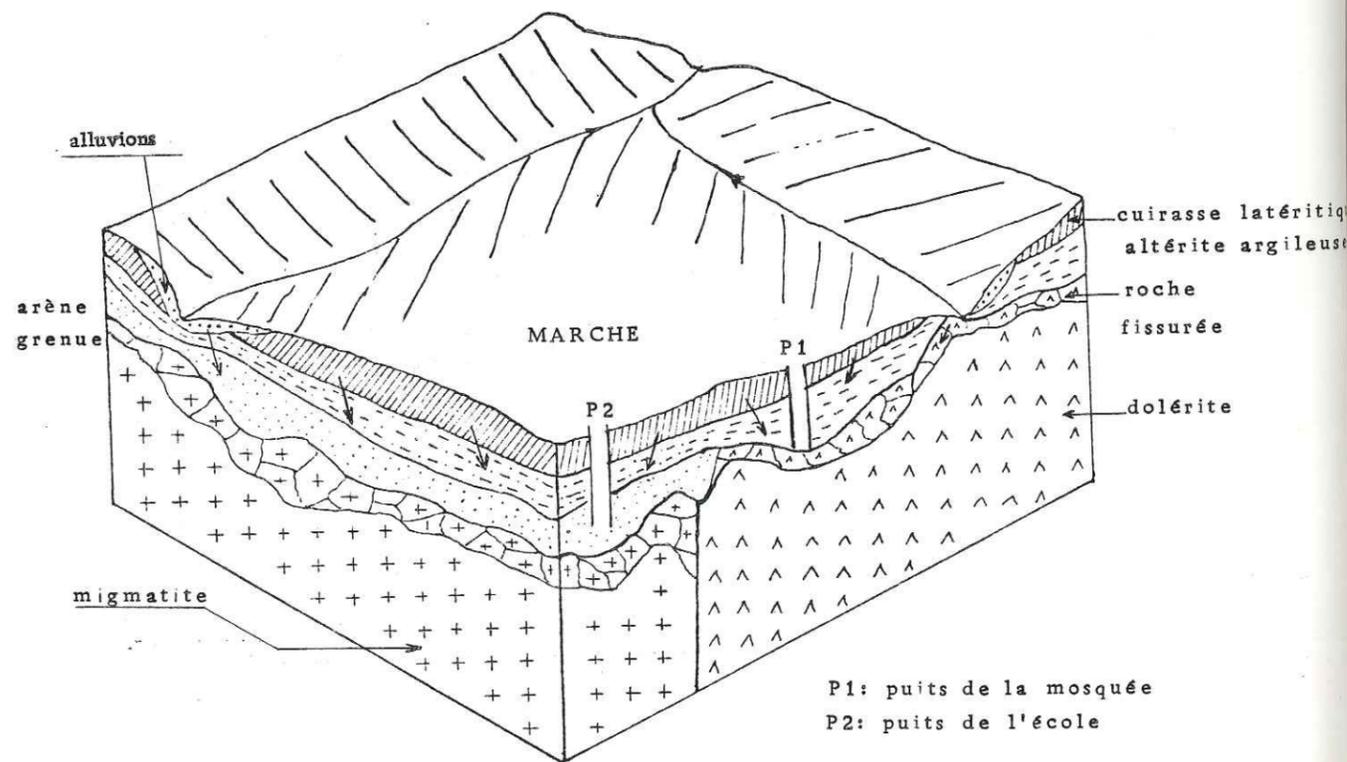


Figure 53
VILLAGE DE FOUBE : GÉOLOGIE ET CIRCULATION DES EAUX

Teneurs en méq.	1/R	Ca	Mg	Na	K	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca/Mg	Na/K	Na/Cl	Σ ⁺⁻
Foubé Centre	576	0,32	4,36	4,32	0,04	2,00	0,23	7,20	0,07	108	2,16	18,47
Foubé Ecole	210	1,42	0,51	0,68	0,08	0,19	0,04	2,46	2,78	8,50	3,57	5,38

Le mode d'alimentation du premier ouvrage ainsi que la nature de la roche que lessive son eau peuvent se déduire des caractères magnésien et chloruré de l'eau. L'eau du puits de l'école est par contre peu minéralisée et ne contient que peu de chlorures et de magnésium. On voit que les deux types d'eau ont des aquifères respectifs de roche basique et de roche acide. Cette déduction faite à partir de la chimie des eaux est confirmée et précisée par l'existence de pointements de dolérite dans le talweg Est du village où devrait s'infiltrer l'eau alimentant le puits de la mosquée auquel elle parvient après avoir circulé dans la dolérite fissurée et partiellement colmatée, et par le forage réalisé près de l'école qui y a rencontré des migmatites.

La cartographie géologique locale peut donc être précisée en ajoutant au document à l'échelle 1/200 000 existant l'intrusion de dolérite dont on sait maintenant grâce à la chimie des eaux que la limite passe entre le puits de la mosquée et celui de l'école à peine distants de 200 mètres.

2.2.7.3.2.4. CONCLUSIONS

De l'étude de la chimie des eaux souterraines du bassin versant de la Sissili, comme de celle de l'ensemble des formations cristallines de Haute-Volta ressortent plusieurs notions:

- Premièrement, la minéralisation totale est en rapport direct avec la distance de percolation et aussi avec la nature géologique des formations traversées: ainsi les eaux qui ne traversent que la cuirasse ou les alluvions dont les substances solubles ont déjà été lessivées et évacuées présentent des concentrations totales faibles (Koumbri-source, Kossouka 2, Fyin, Mouna, Kouli, Niliri). Par contre, les eaux ayant circulé dans la roche fissurée ou dans ses horizons de décomposition inférieurs, seront de plus en plus minéralisées. Cette minéralisation sera plus élevée dans les roches basiques où les circulations sont rendues difficiles par des altérations argileuses qui colmatent partiellement la frange fissurée du bed-rock. Ces phénomènes circulation/minéralisation sont en parfaite concordance avec le mode de gisement des eaux souterraines dont nous avons déjà parlé.

- Deuxièmement, du point de vue qualitatif, on retient que dès lors qu'il y a accroissement de la minéralisation totale par rapport à ce qu'elle est dans les eaux de pluie et de surface, celle-ci devient de plus en plus marquée par le chimisme propre de la roche traversée qu'elle permet d'identifier. Ainsi:

. les eaux bicarbonatées sodiques se rencontrent dans les altérites des formations granitiques à orthose ou microcline et biotite (PO 1, zone 1, zone 2, Léo-Diasso);

. les eaux bicarbonatées calciques dans des schistes argileux tuffacés ou calco-chloritoschistes des sillons éburnéens (Gangaol, Ankouna), dans des gneiss (Bam-ga, Tim-agadel, Zone 5 du ranch de Léo);

. les eaux bicarbonatées magnésiennes et chlorurées sont le propre des formations basiques: dolérites, amphibolites, diorites et gneiss peu évolués (Guiaro, Saro, Songodin, Foubé centre et Dialo);

Lorsque l'on trouve des eaux fortement minéralisées, même si elles ont été prélevées à la base de la cuirasse, celles-ci proviennent d'une remontée ou d'une circulation latérale des eaux à travers la frange fissurée du substratum.

2.2.7.4. ETUDE ISOTOPIQUE DES EAUX

2.2.7.4.1. INTRODUCTION

L'étude du comportement piézométrique sur plusieurs sites, des nappes du bassin versant de la Sissili (SAVADOGO N.A., 1974-75) avait mis en évidence des fluctuations parfois importantes des niveaux statiques au cours de l'année. Dans les études hydrogéologiques du ranch d'embouche de Léo auxquelles nous avons été associé, il s'averait prudent, étant donné que la zone d'implantation était non peuplée et manquait d'ouvrages qui auraient permis de suivre l'évolution des nappes, de recourir à la géochimie isotopique pour contrôler leur mode de réalimentation. Le fait que dans les eaux de forage de la zone 5 du ranch il n'y avait pas de tritium, donnait à ces eaux un âge d'au moins 25 ans. On avait donc des eaux anciennes, dont l'exploitation pouvait amener l'épuisement s'il n'y avait pas de possibilités d'apport.

Le bassin de la Sissili étant situé au Sud de la Haute-Volta, donc dans l'une des régions les plus arrosées du territoire voltaïque, le fait d'y découvrir des eaux anciennes posait aussi logiquement le problème de la réalimentation des nappes de la partie nord du pays. Et cela d'autant que la courbe de corrélation: précipitation/déficit d'écoulement (à laquelle sont conformes les données obtenues sur le bassin versant de la Sissili par calcul) indiquait une absence d'infiltration en dessous de 400 mm de précipitations (LEMOINE et ARCHAMBAULT cités par LELONG, 1966). Nous avons donc multiplié les analyses isotopiques, tout en les étendant à l'ensemble des régions à socle cristallin de Haute-Volta et notamment à la zone sahélienne du Nord (Oudalan) afin de pouvoir apprécier partout l'état de renouvellement des eaux des nappes souterraines de l'ensemble du socle. Les premières mesures de teneurs en tritium furent faites au Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble (C.E.N.G.), puis à partir de 1978 au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon.

2.2.7.4.2. RAPPEL DE PRINCIPES

Les isotopes du milieu utilisés en hydrogéologie sont des isotopes naturels et/ou artificiels. De ceux-là, sont le carbone-13, le carbone-14, le deutérium, l'oxygène 18 et le tritium. Dans ce qui va suivre il sera surtout question du tritium et de l'oxygène 18 qui sont les deux seuls isotopes dont nous avons mesuré les teneurs tant dans les eaux de pluie que dans les eaux des nappes souterraines du socle cristallin de Haute-Volta.

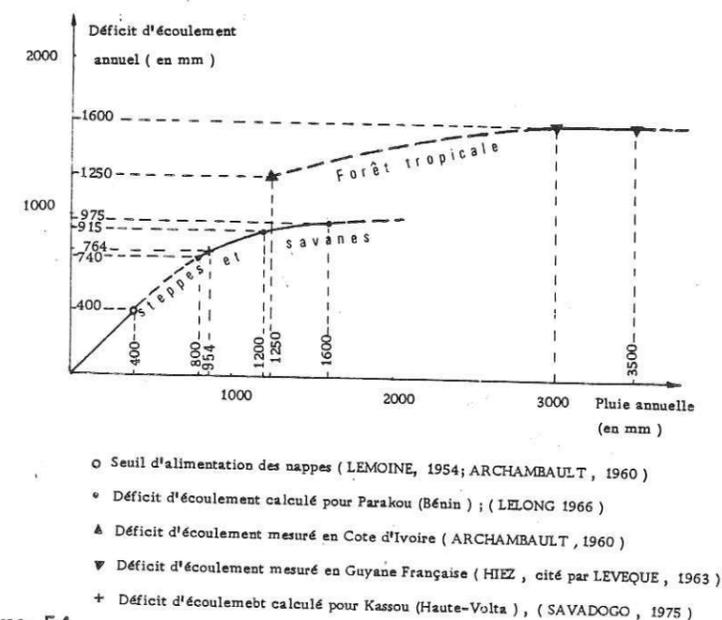


Figure 54

RELATION ENTRE LA HAUTEUR PLUVIOMETRIQUE ET LE DEFICIT D'ECOULEMENT ANNUELS (en mm)

Le tritium

Il a deux origines:

Naturelle: le tritium naturel provient du bombardement de l'azote N-14 par des neutrons induits par le rayonnement cosmique selon la réaction:



Ces réactions ne sont cependant pas nombreuses et le taux de production atmosphérique moyen est estimé à 25 atomes/cm²/s (LAT et SUESS, 1969) ne fournissant à toute l'atmosphère que 3 kg environ de tritium. Les teneurs de tritium naturel sont donc faibles et difficilement utilisables dans les études hydrologiques. Le tritium est injecté dans l'atmosphère par les jet stream avec un pic estival.

Artificielle: les essais thermonucléaires réalisés depuis 1952 ont injecté dans l'atmosphère plus de 200 kg supplémentaires de tritium produit suivant la réaction:



En Afrique occidentale, les stations de Bamako et de Sao-Tomé ont enregistré deux importants pics isotopiques de tritium de 1100 et 500 unités tritium en 1964 et 1966. (Rappelons qu'une unité tritium correspond à 1 atome de tritium pour 10¹⁸ atomes d'hydrogène et à une radioactivité de 3,28 x 10⁻¹² Ci/l)

L'oxygène 18

Il constitue un des isotopes stables de l'oxygène dont les proportions sont les suivantes:

$$\begin{aligned} {}^{16}\text{O} &= 99,763 \% \\ {}^{17}\text{O} &= 0,0375 \% \\ {}^{18}\text{O} &= 0,1995 \% \end{aligned}$$

Les teneurs en isotopes stables sont exprimées par rapport à un étalon de référence le S.M.O.W. (Standard Mean Ocean Water) qui représente la composition isotopique de la masse d'eau océanique.

Propriétés du tritium et de l'oxygène 18 permettant leur utilisation en hydrogéologie

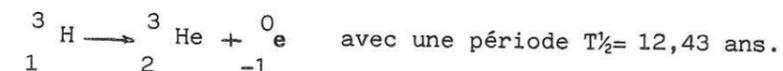
Le tritium: C'est un isotope radioactif dont les teneurs sont soumises à la loi générale de la décroissance radioactive.

$$t = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \ln \frac{A_0}{A_t}$$

avec

$$\begin{aligned} T_{1/2} &= \text{demi-vie ou période} \\ A_0 &= \text{activité initiale} \\ A_t &= \text{activité en temps } t \end{aligned}$$

Pour le tritium la décroissance se fait alors selon la réaction:



Le tritium de l'atmosphère est oxydé et incorporé aux molécules d'eau sous la forme HTO, où il se comporte comme marqueur des précipitations.

L'utilisation des teneurs en tritium dans les eaux de précipitations comme fonction d'entrée en matière de traçage permet d'étudier des mélanges et donc aussi l'importance des réserves par rapport aux infiltrations (FONTES, 1976 et S. et J. SARROT, 1981), et aussi le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère lorsque celle-ci s'écoule avec un exutoire connu (TRON, MARCE, OLIVE, SARROT REYNAULD et JAMIER, 1975).

Nous utiliserons le tritium pour la connaissance du mode d'alimentation des nappes par l'identification des mélanges en admettant comme critères ceux proposés par FONTES (1976):

- . 0 à 2 UT: contribution insignifiante de tritium thermonucléaire depuis son injection dans l'atmosphère, c'est à dire à composante essentielle ancienne et antérieure à 1952;
- . 5 à 15 UT: l'eau prélevée représente un mélange entre de l'eau ancienne et des apports récents;
- . 20 à 50 UT: l'eau comporte une dominante contemporaine, c'est à dire postérieure à 1970.

La teneur en tritium de l'eau de pluie recueillie à Ouagadougou en 1981, indique par rapport à la concentration de 1975 une baisse correspondant à l'effet de la décroissance et de l'arrêt des essais aériens sur les concentrations en tritium; et il est important dans l'analyse des résultats d'en tenir compte.

L'oxygène 18

Les teneurs en oxygène 18 des précipitations dépendent de la température des précipitations, de l'altitude mais aussi de l'éloignement du point de chute des pluies par rapport à la mer (FRIEDMANN, 1964 - MOSER et STICHLER 1970).

Parmi les auteurs ayant suivi les effets du premier facteur, tant sur les teneurs en tritium que sur celles de l'oxygène 18, on note que FONTES et al. (1976) ont trouvé pour le Mont Cameroun un gradient de -0,16 ‰ par 100 mètres.

L. TRON et al. (1975) qui ont suivi les variations des teneurs en O¹⁸ dans le bassin versant de Saint-Genis (Hautes-Alpes) y trouvent un gradient de 1 ‰ pour 220 mètres. C'est dire que le gradient peut varier beaucoup d'une région à une autre selon le climat.

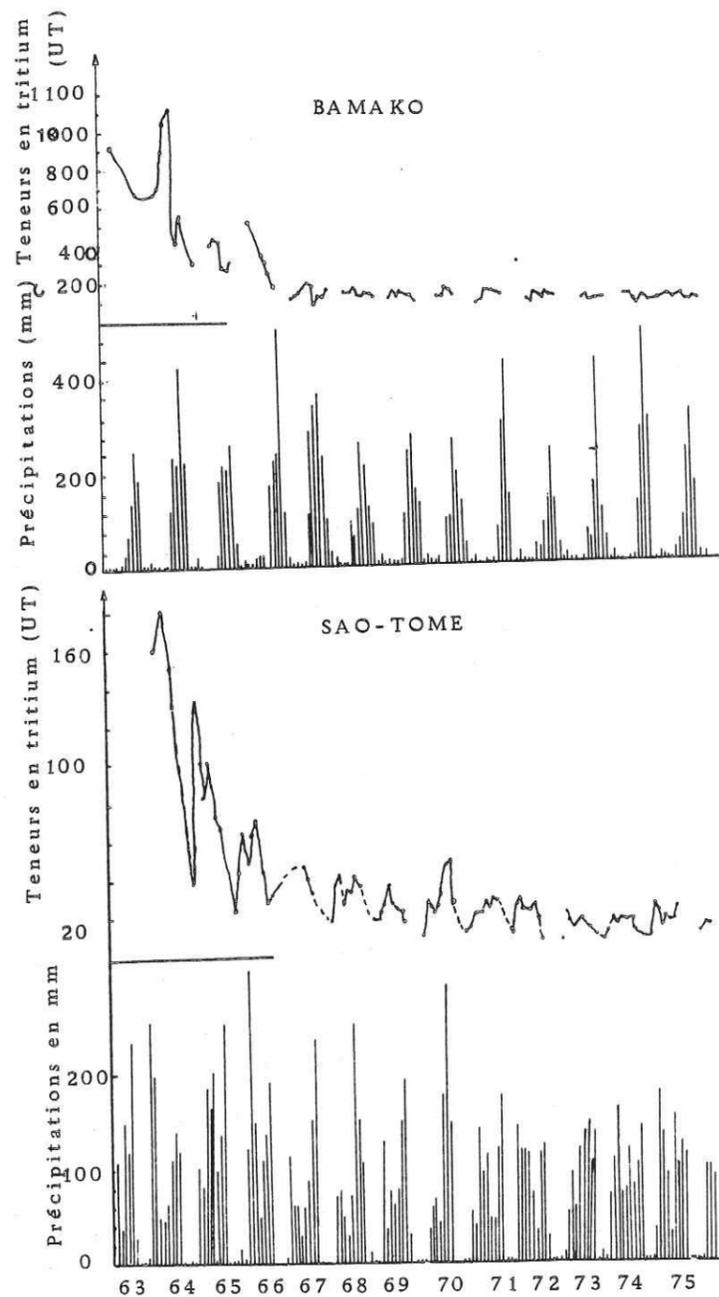


Figure 55
Les variations des teneurs en tritium dans les eaux des précipitations
à Bamako et à Sao-Tomé

2.2.7.4.3. ANALYSE DES RESULTATS

LE TRITIUM

Teneurs en tritium dans les précipitations à Bamako

(Pour comparer les résultats d'analyses en tritium des eaux souterraines à celles des eaux de pluie, nous utilisons les données enregistrées à la station de Bamako et publiées par l'A.I.E.A.)

Tableau 44

	JUILLET		AOÛT		SEPTEMBRE		P. Ann P	Moy.A TU	% de P des 3 mois	Moy.TU des 3 mois
	P	TU	P	TU	P	TU				
1972	143	67	236	105	133	81	738	86	69,38	84,33
1973	168	57	425	56	115	56	869	56,9	81,47	56,33
1974	282	42	484	57	294	55	1233	54,2	85,97	51,33
1975	233	65	317	38	169	36	905	49,4	79,45	46,33

Les données du tableau ci-dessus montrent que si les concentrations en tritium dans les précipitations varient d'une année à l'autre, voire d'un mois à l'autre, les teneurs moyennes annuelles en tritium des eaux météoriques restent voisines de celle de la moyenne des précipitations des mois de Juillet Août et Septembre pendant lesquels tombe la plus grande partie des pluies annuelles.

Les teneurs en tritium de l'eau de pluie qui rejoint la nappe pendant la saison pluvieuse peuvent donc nous permettre en les utilisant comme fonction d'entrée d'apprécier l'importance des apports pluviométriques aux eaux des nappes aquifères dès lors que ces eaux se mélangent.

La première remarque qui s'impose lorsque nous comparons les teneurs en tritium des eaux du bassin versant de la Sissili à celles des eaux de l'Oudalan, est que les premières sont nettement inférieures aux secondes. Déjà en 1978, les différences de concentrations entre l'eau du forage de Kayero (48 UT) provenant directement d'infiltration à partir des berges du marigot voisin et celle des ouvrages de captage de Pô et de la zone C du ranch Léo (16 et 33 UT) nous permettaient de dire que dans les deux derniers ouvrages l'eau de pluie se mélangeait à des quantités importantes d'eaux antérieures. Cette explication reste valable surtout après qu'on ait pu déceler au niveau de la zone 5 du ranch de Léo de l'eau qui, dépourvue de tritium en 1975 et 1978 a montré en 1980 une teneur de 6 UT. La baisse constante du niveau piézométrique du forage de cette zone constatée entre 1975 et 1979 a montré que la nappe ne subissait pas ici de fluctuations saisonnières comme c'est généralement le cas dans les autres secteurs du bassin versant de la Sissili. Le fait que l'eau devienne légèrement tritiée en 1980 est en parfaite concordance avec les variations des précipitations annuelles suivies à Léo.

Précipitations tombées à Léo de 1976 à 1980

Tableau 45

Année	1976	1977	1978	1979	1980	1981
Précipitation	832,7	843,7	625,8	1210,6	912,8	

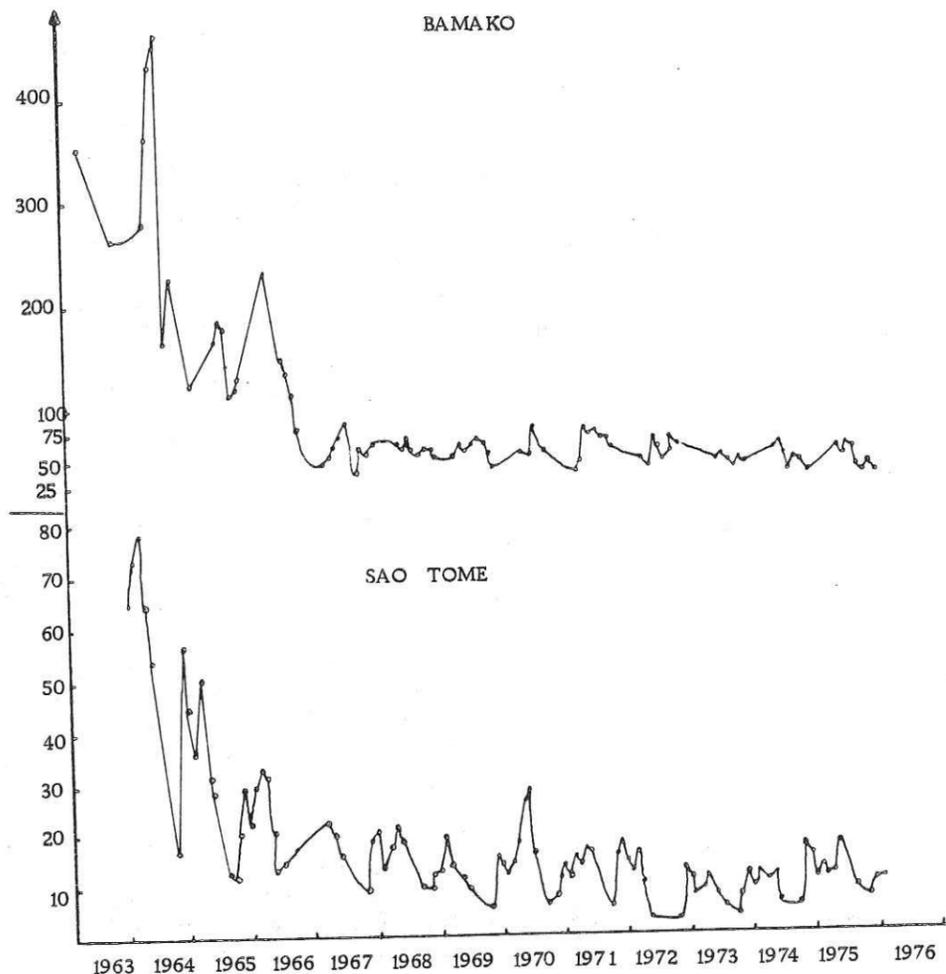


Figure 56 Teneurs en tritium (corrigees pour la décroissance jusqu'en 1978) dans des eaux de pluies provenant de Bamako et de Sao-Tomé.

Variations des niveaux piézométriques et des teneurs en ³H dans la zone 5 du ranch de Léo

Date	1977		1978	1980			1981	
	25/4	20/5	2/2	13/3	26/8	10/12	2/3	25/5
Niveau piézo. (en m)	15,64	16	18,30	19,20	20	20	20,05	20,10
Teneur en ³ H (en UT)	0		0		6			

La nappe n'a reçu de l'eau tritiée que lors de l'année 1979 largement excédentaire pour toute la décennie 1971-1980. Ces faits indiquent d'une part que la nappe n'a pas une alimentation per descensum (autrement son niveau aurait monté à chaque saison pluvieuse) mais qu'elle reçoit des apports latéraux qui lui arrivent par débordements successifs de seuils amont; d'autre part que l'eau de 1979 est venue se mélanger à d'importantes quantités d'eau ancienne vu que la teneur en tritium induite reste faible (6 UT). Cette explication est du reste appuyée par l'accroissement de la concentration en ions dissous entre 1975 et 1981 (cf. Chimie des eaux) qui indique que les apports n'ont pas été suffisants pour diluer l'eau ancienne surconcentrée par évapotranspiration au point d'en abaisser la concentration. On remarquera, en outre, que si le niveau piézométrique s'est rehaussé puis stabilisé en 1980, il n'a plus jamais atteint sa hauteur de 1975 qui était à 16 mètres de profondeur.

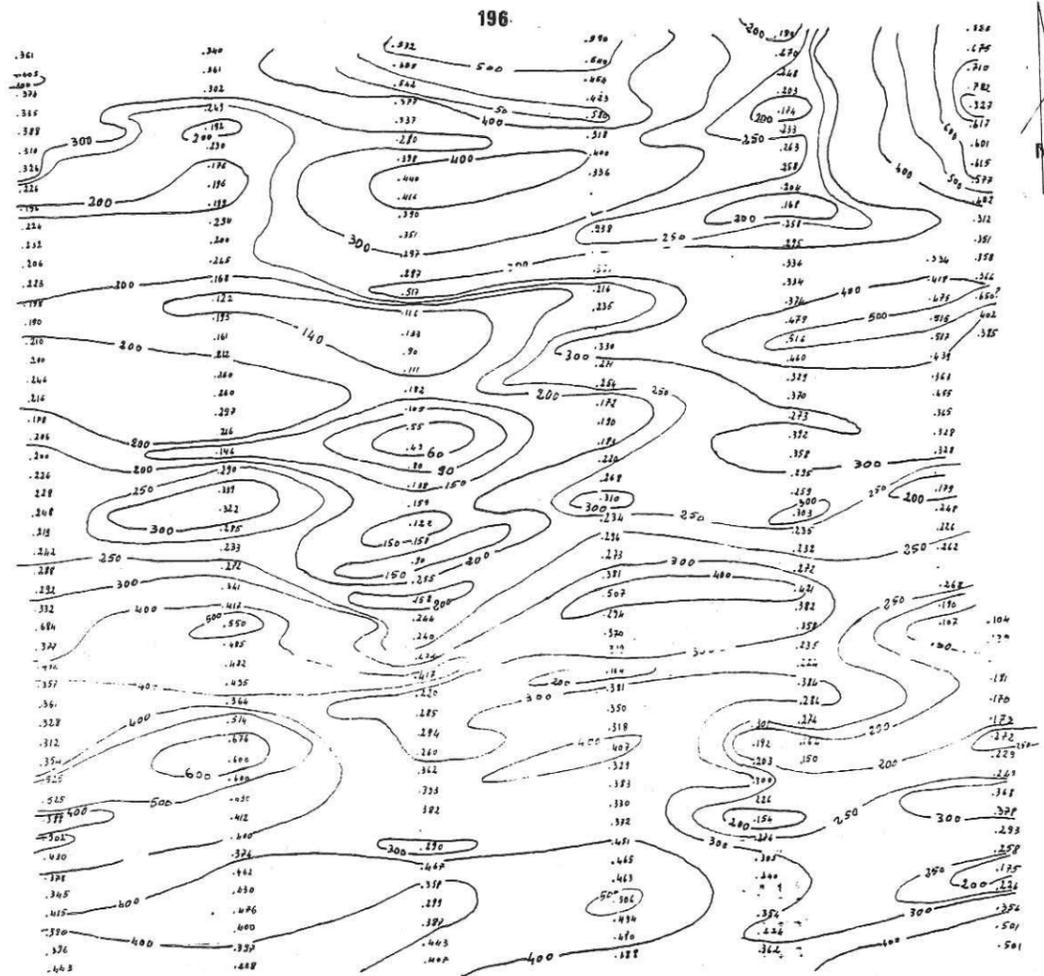
La carte de résistivités apparentes, puis le relief simulé à partir de celle-ci met en évidence l'existence des seuils et les directions possibles des apports. Dans ce type de mode d'alimentation qui doit être fréquent pour les zones d'interfluve, les eaux de pluie provenant des berges des marigots et circulant dans la zone fissurée se mélangent bien aux eaux préexistantes.

Lorsque les eaux ne se mélangent pas bien, les essais de pompage recueillent des eaux inégalement tritiées qui correspondent aux réponses des différents niveaux stratifiés des eaux de l'aquifère. C'est ce que montrent les données des essais de pompage réalisés par le C.I.E.H. et Géohydraulique en 1978 à Moghtédo et à Zigla.

Les teneurs en tritium des eaux que nous avons prélevées indiquent que les meilleurs mélanges se rencontrent dans les zones d'interfluves et les eaux encore stratifiées aux abords des bas-fonds. C'est ce qu'illustrent les eaux de Bam-ga et de Salmossi, dans lesquelles on a des teneurs différentes en tritium en fonction de la profondeur de prélèvement.

Type ouvrage	0		30		60		120		1050		2400	
	S	UT										
Forage d'essai	-4,55	46	-4,69	47	-4,64	42	-4,40	52	-4,38	50	-4,68	47
Piézomètre n°1	-4,84	48	-4,42	37	-4,53	34	-4,81	46	-4,44	56	-4,73	-
Piézomètre n°3	-4,84	41	-4,81	47	-	-	-4,79	50	-4,88	41	-4,52	-

Tableau 47 - Variations des teneurs en tritium et en oxygène 18 (au cours d'essai de pompage à Moghtédo et à Zigla) -C.I.E.H.- Géohydraulique 1978 -



ZONE 5 DU RANCH DE LEO: CARTE DE RESISTIVITES APPARENTES
(AB= 180m, MN = 20m, pas de mesure = 20 m)

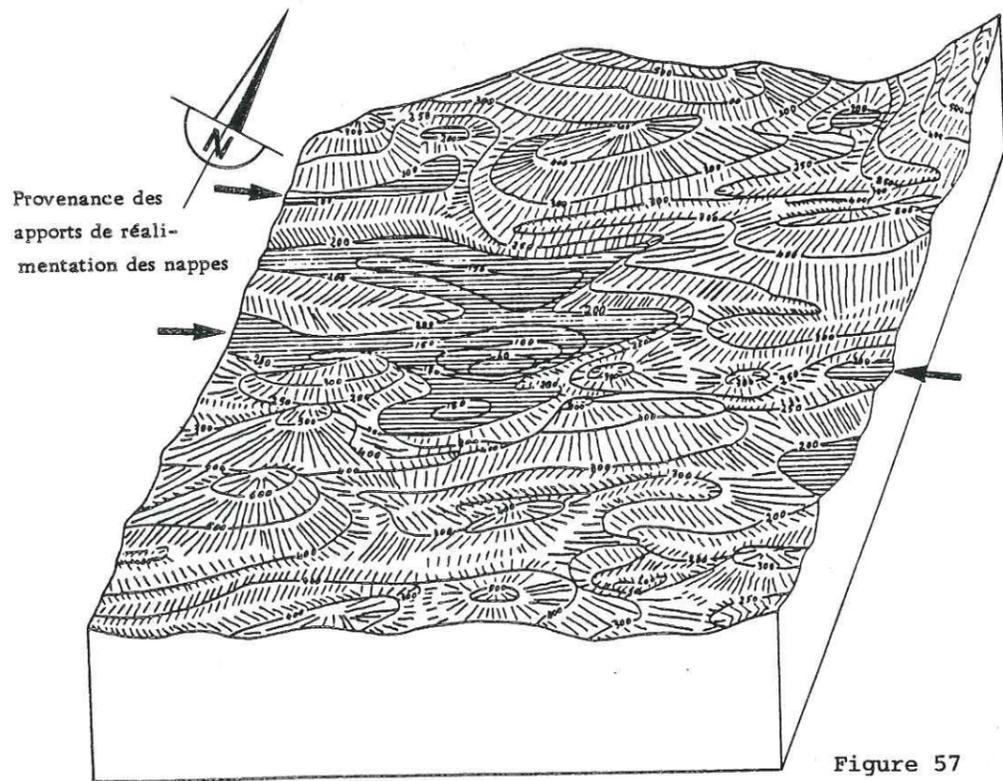


Figure 57

BLOC-DIAGRAMME MONTRANT LE RELIEF DU BEDROCK DE LA ZONE 5 DU RANCH DE LEO

LOCALITE	Longitude	Latitude	Teneur en 3 H	Teneur en 18 0	Date	Ouvrage	Niveau statique (m)
Léo	2°16'20" W	11° 6' 9" N	5	- 5,51	12/80	Forage	
Zone 5	1°54'30" W	11°14'47" N	6	- 5,68	12/80	Forage	20
Nébou	1°52'30" W	11°18'42" N	6	- 5,30	12/80	Forage	
Tabou	2° 9'37" W	11°21'12" N	8	- 5,68	12/80	Puits	9,5
Gao	2°10'53" W	11°38'54" N	21	- 5,19	12/80	Puits	15
Pô	1° 8'41" W	11°10' N	16		12/78	Puits	16
Zone 6	1°57'27" W	11°18'42" N	33		12/78	Forage	17
Kayero	2° 5'17" W	11°13'48" N	46		12/78	Forage	7
Kossouka	1°53'19" W	13°23'43" N	7		1/82	Puits	18
Banga	0° 4'27" W	13°52'43" N	48	- 5,45	12/80	Puits	16,7
Tin-Agadel	0° 2'77" W	14°29'14" N	29	- 5,09	12/80	Forage	
Charam-Charam	0° 4'43" W	14°30'13" N	48	- 3,92	12/80	Puits	21,20
Ounaré	0° 7'43" W	14°32'50" N	27	- 4,70	12/80	Puits	12,8
Salmossi	0° 3'31" W	14°33' 8" N	31	- 0,18	12/80	Puits	11
			29	- 1,88	12/80	Puits	9,00
Béiga	0° 7'20" W	14°36'24" N	42	- 1,08	12/80	Forage	8,60
Ouaga pluie			42	- 1,88	12/80	Puits	14,5
Nogtédo	0°50'17" W	12°16' 5" N	23		9/81	Pluie	
Ziglas			47	- 4,55	11/78	Forage	
			30		11/78	Forage	

Tableau 48

TENEURS EN TRITIUM ET O¹⁸ DES EAUX SOUTERRAINES DEPUIS 1975 EN HAUTE-VOLTA

Ouvrage	0		60 mn		120 mn		1440 mn		2250 mn	
	S	UT	S	UT	S	UT	S	UT	S	UT
Forage d'essai			-4,47	12	-4,47	15	-4,80	27	-4,39	28
Piézomètre n°1			-4,47	22	-4,52	17	-4,32	27	-4,38	26
Piézomètre n°2	-4,62	31	-4,49	36	-	-	-4,36	17	-4,28	43
Piézomètre n°3	-4,29	15	-4,09	17	-4,17	14	-4,15	15	-4,39	18

-Zigla-

Tableau 49

On peut donc interpréter l'homogénéité des teneurs en tritium et en oxygène 18 comme le signe de bon mélange, mais aussi comme une caractéristique des eaux ayant circulé relativement longtemps dans la zone fissurée du bed-rock. En effet, dans les eaux des régions du Nord de la Haute-Volta, les différences de teneurs entre les parties supérieure et profonde de l'eau des mêmes nappes (eau de Bam'ga, Salmossi) indiquent qu'il y n'y a pas mélange lorsque dans le mode d'alimentation c'est la composante verticale qui prédomine. Nous avons remarqué le même cas à Kayero en 1978.

Ce qui nous paraît plus important dans les résultats obtenus grâce à la chimie isotopique c'est l'éclairage qu'ils apportent sur le mode de circulation des eaux infiltrées, mais aussi la preuve que même dans le Sahel il y a infiltration et réalimentation des nappes. Les différences de teneur entre l'eau de la base et du toit des nappes montrent que les réserves se renouvellent au moins partiellement d'une année à l'autre même pendant les périodes de sécheresse. Néanmoins si, dans ces zones à faible pluviométrie, l'organisation des perméabilités induites est la même que dans le bassin versant de la Sissili étudié à cet effet (cf. Fracturation et perméabilités induites), il importera pour les implantations des ouvrages d'exploitation des eaux souterraines, soit de se rapprocher des marigots et bas-fonds, soit de retenir des fractures recoupant ces derniers pour en tirer une alimentation directe. Ici, il apparaît clairement qu'une zone occupant la même position que la zone 5 du ranch de Léo serait restée sèche après épuisement de ces eaux anciennes.

Les infiltrations restent cependant très importantes dans les régions nord de la Haute-Volta par rapport à ce qu'elles sont au Sud.

Elles se traduisent par un déficit d'écoulement relativement élevé et qui s'explique comme nous l'avons dit (cf. Etude comparée des bilans de la Sissili et du Goroual) par la géomorphologie de lacs et de dunes caractéristique de cette région.

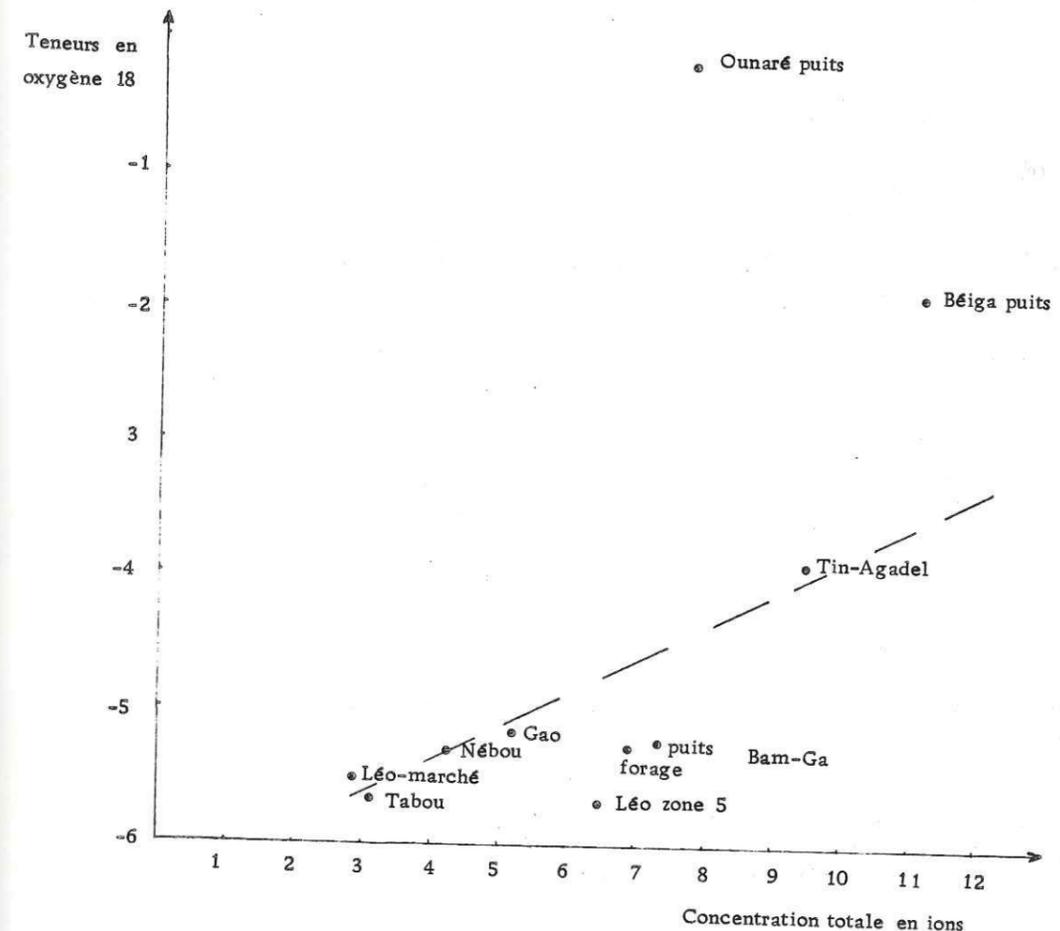
On peut donc dire que la limite critique de précipitations annuelles déterminée par LEMOINE (1954) et ARCHAMBAULT (1960), et en dessous de laquelle il n'y a plus d'infiltration, n'est pas valable pour le Nord de la Haute-Volta.

Les quantités d'eau infiltrée peuvent varier d'une région à une autre, voire d'un secteur à son voisin, mais d'une manière générale l'infiltration s'effectue partout grâce aux précipitations et permet le renouvellement de la plupart des réserves des poches d'eau.

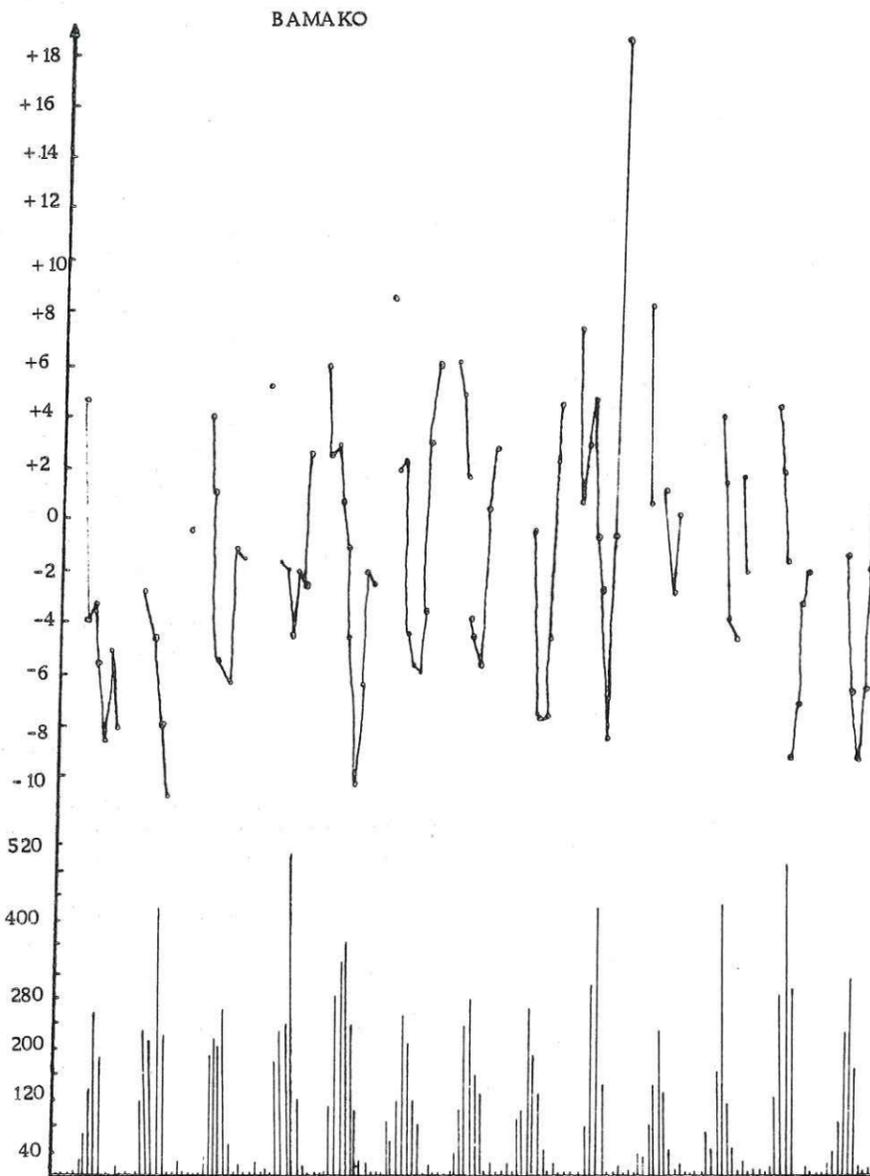
L'OXYGENE 18

Si l'on écarte les eaux de Bam'ga et de Charam-Charam qui ont un δ ‰ très négatif, on constate que d'une manière générale, les eaux du bassin versant de la Sissili ont un δ ‰ plus négatif que celles des régions nord. Si les variations locales des concentrations d'O₁₈ peuvent être importantes comme nous l'avons noté pour Bamako, il est possible de lier les relèvements des concentrations en O₁₈ à un effet de continentalité entre le Sud et le Nord de la Haute-Volta. La relation qui lie les concentrations en O₁₈ aux latitudes est presque linéaire et elle est à rapprocher des variations des températures et d'humidité de l'air, donc aussi de l'évaporation entre le Sud et le Nord.

FIG. 58 : Concentration totale en ions par rapport aux teneurs en oxygène 18



Bien que les concentrations totales en ions augmentent du sud au nord dans les eaux, il n'existe pas comme le montre ce graphique de relations entre les teneurs en oxygène 18 et les concentrations totales en ions dès lors que les eaux n'ont pas la même origine.



VARIATIONS DES TENEURS MOYENNES MENSUELLES PONDEREES EN OXYGENE-18 DE BAMAKO

Figure 59

Relation entre les teneurs en tritium et en oxygène 18

Bien que pratiquement liées aux mêmes facteurs (température, latitude, altitude, éloignement de la mer), la relation entre les teneurs en tritium et celles d'oxygène 18 n'apparaît pas nettement au niveau des eaux que nous avons eu à analyser. On peut toutefois remarquer que tout autant que les concentrations en tritium, les teneurs en oxygène 18 croissent du Sud vers le Nord des régions de la Haute-Volta. Si la différence des teneurs en tritium peut s'expliquer par l'importance des réserves d'eau souterraines des régions sud par rapport à celles du Nord, l'accroissement des teneurs en O^{18} nous semble plutôt lié aux différences de température existant entre le bassin de la Sissili et l'Oudalan entraînant dans cette dernière région une concentration par évaporation.

Comparaison avec d'autres études antérieures

En Haute-Volta, la seule étude isotopique des eaux réalisée avant la notre fut menée par Hydrogéologie en 1969-1970, au niveau de quelques mares de l'Oudalan (Kabia, Tin Hassam, Raf Naman). Elle était destinée, en association avec des études hydrogéologiques ponctuelles et un suivi de la fluctuation des niveaux piézométriques, à expliquer le mode de réalimentation des nappes, et surtout à apprécier la contribution éventuelle des eaux des mares à la recharge des nappes.

Constatant un enrichissement plus ou moins important en O^{18} des eaux souterraines par rapport aux eaux de pluie, l'étude conclut à une contribution des mares dont les eaux s'enrichissent en O^{18} par évaporation à la recharge des nappes. Recharge qui serait possible pendant les courtes périodes d'inondation où les eaux débordent les domaines stricts de la mare dont le fond est colmaté par des argiles imperméables.

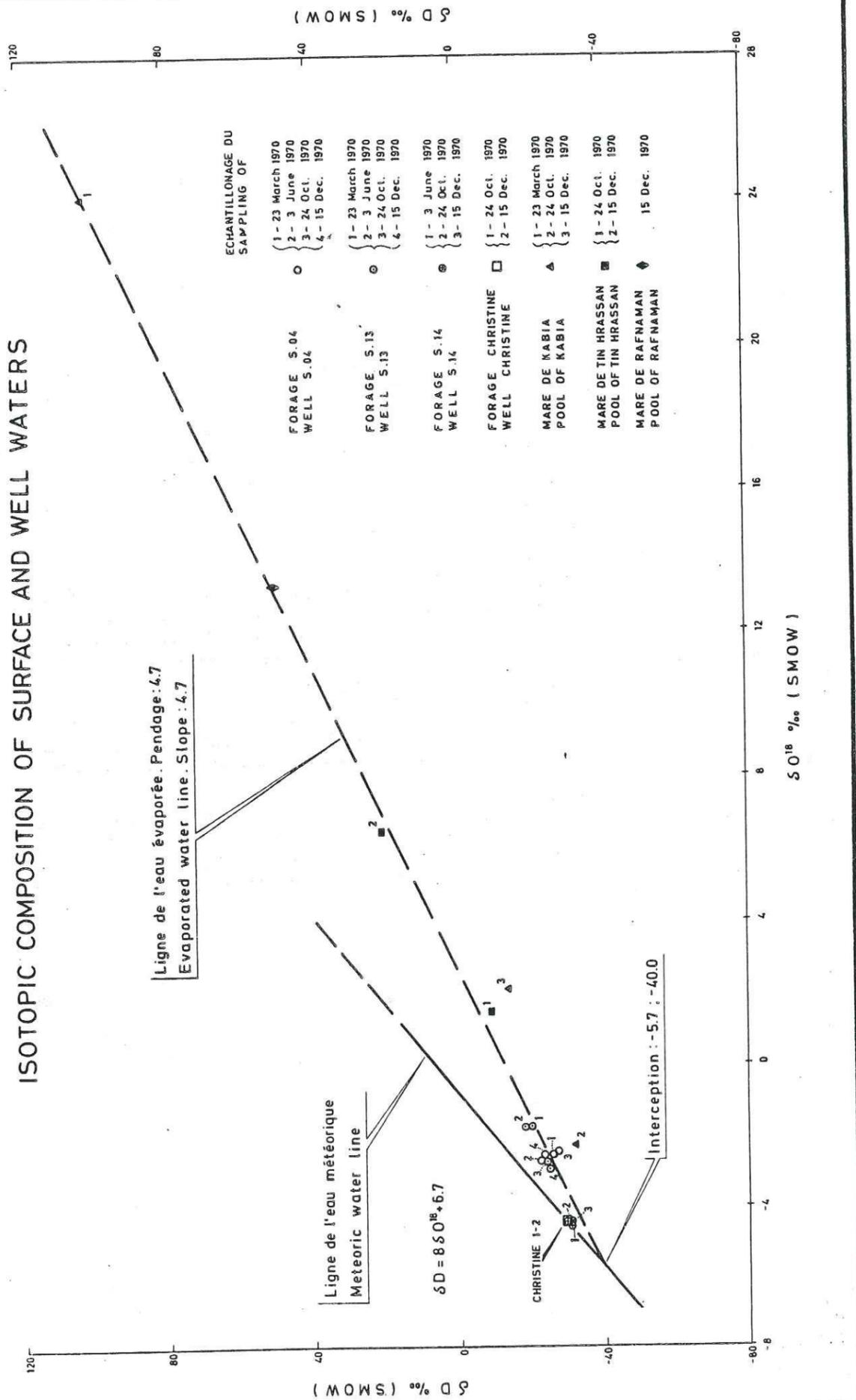
On peut cependant remarquer que si les recharges à partir des berges des mares existent, phénomène que nous avons retrouvé dans le bassin versant de la Sissili, les différences de concentration en oxygène 18 entre l'eau de pluie et celle des mares ne suffit pas pour les expliquer.

	23/3/70	3/6/70		24/10/70	15/12/70	26/1/71	13/6/71
Forage S.04	- 2,5	- 2,7		- 2,4	- 2,5	- 2,4	- 2,3
Mare de Kabia	+24,2			- 2,2	+ 2,1	+ 8,3	
Forage S.13	- 1,7	- 1,7	saison	- 2,7	- 2,9	- 2,4	- 2,6
Forage S.14		- 4,5	des	- 4,4	- 4,4	- 4,4	- 4,4
Mare de Tin-Hrassan	+20,3		pluies	1,5	6,5	+13,8	+19,6
Forage Christine 1				- 4,4	- 4,4	- 4,5	- 4,4
Mare de Raf Naman					+13,3	+ 9,9	sèche

Concentrations en O^{18} des eaux de mares et de forages dans l'Oudalan (Hydrogéologie, 1970) |

Tableau 50

FIG. 60: COMPOSITION ISOTOPIQUE DES EAUX DE SURFACE ET SOUTERRAINES
ISOTOPIC COMPOSITION OF SURFACE AND WELL WATERS



En effet, le tableau ci-dessus indique que les teneurs en oxygène 18 varient très peu dans les forages, alors qu'elles fluctuent beaucoup dans les eaux des mares, et ce en rapport avec l'évaporation, l'humidité relative et les précipitations comme le montrent les graphes ci-après.

Pour les eaux que nous avons prélevées dans cette région de l'Oudalan on remarque une différence de concentration en O^{18} entre le toit des nappes atteint par les puits et leur partie profonde sollicitée par les pompes de forages (Salmossi, Bam'ga). Cette remarque est vraie tant pour les teneurs en O^{18} que pour les concentrations en tritium. Dans ce dernier cas au moins peut-on apprécier l'importance des apports en prenant en compte les seules concentrations en tritium des eaux souterraines que l'on compare avec celles des pluies.

La seule remontée des niveaux piézométriques constatée pendant la durée de l'étude indique clairement qu'il y a réalimentation des nappes, mais les concentrations en O^{18} et en deutérium étudiées sont insuffisantes pour démontrer que c'est l'eau des mares qui contribue à la recharge des nappes. Cela d'autant que, sur le graphique de corrélation deutérium-oxygène 18, on note que les eaux des forages restent très peu évaporées, par rapport à celles des mares.

2.2.7.4.4. CONCLUSION

Les études isotopiques montrent que les nappes des formations cristallines de Haute-Volta, y compris celles du Nord (Oudalan) se rechargent périodiquement grâce aux précipitations. Plus encore au Nord qu'au Sud, cette recharge ne s'opère pas après un total comblement du déficit d'humidité de tout le profil d'altération comme l'a indiqué LELONG (1966).

Les eaux de réalimentation s'infiltrent dans des zones préférentielles qui sont les berges des mares des marigots et rejoignent les zones broyées des fractures en circulant à travers les arènes et la frange fissurée du bed-rock où elles se minéralisent.

Les termes du bilan hydrologique sont très différents entre les régions du Sud (bassin versant de la Sissili) et celles du nord Oudalan. Ces différences ne concernent pas seulement les quantités d'eau précipitées ou évaporées, mais aussi et surtout les taux de la hauteur de pluie réservés à l'écoulement et à l'infiltration.

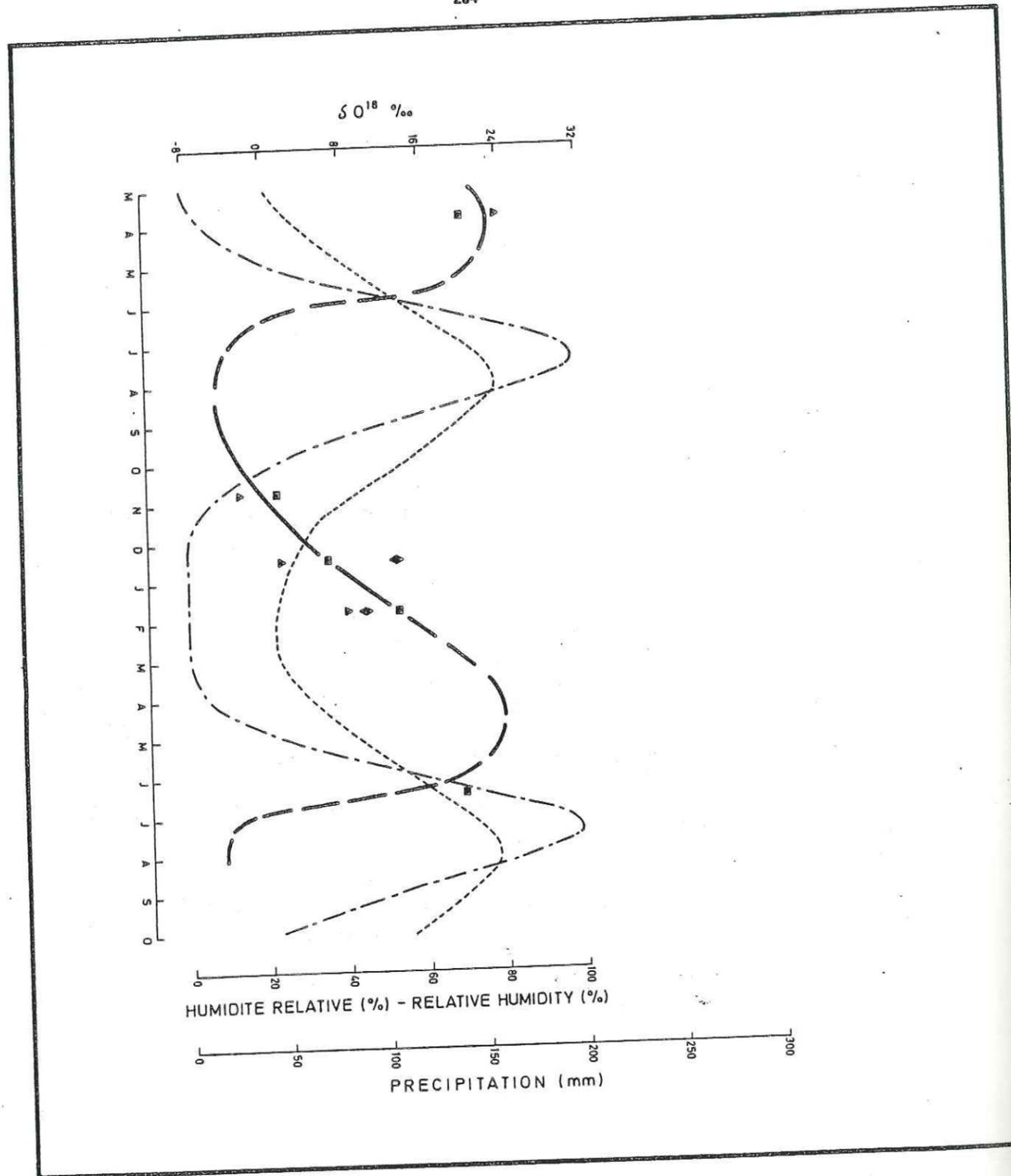


Fig.61: VARIATIONS DANS LE TEMPS DES PRECIPITATIONS, DE L'HUMIDITE RELATIVE ET DES TENEURS EN OXYGENE 18 DE L'EAU DES MARES DANS L'OUDALAN

- ▲ Mare de Kabia
- Mare de Tin-Hrassan
- ◆ Mare de Rafnaman
- Précipitations
- Teneurs en oxygène 18
- Humidité relative

Figure 61

III - METHODES D'ETUDE, DE PROSPECTION ET D'EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES DANS LES FORMATIONS DU SOCLE CRISTALLIN

- 3-1 LOCALISATION DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES
PAR L'ÉTUDE DES INDICES BIOLOGIQUES
- 3-2 GÉOPHYSIQUE APPLIQUÉE À L'HYDROGÉOLOGIE DU SOCLE
CRISTALLIN DE LA HAUTE-VOLTA
- 3-3 LES OUVRAGES DE CAPTAGE D'EAU DANS LES FORMATIONS
DU SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE-VOLTA

3.1. LOCALISATION DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES

PAR L'ETUDE DES INDICES BIOLOGIQUES

3.1.1. INTRODUCTION

Si l'importance de la fracturation dans le mode de gisement des eaux souterraines dans les régions à substratum cristallin de Haute-Volta n'est plus à démontrer, le problème de la localisation des failles sur le terrain n'est point résolu dès lors que l'on veut se limiter aux faits d'observations géologiques directes. Cependant, il est maintenant aisé de tracer à l'aide des prises de vues des satellites ou des photos-aériennes une multitude de linéaments correspondant souvent aux fissures qui affectent le socle. Ce travail se fait en s'aidant de la morphologie, des anomalies géologiques, de la coloration du sol, du tracé des marigots et de la végétation. Mais l'extension généralisée de la couverture des altérites en zone tropicale fait de l'affleurement rocheux un élément exceptionnel, voire insolite et rend ainsi difficile l'investigation géologique directe sur le terrain. A l'absence d'affleurements s'ajoute la planéité du relief marqué par la rareté des belvédères, ce qui ne permet pas un repérage à vue des linéaments de photos-interprétation. La localisation précise des fractures se fait par géophysique. Cette solution implique un travail d'équipe, qui la rend onéreuse et nous amène à ne la recommander que pour les sites difficiles ou des implantations destinées à fournir des débits importants. Comment donc repérer les fractures auxquelles sont liées les poches d'eau par l'observation d'éléments de terrain ? C'est à cette question que tente de répondre l'utilisation des indices naturels.

C'est en mars 1976 que nous avons remarqué lors de la prospection du site de Manega, que nous effectuions pour l'implantation d'un forage villageois, que les plus basses valeurs de résistivités apparentes du traîné électrique se situaient à proximité d'une grosse termitière qui se construisait. L'idée que l'eau dont se servaient les termites pour leur construction cinq mois après la saison des pluies ne pouvait provenir que de la nappe phréatique qui jouxte la termitière se trouva confirmée par le forage qui après avoir atteint la nappe à 16 mètres de profondeur fournit un débit de 3,5 m³/h, pour une profondeur totale de 65 mètres.

Depuis cette expérience, nous commençâmes à prendre en compte deux types d'indices biologiques: termitières et végétaux hygrophiles pour essayer de résoudre deux problèmes:

- Premièrement, la localisation approximative des fractures repérées sur les photos aériennes ou pour orienter convenablement les profils de traîné électrique, lorsque l'interprétation photogéologique n'a pas été faite ou reste non faisable à cause d'un espace réduit et imposé comme site à prospecter.

- Deuxièmement pour combler un hiatus existant entre la dimension des failles repérables sur les photoaériennes, et celles visibles sur l'affleurement: c'est-à-dire les failles longues de 50 à 500 mètres et qui, comme nous en avons donné des exemples, sont à même de fournir à des ouvrages villageois des débits satisfaisants.

L'étude systématique des termitières et des végétaux hygrophiles pour l'implantation directe des ouvrages ou pour l'orientation de la prospection géophysique commença véritablement à partir de 1977 par un inventaire et une sélection de ces types d'indices retenus.

. 211	. 210
. 205	. 176
. 191	. 102
. 178	. 108,5
. 133	SE 4 x 83,5
○ 150 Kakanguin	. 107
★ boulga	. 109
SE 3 x 106	. 121
. 156	. 121
. 127	SE 7
. 125,6	puits busé . 136
. 119,5	x SE 8 . 138
SE 2 ⊗ 91	. 144
. 113,5	. 210
. 163	. 243
. 144	. 228
. 145,2	. 166,5
. 172	SE 5 x 160
. 180,5	. 259
. 228	. 194
. 217	. 239
. 167	. 228
. 196	. 185
. 206	. 257
. 215	. 177,5
. 107	. 227
P1	P2



x SE 8

 ○ SE 1
 Forage A.V.V.

MANEGA

ETUDE GEOPHYSIQUE

PLAN DE POSITION

P1 P2 : profils de résistivités

 . 211 : résistivité apparente
 avec AB = 180 et MN = 20 m

x S E Sondage électrique

○ Termitière

★ Ficus gnaphalocarpa

Echelle : 0 40 80m

3.1.2. LES TERMITES

Définition: Terme (du latin termites qui veut dire ver rongeur) est le nom donné à ces insectes sociaux de l'ordre des isoptères vivant surtout dans les régions chaudes du globe où ils construisent des termitières.

Alors que des sociétés d'hyménoptères comme les fourmis sont composées uniquement de femelles, les mâles n'ayant qu'une vie brève, les sociétés des termites renferment des mâles et des femelles en nombre à peu près égal; mais la plupart de ces sexués restent stériles, même adultes. Ils n'acquièrent jamais d'ailes et se différencient en "soldats" et en "ouvriers". Les ouvriers sont les plus nombreux; ils édifient seuls la termitière, tandis que les soldats ont pour rôle de la protéger contre les agresseurs, les fourmis notamment.

Les termites adultes sexués et féconds possèdent des ailes et sont appelés imagos. Ils s'envolent pendant la saison des pluies et s'accouplent pour aller fonder d'autres colonies. Chaque colonie possède une reine à l'abdomen bien développé et un roi de petite taille. La reine pond des oeufs en quantité variable suivant les espèces et les colonies.

DIVERSITE DES TERMITES

D'après Kuna KRISHNA (1968) on distingue actuellement 6 familles de termites regroupant 190 genres avec environ 2000 espèces dont 613 vivent dans la seule Afrique (BOUILLON et MATHOT, 1965).

Les termites sont des insectes lucifuges qui ne s'offrent à la lumière que pendant la courte période (quelques minutes) que dure l'essaimage.

Tous les termites construisent des nids qui sont plus ou moins climatisés, obscurs et isolés du monde extérieur. La structure du nid ainsi que sa taille varient suivant les espèces. Les termitières sont épigées, hypogées ou arboricoles.

Comme nous ne nous intéressons aux termites qu'en tant qu'éléments guides dans la prospection hydrogéologique nous ne parlerons que des termitières épigées.

Les termitières épigées sont construites soit grâce à un ciment argileux renforcé par des matériaux inertes, soit grâce à un certain carton stercoral, soit à l'aide des deux à la fois.

Evoquons rapidement les modes de vie des trois genres de termites épigées répandus dans le sahel.

- le genre trinervitermes de la sous-famille des nasutitermitinae;

- le genre cubitermes;

- et les genres belicositermes et subhyalinus de la sous-famille des macrotermitinae.

Figure 62

Les trinervitermes

Ce sont des termites moissonneurs qui s'attaquent aux feuilles des litières sèches, et essentiellement aux tiges des graminées qu'ils découpent en brindilles de longueur sensiblement égale, et qu'ils rangent dans le nid comme du mil dans un grenier. Les termitières de trinervitermes dont la hauteur ne dépasse guère 50 à 60 cm présente une structure alvéolaire interne complexe. La profondeur de prélèvement du matériel de la termitière trinerviterme n'excède pas un mètre. Ces termites ne remanient souvent que la terre arable.

La densité des termitières trinervitermes est en rapport avec la fréquence des graminées. On les rencontre partout en Haute-Volta.

Les cubitermes

Ils caractérisent les zones de Bowé. Leur nid a la forme d'un gigantesque champignon ou d'un chapeau chinois et grâce à la multitude des étages qu'il peut représenter sa hauteur peut atteindre 1 mètre.

Les cubitermes sont humivores et ont donc un rôle superficiel; cependant, les périodes pendant lesquelles ils édifient leurs nids indiquent qu'ils prélèvent l'eau par des galeries descendant profondément dans le sol (15 à 20 mètres).

Nous avons indiqué en parlant de la morphologie des cuirasses latéritiques la position basse qu'ils occupaient sur ces plateaux où on les trouve associés à des bosquets typiques.

Les macrotermes bellicositermes et subhyalinus

Ce sont des termites champignonistes vivant en colonies de plusieurs millions d'individus. Ils édifient suivant les espèces des termitières en dôme ou en cathédrale atteignant parfois trois mètres de hauteur. On les rencontre depuis le Sud jusqu'à l'extrême nord du pays. Leur extension spatiale intéresse donc l'ensemble des zones à substratum cristallin de la Haute-Volta.

Les nids construits en terre ont une structure interne et une composition granulométrique complexes. Selon Madame ROY NOEL qui a étudié ces termites au Cap Vert (1976) et avec qui nous avons fait une brève excursion sur le terrain à Gampéla, on peut différencier Macrotermes bellicositermes et Macrotermes subhyalinus à partir de l'organisation interne de leur nid. En effet, tandis que la muraille enveloppant l'habitable est épaisse et finement canaliculée chez subhyalinus, elle comporte chez bellicosus de grandes galeries larges de 4 à 10 cm. De plus, il est bien connu des populations mossi, par exemple, qui affectionnent les imagos, que ces derniers se libèrent des termitières à des heures différentes de la nuit, suivant qu'ils s'agisse de subhyalinus ou de bellicosus. Nous les décrivons cependant ici ensemble parce qu'ils présentent pour la prospection le même intérêt, et que la différenciation du genre a dans cette condition peu d'importance.

Comme tous les champignonistes, ces termites construisent des meules en carton stercoral, bien entretenues, sur lesquelles se développent sous température et humidité constantes (28 à 30°) des champignons minuscules appelés termitomyces.

Ce dernier fait vient appuyer ce que nous avons avancé comme rapport termitières-poches d'eau, et il est seulement surprenant que vu la géométrie des poches d'eau souterraines dans le socle cristallin, aucun auteur n'ait encore fait le lien entre localisation des termitières et l'existence de la nappe d'eau pérenne, surtout lorsqu'on sait qu'au sahel la saison sèche dure 8 mois. Considérer donc les termitières géantes comme indices favorables dans la recherche des poches d'eau souterraines se justifie donc. Reste à savoir comment les utiliser, et à préciser les limites objectives de leur utilisation dans la prospection hydrogéologique.

Utilisation des termitières

Nous avons eu à parler de 4 genres de termites (trinervitermes, cubitermes, bellicositermes et subhyalinusitermes), mais ils sont de valeurs très inégales en prospection hydrogéologique.

Les trinervitermes

Ils méritaient d'être signalés à cause de leur importance du point de vue fréquence et occupation spatiale. Mais comme nous l'avons déjà dit, leur fréquence est en rapport direct avec l'abondance des graminées. Leurs termitières sont sèches (ils désertent d'ailleurs la partie épigée de la termitière aux heures chaudes de la journée), et leur matériel de construction est prélevé à faible profondeur dans la partie arable du sol.

Ces termites ne présentent aucun intérêt en tant qu'indices de présence d'eau; il fallait néanmoins en parler afin d'éviter qu'ils soient confondus aux macrotermitinae.

Les cubitermes

Ils affectionnent les zones de Bowé. Ils colonisent donc des secteurs à forte épaisseur de cuirasse latéritique. Si l'on associe leur présence à une analyse de la géomorphologie et des niveaux piézométriques, on arrive à localiser des zones de cuirasses noyées dans les régions où apparaissent abondamment les cubitermes.

L'exemple le plus typique que nous donnons est celui de la ceinture de cuirasse latéritique à peuplement de cubitermes du village de Kossouka (sous-préfecture de Séguinéma -Département du Nord Yatenga).

Les cubitermes occupent une bande de 500 mètres de largeur maximale située au Nord et à l'Ouest de cette localité, qu'elle sépare des petits villages de Yamseindé, Magarourou, Toeghin et Tièblega.

La nappe de la cuirasse noyée est exploitée en bout de pente du bowal et en aval du peuplement des cubitermes par de vieux puits traditionnels qui sont connus pour l'importance de leur débit et pour leur pérennité. Ces puits ont gardé, pour la moitié d'entre eux, leurs caractéristiques malgré la longue sécheresse. Ces puits traditionnels sont ceux de Yamsuindé-Yarsé, de Magarougou (Handougou), Mahamma-Rawindé, Noukoundin, Boulwagdin et Ikiboulga.

Le puits moderne de l'O.R.D. creusé à Noukoundin donne également de bons débits.

Les forages exécutés par l'atelier du Bureau Voltaïque de la Géologie et des Mines (Bu.VOG.Mi) dans la zone des puits traditionnels de Boulwagdin ont rencontré entre 15 et 20 mètres de profondeur des débits de 3 à 3,5 m³/h.

Cet exemple est intéressant, mais il faut cependant noter que de par leur écologie, les cubitermes bien qu'utiles, sont d'un usage peu fréquent. On ne saurait en particulier en faire cas dans les zones à cuirasse décapée ou perchée (bassin aval des Volta et de la Sissili par exemple). Les surfaces qu'ils occupent connaissent, comme les cuirasses latéritiques, leur extension maximum dans le Yatenga et la région de Kaya.

Bellicositermes et subhyalinusitermes

Leur extension spatiale permet de les rencontrer partout depuis le Sud jusqu'au Nord de la zone à substratum cristallin de Haute-Volta. La meilleure période pour leur utilisation comme indices va de Février au début de la saison des pluies. A cette période, on peut dire que toute construction fraîche remarquée sur les termitières géantes des bellicosus et subhyalinus est un signe de présence d'eau. On remarque que dans nos régions cristallines, la profondeur du toit de la nappe d'eau sous-jacente qu'ils exploitent est très variable d'un site à l'autre. Généralement, il se situe entre 5 et 20 mètres de profondeur. Il faut noter cependant qu'il existe quelquefois une différence entre présence d'eau et existence de nappe ou de poche exploitable par un puits ou un forage. Les termites eux peuvent se suffire de l'eau d'altérites argileuses et d'extension réduite comme celles qui, sous forme de placage, recouvrent les schistes et empêchent leur alimentation, quand bien même ils sont fissurés et susceptibles de constituer un bon aquifère. Quelquefois, l'analyse des déblais permet de déterminer la nature du substratum et la morphologie, d'apprécier les possibilités de réalimentation.

Dès lors la prise en compte des termitières et de leur activité récente prend tout son intérêt; mais plusieurs indices valent toujours mieux qu'un seul. C'est pourquoi il paraît non moins utile de tenir compte des végétaux hygrophiles.

3.1.3. LES VÉGÉTAUX HYGROPHILES

INTRODUCTION

De nombreux végétaux hygrophiles étaient déjà connus du monde rural sahélien qui les prenait en compte pour l'implantation de ses ouvrages d'exploitation des eaux souterraines que sont les puits traditionnels. C'est notamment le cas du figuier commun du sahel, Ficus gnaphalocarpa dont le nom se trouve souvent associé à celui de bien des sites ou des points d'eau. Citons seulement ces 2 exemples: Kankanbouli, "mare du figuier" qui est le nom d'un village de la sous-préfecture de Kombissiri, et Kantchari en pays gourmandché qui signifie "puits du figuier" ou Kankang-boulga en moré (exemple de Manéga).

En fait, la possibilité d'utiliser les végétaux dans la prospection hydrogéologique découle de la question logique suivante: étant donné que bien des linéaments repérables en photos-aériennes le sont grâce à un arrangement particulier des végétaux, quelles sont les espèces végétales que l'on rencontre sur ces linéaments ?

Nous avons essayé de répondre à cette question en menant un travail en deux étapes:

- d'abord en faisant un recensement des espèces végétales aimant l'eau, et ce dans des zones où leur présence répétée ne pouvait se rattacher qu'à celle de l'eau, c'est-à-dire dans les bas-fonds.

- Nous avons dans un deuxième temps identifié les espèces communes aux bas-fonds et aux poches d'eau que nous arrivons à localiser à l'aide de la prospection géophysique par la méthode électrique des résistivités. De ces plantes, nous avons retenu celles qui présentaient une répartition spatiale et une fréquence telle qu'on puisse les utiliser sur toute l'étendue des régions à substratum cristallin de Haute-Volta;

La sélection porta sur les végétaux suivants qui sont tous des arbres ou des arbustes de notre savane: Ficus gnaphalocarpa, Diospyros mespiliformis, Piliostigma reticulata et Mitragyna inermis.

Nous remercions ici Monsieur GUINKOSITA, Botaniste à l'Institut Supérieur Polytechnique de Ouagadougou à qui nous devons les descriptions scientifiques de ces végétaux dont nous ne connaissions au départ que les noms mossi.

- Mitragyna inermis (WILLD) O. Ktze (Yilga en moré)

Il est de la famille des Rubiacées. C'est un arbuste ou souvent un arbre de 5 à 10 mètres de haut. Mitragyna inermis possède des feuilles elliptiques atteignant 7 cm de long et 4 cm de large, des nervures latérales de 6 à 7 paires. Ses fructifications sphériques, brun foncé, composées de nombreuses petites capsules s'ouvrent en deux valves libérant de petites et nombreuses graines. Mitragyna inermis est une espèce poussant dans les plaines alluviales de la zone soudano-sahélienne de l'Afrique inter-tropicale. En Haute-Volta, on le retrouve dans les "marigots" et les lacs et mares depuis le Sud jusqu'à l'extrême nord du pays. Mitragyna est donc une espèce propre aux bas-fonds; sur des centaines de sites que nous avons prospectés, nous ne l'avons rencontré en interfleuve qu'à Watinga (s/p Saponé Département du Centre). Il se situait bien sûr sur une poche d'eau et était associé à des termitières de macrotermes.

- Diospyros mespiliformis (Hochst) (Ganka en moré)

C'est un arbuste ou un arbre de 3 à 11 mètres de haut, appartenant à la famille des Ebénacés, caractérisé par:

- des feuilles alternées plus ou moins elliptiques, subacuminées de 15 cm de long sur 5 cm de large, à face inférieure légèrement pubescente dans le jeune âge; les feuilles de Diospyros mespiliformis sont persistantes;
- des fruits qui sont des baies suborbiculaires;
- une écorce marron foncé ou noire à surface hérissée de tubercules.

C'est une espèce de forêt et de savane répandue du Sénégal au Nigéria. On la trouve aussi dans les pays situés en bordure de la Mer Rouge et en Afrique du Sud. On la rencontre fréquemment dans les bas-fonds sableux ou argileux inondables. En Haute-Volta elle est fréquente du Sud jusqu'aux environs de Dori, latitude à partir de laquelle elle disparaît pratiquement pour céder la place aux épineux et aux Piliostigma reticulatum dans les bas-fonds.

- Ficus gnaphalocarpa (Kankanga en moré)

Est de la famille des Moracées. C'est un arbre de 12 à 15 mètres de haut, à écorce lisse, claire, jaune ou crème. Ses feuilles sont ovales-orbiculaires, finement dentelées, glabres sur les deux faces, trinervées à la base. Les feuilles sont caduques, mais à rebourgeoisement rapide. Ficus gnaphalocarpa donne des fruits (ou faux fruits) globuleux, jaune orange à maturité. C'est une espèce répandue du Cap-Vert au Cameroun et largement distribuée en Afrique tropicale sèche.

On le retrouve sur toute l'étendue du territoire voltaïque, mais au Nord, il se cantonne strictement dans les bas-fonds et abords des mares, alors qu'au Sud et au Centre il a une distribution spatiale moins restrictive.

D'autres ficus existent et peuvent également servir à la prospection, mais nous ne le mentionnons pas ici à cause de leur faible fréquence.

- Piliostigma reticulatum ou Bauhima reticulata (Bangandé en moré)

C'est un arbuste atteignant parfois 5 à 6 mètres de haut. Il a un fût tortueux, des feuilles profondément bilobées, subcordées à la base, scoriacées, glabres de 5 à 8 cm de long et de 5 à 11 cm de large. Il possède des inflorescences en vacèmes, quelques branches; des fleurs blanches, des gousses indéhiscentes, glabres et pruneuses. Piliostigma reticulatum est une espèce des savanes soudano-sahéliennes répandue du Sénégal au Nigéria et de la République Centrafricaine à la République du Soudan. En Haute-Volta, on le rencontre sous toutes les latitudes. Il affectionne les zones humides et sableuses. Dans la partie nord du territoire, il souligne les zones de bas-fonds, et nous ne le prendrons en compte qu'en dehors de ces secteurs.

Espèces végétales hygrophiles et hydrogéologie

Comme pour les termitières, on remarquera que les végétaux sont d'une inégale valeur dans leur rôle d'indice hydrologique.

Mitragyna inermis est une espèce cantonnée au lit des marigots, il va donc être fort peu utile dans les zones non inondables.

Les conditions climatiques qui règnent au Sud du 14ème parallèle sont telles que Piliostigma reticulatum abonde un peu partout, et ne peut jouer un rôle important qu'au Nord et hors des bas-fonds.

Les ficus et gnaphalocarpa, en particulier, constituent des indices fiables du Nord au Sud du pays.

Les diospyros mespiliformis montrent parfois des localisations ambiguës. Il ne faut les prendre en compte qu'en association avec d'autres indices.

D'une manière générale, pour les plantes, étant donné leur grande longévité, elles peuvent n'être que le reflet d'une écologie révolue. Il importe donc d'analyser leur comportement physiologique: état d'abondance du feuillage et de son flétrissement aux heures les plus chaudes de la journée pendant la saison sèche, notamment en Mars, Avril et Mai.

Indices biologiques et implantation des ouvrages de captage

Dès 1978, nous nous sommes attaché à la mise en évidence de relations nettes entre les données géophysiques des sites que nous prospectons et leur environnement biologique. Il fallait alors s'adresser à des sites déjà prospectés pour identifier les espèces végétales et les types de termitières associés aux zones occupées par les poches d'eau en exploitation.

Nous donnons ci-dessous quelques sites où l'on voit les indices retenus présents au voisinage immédiat des puits ou des forages.

- . Zone 5 - Ranch de Léo: Diospyros mespiliformis + termitières
Macrotermes + Piliostigma reticulatum
- . Zone 1 - Ranch de Léo: Diospyros mespiliformis.
- . Põ - Forages du Parc du marché à bétail et de l'adduction d'eau: Diospyros mespiliformis + termitières macrotermes.
- . Fada-N' Gourma - Forages ORD et adduction d'eau: Diospyros mespiliformis + macrotermes + Piliostigma reticulatum.
- . Gampéla - Forage ISP-Bureau: Diospyros mespiliformis + macrotermes.
- . Gampéla-Forage ISP-Parc à bétail: Ficus gnaphalocarpa + Diospyros mespiliformis + macrotermes
- . Kinfanghé: Ficus gnaphalocarpa + macrotermes + Diospyros mespiliformis + Piliostigma reticulatum
- . Gangaol: Ficus gnaphalocarpas + Piliostigma reticulatum + Diospyros mespiliformis + Piliostigma reticulatum + macrotermes.

De l'étude des sites il apparaît qu'il existe bien une relation entre la présence de nappes permanentes, qu'elles soient liées à des aquifères d'alluvions, de cuirasse noyée, d'arènes ou de bedrock fissuré et celle des végétaux étudiés, ainsi que des termites macrotermes (belicositermes et subhyalinus).

Au niveau de ces indices, on note des associations plus fréquentes que d'autres:

- Sur le terrain on remarque une coexistence fréquente entre les termitières macrotermes et les arbustes Diospyros mespiliformis. Ils semblent vivre en symbiose et l'on se demande qu'elle peut être l'antériorité des uns par rapport aux autres dans le site. Les macrotermes profitent-ils des racines de Diospyros pour atteindre la nappe ou est-ce Diospyros qui bénéficie du microclimat de la termitière, tout en s'aidant de ses galeries pour descendre jusqu'à la nappe ? Il est difficile de répondre actuellement d'une manière sûre à cette question, aucune étude dans ce sens n'ayant encore été menée.

- L'association Ficus gnaphalocarpa - Macrotermes existe également, mais elle est moins fréquente que la première. Il en est de même de l'association Macrotermes-Piliostigma reticulatum.

- A Kinfangué, nous avons pour la première fois rencontré une association ponctuelle de quatre indices à la fois: Ficus gnaphalocarpa, Diospyros mespiliformis, Piliostigma reticulatum et termitière macrotermes.

- Watinga est un des rares sites où l'on peut voir Myragyna situé sur un haut plateau en association avec Diospyros mespiliformis et macrotermes.

La liste des sites où l'on rencontre un indice ou l'association de deux ou de trois indices est très longue et prouve l'intérêt que peut avoir la prise en compte des indices biologiques dans les recherches hydro-géologiques des régions à substratum cristallin de Haute-Volta.

Résultats des implantations guidées par la présence d'indices naturels

Nous avons réalisé avec succès l'implantation de quelques puits en nous servant des indices biologiques. Ce fut le cas, par exemple, de Kossouka-Teninbougrin (avec termitières macrotermes et Diospyros mespiliformis; Ouagadougou-Tampouy (avec termitières macrotermes et Diospyros mespiliformis). Ces ouvrages ont rencontré la nappe des altérites à 15 et à 12,5 mètres.

Végétaux hygrophiles et termitières nous ont surtout aidé à orienter la prospection électrique de nombreux sites qui n'avaient pas bénéficié d'études photo-interprétatives. Les résultats obtenus par les forages qui ont été implantés ont été intéressants, mais on y remarque quelques échecs.

- Les implantations positives

Un seul profil de traîné électrique a été suffisant pour confirmer les données des indices naturels rencontrés sur les sites de:

- . Foubé avec Piliostigma reticulatum;
- . Toékédogo avec Ficus gnaphalocarpa, Diospyros mespiliformis et termitières macrotermes en construction;
- . Valiou et Poumi avec Diospyros + Macrotermes.

A Pâ, nous n'avons pas retenu l'implantation au droit des indices rencontrés (Diospyros et Macrotermes) situés sur une fracture confirmée par le traîné et le sondage électrique SE2 (figure 63). Si nous lui avons préféré une intersection de fracture qui a fourni 3,5 m³/h, ce cas montre bien que les indices se trouvaient à l'aplomb même d'une zone broyée du substratum: le sondage électrique est ici sur 4 terrains, dont le premier correspond à la latérite remaniée par la termitière. Le saut à l'embrayage des 50 mètres (Chapitre 3.2.3.3) traduit l'effet de la frange fissurée du bed-rock.

- Les implantations négatives

Des forages négatifs ont succédé aux études réalisées sur les sites de Poulalé et de Bissiga où nous avons dû intervenir par géophysique après échecs des premiers ouvrages implantés.

Le site de Poulalé avec ses nombreux Ficus gnaphalocarpa et ses arbustes de Diospyros mespiliformis ne nous a pas paru stérile. Et pourtant la deuxième série de forages que nous avons implantés furent secs. Nous avons alors essayé de comprendre le phénomène en examinant surtout les arbustes Diospyros dont on remarque un flétrissement net aux heures chaudes de la journée. Signe donc d'un déficit d'humidité dans le sol.

Sur le site Bissiga, par contre, aucune anomalie de ce type n'a été observée. Mais on note que le forage n'était pas tout à fait sec. Il était plutôt à débit insuffisant (inférieur à 200 l/h). Quantité dont devaient se satisfaire les végétaux hygrophiles (Ficus et Diospyros) présents sur le site.

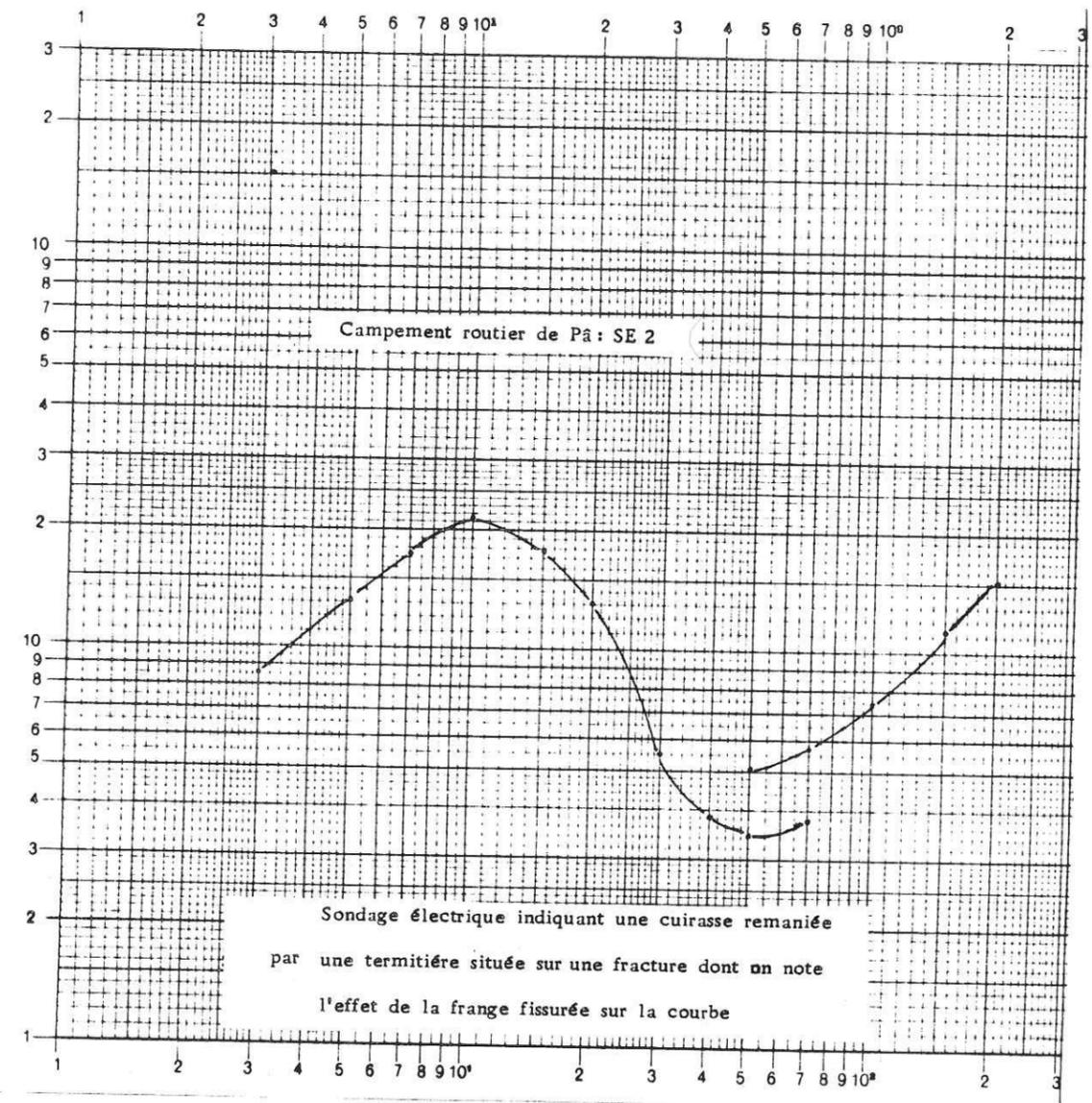


Figure 63

3.1.4. COMPARAISON AVEC D'AUTRES ÉTUDES MENÉES DANS LES REGIONS VOISINES

Si l'approche que nous faisons ici est nouvelle en ce qu'elle cherche à mettre en évidence pour la première fois, la possibilité d'utiliser des éléments biologiques en appui à la télédétection pour la recherche des poches d'eau souterraine dans les formations du socle cristallin, on note que des recherches similaires ont été entreprises ces toutes dernières années en matière de recherche minière. Ainsi R. CAMPRERON et J.C. CELLES (1982) trouvent dans une étude menée au Mali, que la prise en compte de la végétation montre qu'une steppe mésophile à pterocarpus luceus domine sur les grès et les quartzites, tandis que le continental terminal est recouvert de steppe arbustive à Pterocarpus et Londitia. Ils remarquent toutefois, que la végétation est plus liée aux variations de teneur en eau des sols et au climat qu'à la lithologie.

C'est pourquoi ils estiment dans leur cas " *qu'il est donc nécessaire pour affiner la cartographie automatisée de s'affranchir des données de la pédologie et surtout des données liées aux peuplements des végétaux par analyse multitemporelle*".

C'est bien sûr la démarche contraire de celle de ces auteurs que nous avons adoptée pour la recherche d'eau, mais cet exemple vient justifier l'intérêt que nous avons apporté à la végétation en matière de recherche d'eau, mais il souligne aussi les multiples possibilités que nous offre la télédétection.

Du point de vue relation pétrographie-végétation, il convient de noter que dans le bassin versant de la Sissili, les zones occupées par les roches basiques (amphibolites, dolérites) et les filons de quartz se distinguent de celles de leurs encaissements granitiques par leur peuplement végétatif à épineux dominants. Cette remarque n'est pas valable au Nord où l'on retrouve partout des épineux du fait du climat sec de la région.

CONCLUSION

Les échecs que nous avons rencontrés sont rares, mais suffisants pour montrer la prudence avec laquelle il faut manipuler les indices biologiques.

Pour les termitières dont les conditions d'existence actuelle sont liées à la présence de nappe pérenne, le problème de paléoécologie ne se pose pas. Notre enquête sur l'évolution de leur densité au cours des dernières années a montré que celle-ci connaissait partout une baisse remarquable consécutive au phénomène de la sahélanisation.

Il reste qu'au niveau de tous ces indices naturels, le problème de l'appréciation de l'importance et de la productivité hydraulique de la nappe qui assure leur survie demeure. Ce dernier problème n'est que très rarement résolu par la géophysique, et ne peut l'être que par sondage de reconnaissance. C'est pourquoi, pour l'implantation de forages villageois la prise en compte des indices naturels en tant qu'éléments de confirmation des données de la photo-interprétation peut aider à se passer d'une prospection géophysique, ou au moins à limiter celle-ci à un strict minimum. Malheureusement l'utilisation des indices naturels est souvent impossible dans les zones où l'activité humaine (défrichage, labour) les a totalement détruits. On note que les termites semblent mieux résister que les arbres et arbustes aux effets de l'activité de l'homme.

3.2. GÉOPHYSIQUE APPLIQUÉE A L'HYDROGÉOLOGIE DU SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE VOLTA

3.2.1. LA PROSPECTION GÉOPHYSIQUE: UNE NÉCESSITÉ POUR UNE IMPLANTATION CORRECTE DES OUVRAGES DE CAPTAGE D'EAU DANS LES RÉGIONS CRISTALLINES

Les formations du socle cristallin de Haute-Volta: granites migmatitiques, gneiss, leptynites du libérien ou volcano-sédimentaires du cycle éburnéen et leurs plutons intrusifs ont à l'état sain une porosité d'inters-tice inférieure à 1% et sont de ce fait considérés comme imperméables et aquifuges. Les seules réserves d'eau souterraines exploitables dans les régions occupées par ces roches se situent dans les formations de couverture (alluvions, frange altérée et zone fissurée du bedrock).

Nous en avons déjà précisé plus haut le mode de gisement et les conditions de réalimentation. Malgré la densité élevée du réseau de fractures affectant le substratum, l'altération profonde à même d'assurer des réserves souterraines permanentes n'est pas généralisée, car elle se limite aux zones broyées jouxtant les mégafractures.

Il serait donc erroné de dire avec J. LEMOINE dans "Politique de l'eau en Haute-Volta" (1975), que: "l'image qui prévaut encore souvent de ressources en eau limitées à des poches d'altération isolées et de localisation difficile est erronée". En effet, l'expérience acquise dans ces huit dernières années dans le domaine de la prospection et de l'exploitation des eaux souterraines dans les formations cristallines de Haute-Volta montre que si les pourcentages de succès, ainsi surtout que la productivité hydraulique des ouvrages ont augmenté sensiblement avec l'utilisation de techniques de forations récentes (marteau fond-de-trou notamment) adaptées à ce type de formation et permettant de capter la frange fissurée du socle, les taux d'échecs (20 à 25 %) restent élevés pour des implantations réalisées par la seule photo-interprétation. De plus, le mode d'alimentation précaire auquel sont soumises certaines zones broyées, et dont nous avons déjà parlé, explique que quelquefois des poches d'altération profondes soient sèches.

Dans les formations cristallines de Haute-Volta, l'utilisation de la géophysique est recommandable ou indispensable, soit:

- pour dégrossir des problèmes hydrogéologiques régionaux (exploitation des données de géophysique aéroportée: aéromagnétisme, gravimétrie en appui à celles de l'imagerie satellite ou des photos aériennes;

- pour implanter des forages de haute productivité destinés à l'alimentation en eau des grosses agglomérations. En effet, on peut remarquer que jusqu'ici en Haute-Volta, tous les forages ayant fourni les débits importants (supérieurs à 8 ou même 10 m³/heure) ont été implantés après prospection géophysique. Aucune autre méthode d'investigation n'a encore atteint ces résultats;

- pour déterminer certaines caractéristiques des altérites et les épaisseurs des différents horizons du profil d'altération au-dessus du substratum;

- pour repérer quelquefois des filons de quartz ou de roches vertes.

Les méthodes de prospections géophysiques peuvent donc être utilisées pour trouver des réponses à plusieurs types de questions, et ce sont ces dernières qui conditionnent le choix de la méthode à mettre en oeuvre.

3.2.2. BREF HISTORIQUE DES TRAVAUX DE GÉOPHYSIQUE APPLIQUÉE À LA RECHERCHE DE L'EAU EN HAUTE-VOLTA

C'est en 1957 que la géophysique fut employée pour la première fois en Haute-Volta comme méthode d'investigation hydrogéologique dans les études de reconnaissance du synclinal de Bobo-Dioulasso. Ce ne sera cependant pas dans cette région sédimentaire de l'Ouest où les aquifères sont continus que la géophysique interviendra le plus, mais dans les zones à substratum cristallin. En effet, après quelques études isolées menées notamment par la C.G.G. ou quelquefois par le B.R.G.M. pour le compte de l'H.E.R. de 1960 à 1975, nous avons créé en 1976, au sein de cette dernière direction, une section de géophysique pour les recherches d'eau souterraine. Les études que nous avons menées en 1974-1975 en association avec la C.G.G. au niveau du ranch d'embouche de Léo, et au titre du projet "urgence Sahel" (1974) avaient fini de démontrer l'intérêt d'une telle création qui bénéficia pour démarrer des appareils acquis grâce au projet "urgence Sahel". La section géophysique avait pour but de mieux assurer le succès des forages d'eau destinés aux hommes, mais aussi au bétail des villes et des villages dont l'équipement s'accéléra avec la sécheresse de 1973.

A ce jour, plus de 300 sites ont été prospectés par cette section géophysique dans le cadre des différents projets d'hydraulique villageoise, ou d'alimentation en eau de centres urbains, ou encore d'équipement de marchés à bétail ou de centres scolaires. A ces nombreux sites viennent s'ajouter d'autres prospectés par I.W.A.C.O pour l'A.V.V. et par le B.U.V.O.G.M.I. qui s'est lui aussi doté d'une brigade de géophysique pour la recherche d'eau afin d'appuyer les interventions de son atelier de forage.

3.2.3. LES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES MISES EN OEUVRE DANS LES FORMATIONS DU SOCLE DE HAUTE-VOLTA

Parmi les méthodes géophysiques, celle des résistivités est, et de loin, la plus employée en Haute-Volta. La facilité de sa mise en oeuvre, ainsi que les résultats souvent satisfaisants auxquels elle a permis d'aboutir ont justifié son utilisation. La méthode de prospection sismique ne fut que très rarement employée. Quant à la magnétométrie, elle fut quelquefois recommandée pour le repérage de filons de quartz sans avoir été effectivement mise en oeuvre à des fins d'études hydrogéologiques. L'électromagnétisme a néanmoins donné lieu à des études expérimentales comparatives menées par I.W.A.C.O., l'A.V.V. et nous-même. et sur lesquelles nous reviendrons.

AÉROMAGNÉTISME ET HYDROGÉOLOGIE

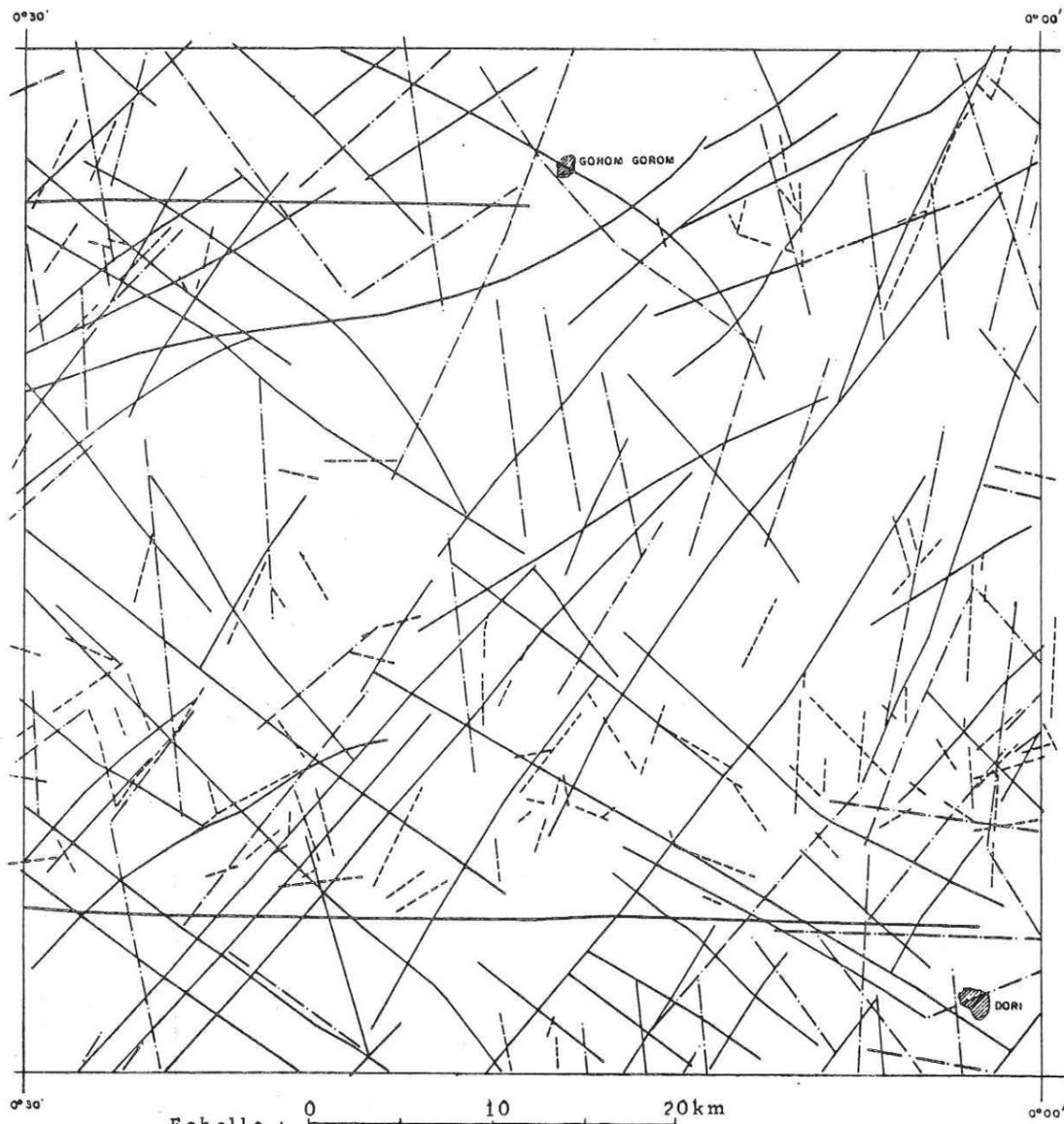
En 1980, la F.A.O. initia et finança dans notre pays un projet d'inventaire des études géophysiques réalisées en Haute-Volta, et leur réinterprétation en vue d'implanter de nouveaux ouvrages de captage d'eau souterraine. J.L. ASTIER, Géophysicien Conseil, qui fut chargé de la conduite du projet, retint comme région d'investigation, le degré carré de Dori, zone ayant bénéficié d'une prospection aéromagnétique, mais aussi de nombreuses prospections électriques. Mais c'est surtout l'interprétation des données de l'aéromagnétisme qui a constitué l'essentiel du rapport final d'ASTIER dont il convient de dire quelques mots surtout à propos des résultats auxquels l'auteur semble avoir abouti:

J.L. ASTIER remarque qu'il y a une différence de densité entre les anomalies aéromagnétiques, les linéaments d'imagerie de satellite et les failles géologiques cartographiées à l'échelle 1/200 000. Cette différence de densité note-t-il, tient essentiellement aux différences entre les échelles des documents utilisés. Cette remarque est en parfait accord avec ce que nous avons pu observer entre les images de satellite au 1/200 000 et les photos aériennes au 1/50 000 dans le bassin versant de la Sissili. Nous en avons donné un exemple en prenant les vues des environs de P6 (figure 27b).

- La deuxième remarque, bien plus importante, est le constat de la rareté des coïncidences entre les failles levées par les trois méthodes. L'auteur dit ne pas trouver d'explication à ce phénomène. Cependant, de notre côté, et dans le bassin versant de la Sissili, où nous avons eu à comparer les linéaments des images de satellite à ceux des photos aériennes et aux failles cartographiables sur le terrain, nous avons noté une assez bonne coïncidence. Malheureusement, nous manquons pour le bassin versant de la Sissili de couverture aéromagnétique qui puisse nous permettre de comparer les trois types de méthodes.

Si nous faisons l'analyse de répartition fréquentielle des linéaments des documents utilisés par ASTIER, nous aboutissons aux mêmes conclusions. En effet, les seules directions regroupant des pics communs sont celles N 30° - N 50° et N 130° - N 150°. Sur le diagramme des failles aéromagnétiques, les directions Nord-Sud et Est-Ouest sont peu exprimées (figure 65).

Les accidents aéromagnétiques présentent des directions privilégiées très tranchées, contrairement aux failles géologiques dont les nombreux pics sont pratiquement équivalents (fig.). Ce dernier aspect est conforme à l'image en "doigts de gants" que B. TANGINI (1971) trouve être caractéristique des régions cristallines de Haute-Volta.



- Faïlle relevée par géologie d'après la carte géologique de l'Oudalan
- - - - Faïlle relevée par imagerie LANDSAT d'après la carte F.A.O. établie par C. TRAVAGLIA
- Faïlle relevée par aéromagnétisme d'après le rapport de TERRA SURVEY LTD

SAHEL VOLTAÏQUE
REGION DE DORI GOROM GOROM

Figure 64 CARTE DES FAILLES RELEVÉES PAR GÉOLOGIE, PAR IMAGERIE LANDSAT ET PAR AÉROMAGNÉTISME (J. L. ASTIER F.A.O. Rome 1 / 1981)

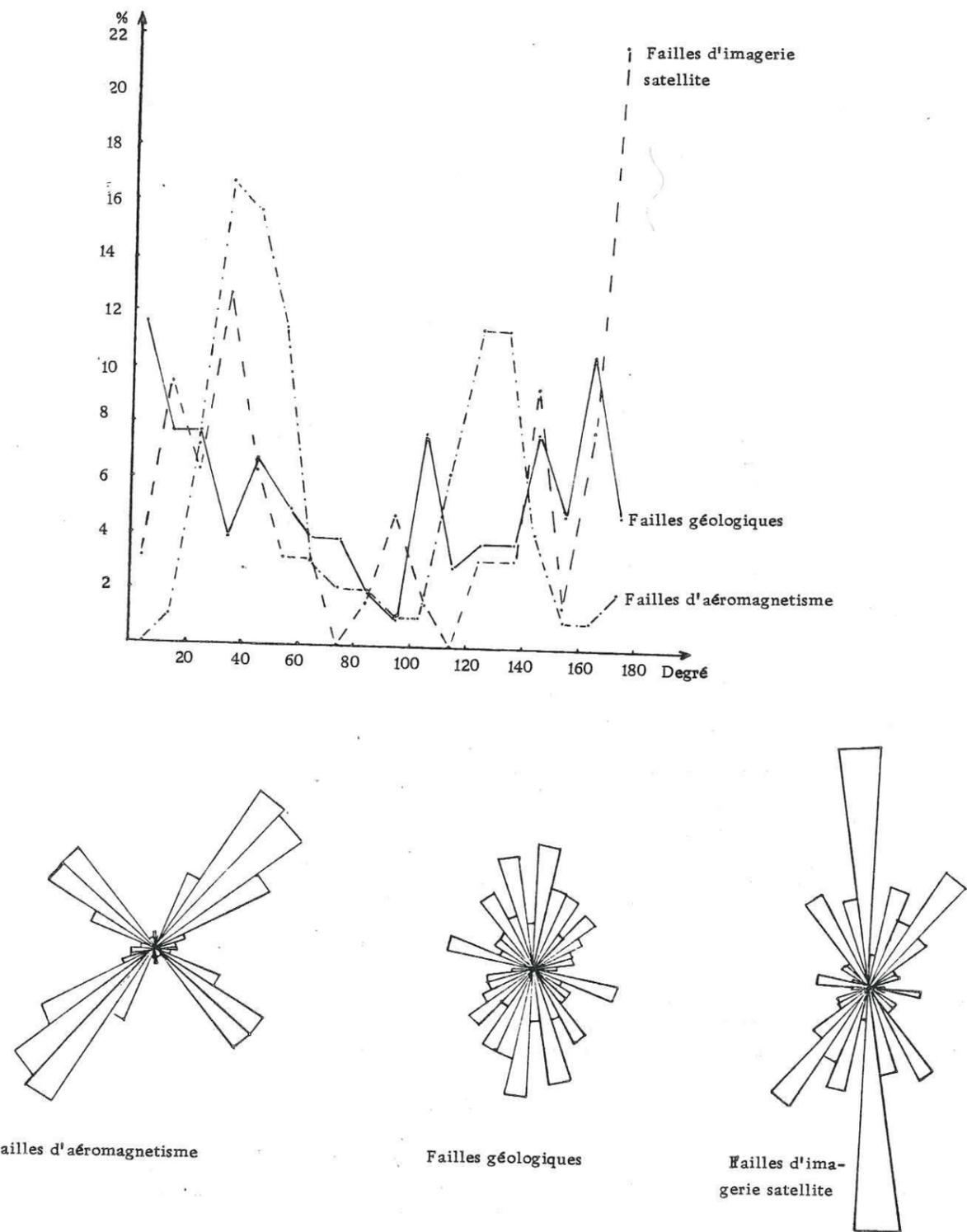


Figure 65 : Analyse fréquentielle des directions de failles relevées par géologie, imagerie LANDSAT et aéromagnétisme.

Débit en m ³ /h	Distance en m				Nombre d'ouvrages
	D > 1000	600 < D < 1000	300 < D < 600	D < 300	
> 1	30 ouvrages 50,9%	20 ouvrages 50%	11 ouvrages 30,6%	12 ouvrages 25,5%	73
1 à 2	13 ouvrages 22%	7 ouvrages 17,5%	9 ouvrages 25%	12 ouvrages 25,5%	41
2 à 4	10 ouvrages 16,9%	7 ouvrages 17,5%	9 Ouvrages 25%	12 ouvrages 25,5%	38
< 4	6 ouvrages 10,2%	6 ouvrages 15%	7 ouvrages 19,4%	11 ouvrages 23,5%	30
Nombre d'ouvrages	59	40	36	47	182

Tableau 51 : Sahel de Haute-Volta, répartition de 182 puits et forages en fonction de leur débit et de leur distance, D, à une faille aéromagnétique.

(d'après J.L. Astier - F.A.O. 1981)

RELATION ENTRE DEBIT DES PUIITS ET DES FORAGES ET LEUR POSITION PAR RAPPORT AUX ACCIDENTS AEROMAGNETIQUES

182 ouvrages dont 15 puits et 167 forages ont été positionnés par rapport aux axes d'anomalies aéromagnétiques par J.L. ASTIER qui en arrive aux conclusions suivantes:

"Le résultat est extrêmement clair: les débits des ouvrages proches d'une faille aéromagnétique sont en moyenne bien supérieurs à ceux des autres ouvrages. Si on compare les débits des ouvrages situés à moins de 300 mètres d'une faille aéromagnétique avec ceux des ouvrages situés à plus de 1000 mètres on constate que les pourcentages des ouvrages avec un débit inférieur à 1 m³/heure et supérieur à 4 m³/h sont l'un divisé par 2 et l'autre multiplié par 2,3"

et l'auteur de poursuivre:

"... les failles aéromagnétiques provoquent une nette fissuration de la roche jusqu'à une distance de 600 mètres. Les résultats des ouvrages situés entre 300 et 600 mètres d'une faille aéromagnétique sont inférieurs à ceux des ouvrages situés à moins de 300 mètres, mais sont nettement supérieurs à ceux des ouvrages situés à plus de 600 mètres".

Ces conclusions méritent d'être discutées, surtout à cause des facteurs pris en considération pour y parvenir:

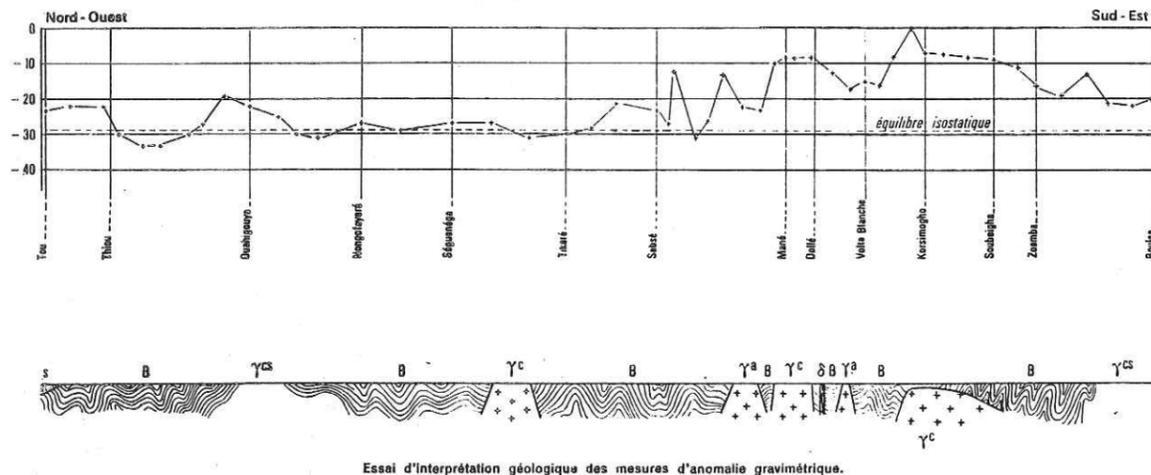
Premièrement, il faut relever que les ouvrages dont les positions ont été déterminées par rapport aux accidents aéromagnétiques, afin d'en estimer l'influence sur les débits, ont été implantés dans la très grande majorité des cas sur des linéaments de photos-interprétation confirmés comme étant des failles géologiques accompagnées de zones broyées par prospection géophysique (méthode électrique des résistivités). Ces failles sont donc avant tout des linéaments perçus sur photos aériennes. Or ASTIER constate (et notre analyse fréquentielle aboutit à la même conclusion) que les failles aéromagnétiques ne coïncident que très rarement avec les linéaments des images de satellites et les failles géologiques. C'est dire que l'appréciation qu'on a pu faire de l'influence des accidents aéromagnétiques sur les débits des ouvrages implantés sur les linéaments perd de son sens.

Deuxièmement, l'extension de 600 mètres de fissuration liée au passage d'une faille est en contradiction avec toutes les données d'observation sur le terrain et avec les différents résultats obtenus par toutes nos méthodes d'investigation. En effet, les zones broyées des mégafractures, même de longueur plurikilométrique, ont à peine plusieurs décimètres d'extension latérale. Cette faible extension latérale de la zone broyée des failles et la faible influence de ces dernières en dehors de celle-ci (Réf. les faibles perméabilités induites trouvées) a été la cause de nombreux échecs d'implantations dans les formations cristallines du socle où l'imprécision des repérages peut amener à se situer en zone stérile à quelques mètres des couloirs productifs. Ce qui prouve comme le dit D. JAMIER (1975): *"qu'il peut être finalement dangereux d'implanter un forage aléatoirement dans une zone que l'on sait qualitativement être très fracturée. En effet, il existe toujours une probabilité non négligeable de rencontrer de faibles fréquences, dans un domaine où la fréquence moyenne est nettement supérieure à la fréquence moyenne régionale"*.

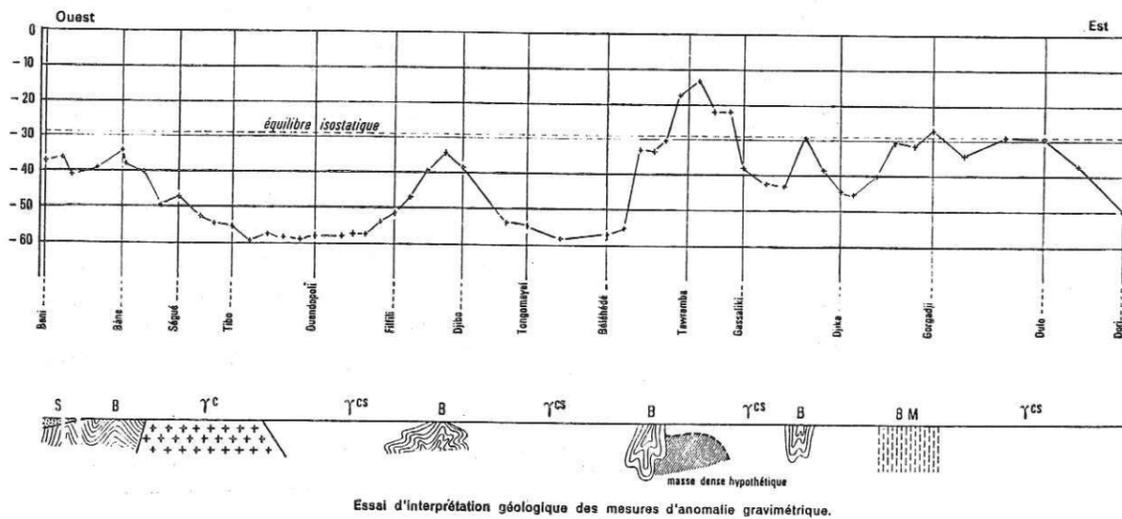
Conclusion

Sans qu'il y ait une remise en cause de l'intérêt que peut avoir en hydrogéologie l'exploitation des données de l'aéromagnétisme, on ne peut pas conclure que cette étude d'ASTIER donne une démonstration de la productivité des ouvrages en rapport avec les accidents aéromagnétiques. Comme pour les linéaments des images de satellite, la signification hydrogéologique des accidents aéromagnétiques gagnerait à être précisée par des études détaillées au sol, suivies de forages et de pompages d'essai. Il en est de même d'ailleurs de la gravimétrie dont J. DUCCELLIER (1963) montre bien la capacité à permettre la différenciation des faciès pétrographiques (fig.66). Ils sont l'un et l'autre (aéromagnétisme et gravimétrie) des méthodes dont les données sont utiles pour dégrossir les problèmes hydrogéologiques régionaux. La gravimétrie peut servir notamment à définir les grands ensembles géologiques surtout dans nos régions où les affleurements sont si rares. Elle semble également indiquée pour le repérage des zones de contact entre formations pétrographiques différentes que l'on sait être de haute productivité hydraulique.

Profil gravimétrique de Tou à Ouahigouya, Séguénéga, Sabsé, Mané, Korsimogho et Boulssa



Profil gravimétrique de Bani à Bâne, Tibo, Djibo, Gassaliki, Gorgadjji et Dori

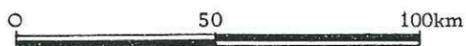


PROFILS GRAVIMÉTRIQUES

LÉGENDE DES COUPES

- | | | | |
|-----|--|-----|--------------------------|
| S | Formations sédimentaires | B | Dolérites |
| qPc | Série de Tourcoingham | 0 | Gabbros post-birimien |
| T | Série de l'Oudalan oriental | C | Syénite |
| B | Birimien (groupes de Rizon et de Dacole) | T4 | Granite alcalin |
| MB | Amphibolo-pyroxénite | Tc | Granite calco-alcalin |
| qD | Série de Banga | TvS | Granodiorite |
| F? | Faïlle hypothétique | Tc2 | Granite calco-alcalin |
| | | BM | Migmatites |
| | | | Masse dense hypothétique |

Echelle :



3.2.3.2. LA PROSPECTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE APPLIQUÉE À LA RECHERCHE D'EAU DANS LES FORMATIONS DU SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE-VOLTA

INTRODUCTION

L'électromagnétisme a été souvent employé dans les recherches minières en Haute-Volta où il se prête bien à la détection de conducteurs étroits et verticaux que peuvent constituer les filons et les dykes intrusifs de nature pétrographique variée. Il apparaît donc judicieux de penser que l'électromagnétisme peut également servir pour la localisation précise des zones broyées conductrices qui accompagnent les mégafractures.

Dans les faits l'électromagnétisme n'a été utilisé comme méthode d'investigation hydrogéologique en Haute-Volta qu'à titre expérimental, et ses données ont été comparées à celles fournies par la méthode électrique des résistivités. L'essentiel des études fut mené par I.W.A.C.O. en collaboration avec l'A.V.V. sur les périmètres de Rapadama, de Mankarga et de Tiébélé qui ont servi de sites tests. Nous avons pour notre part obtenu d'I.W.A.C.O. l'exécution d'un profil électromagnétique sur un profil de traîné électrique que nous avons réalisé pour l'implantation d'un forage dans le camp militaire de Gounghin (à l'Ouest de Ouagadougou).

Les résultats préliminaires des études firent l'objet d'un rapport interne en Février 1980, et ceux définitifs celui d'une note publiée dans le bulletin du C.I.E.H. paru en 1981-1982.

3.2.3.2.1. PRINCIPE ET APPAREILS UTILISES

Les méthodes électromagnétiques reposent toutes sur le fait que lorsqu'on soumet un corps électriquement conducteur à un champ magnétique primaire (Hp), ce corps est parcouru par un courant induit qui engendre à son tour un champ magnétique secondaire (Hs) qui en s'ajoutant au champ primaire donne un champ résultant (Hr) différent, permettant de caractériser et de localiser le corps conducteur (ASTIER, 1971; MATHIEZ, 1966; SEGUIN, 1971

Si l'on considère un plan contenant Hp et Hs on peut décomposer chacun des champs en deux composantes spatiales, suivant des coordonnées rectangulaires X et Z. On obtient ainsi Re et Im qui sont les composantes réelles et imaginaires du champ résultant.

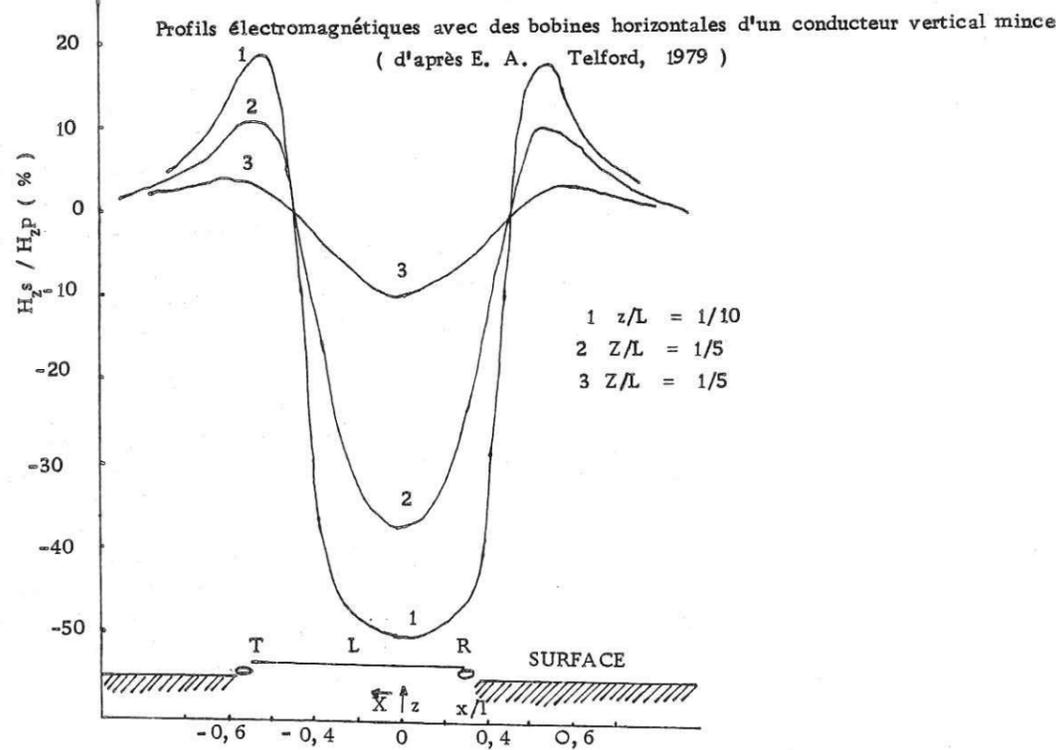
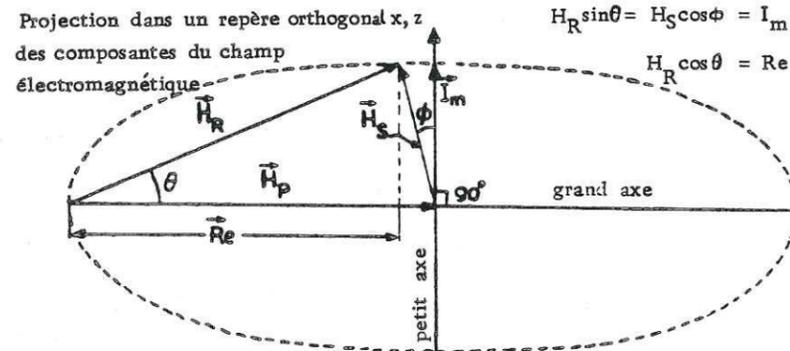
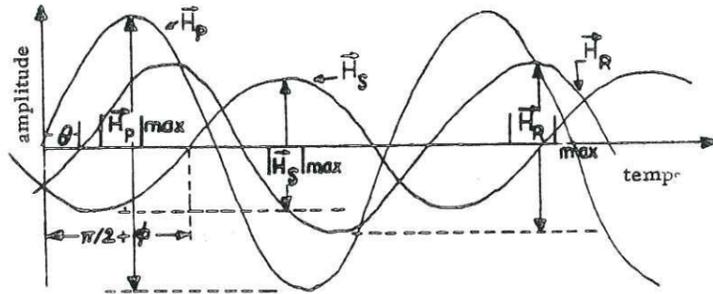
Plusieurs caractéristiques du champ induit peuvent être étudiées: son amplitude, son déphasage ou son inclinaison θ par rapport au champ primaire. Ici on donnera les mesures en pourcentage du champ primaire dans les deux méthodes employées.

M.K. SEGUIN (1971) divise les méthodes électromagnétiques en deux groupes: les méthodes dans lesquelles la source du champ primaire (émetteur) est fixe tandis que le récepteur est mobile, et les méthodes dans lesquelles l'émetteur ainsi que le récepteur sont mobiles. Les deux appareils utilisés pour les études expérimentales dont nous parlerons correspondent à l'une ou à l'autre des deux méthodes. Ce sont:

Un magnétomètre EM 16 pour prospection électromagnétique V.L.F. (very low frequency). Il existe dans le monde de nombreuses stations émettant des champs électromagnétiques de basses fréquences conçus pour servir dans la navigation maritime et aérienne. Mais ces champs électromagnétiques peuvent également être utilisés dans les prospections géophysiques. En Afrique de

FIG. 67 : PROSPECTION ELECTROMAGNETIQUE. SCHEMAS DE PRINCIPE ET PROFILS OBTENUS AVEC BOBINES HORIZONTALES

Propagation dans le temps et l'espace des champs électromagnétiques



L'Ouest les ondes captables sont celles émises à partir du Culter et de Maine (17,9 Hz - 330°) par la N.A.A. des Etats Unis ou à partir de Bordeaux (15,1Hz - 0°) par la F.U.O. de France. Du fait de l'orientation relative des stations recevables en Haute-Volta, les structures les mieux détectables sont celles orientées N 45° et N 105°. Ceci constitue un des inconvénients que présente la prospection en V.L.F. et donc aussi du magnétomètre EM 16 qui est un récepteur tributaire de ces stations fixes qui sont ici très éloignées des aires de prospection.

Vu l'éloignement de l'émetteur par rapport à l'étendue des zones à prospector, on peut considérer que le champ primaire est constant. Sa profondeur de pénétration ou d'investigation dépend de la résistivité des roches du sous-sol.

Tableau 52 : Profondeur d'investigation en fonction de la résistivité

Résistivités en ohm.m	Profondeur d'investigation en m
10	10 à 15
40	20 à 25
100	30 - 40
200	46 - 60

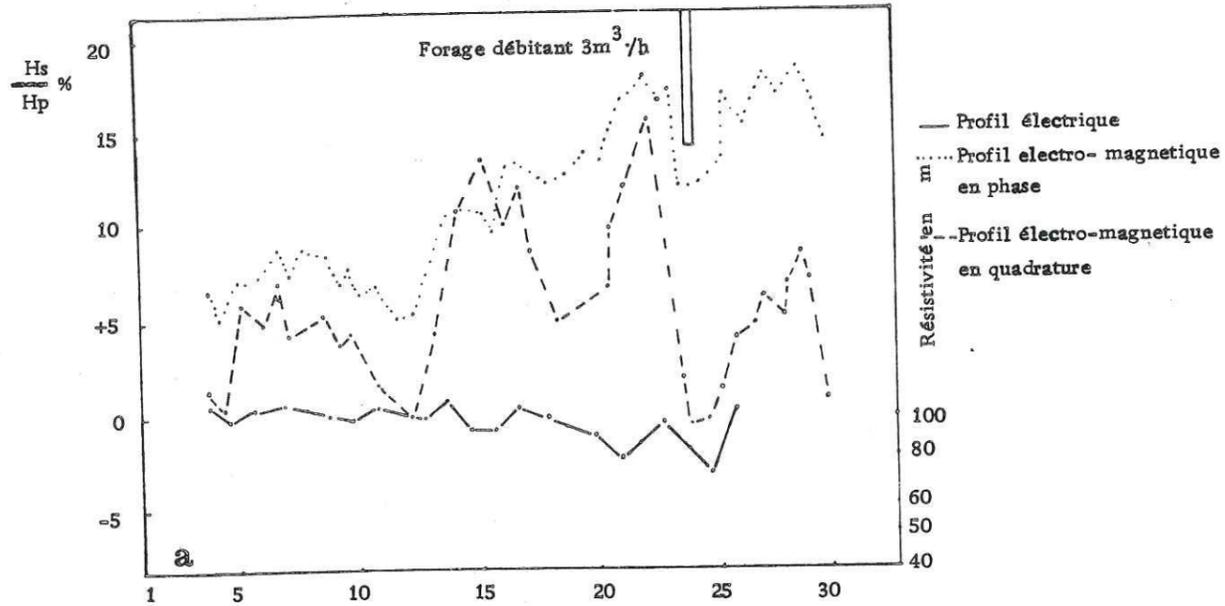
Un magnétomètre APEX MAX-MIN II qui est un couple émetteur-récepteur mobile manipulable par deux personnes avec des fréquences opérationnelles de 222, 444, 888, 1777 et 3555 Hz.

- La profondeur d'investigation du dispositif varie en fonction:
- de la distance émetteur-récepteur. Elle est d'environ 0,30 à 1 fois cette distance;
 - de la résistivité des terrains. Plus elle est basse et plus la profondeur est grande;
 - et enfin des fréquences du champ électromagnétique émis.

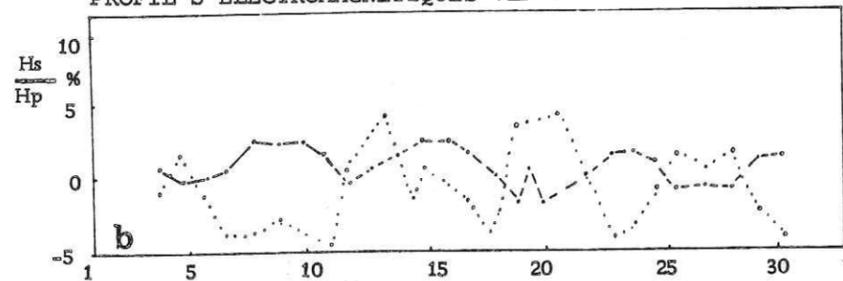
Plus elles sont basses et plus la profondeur d'investigation est grande. Mais les amplitudes des variations en basses fréquences sont faibles. Lorsque les fréquences baissent, l'amplitude des variations du champ électromagnétique décroît. Ce phénomène rend difficile la détection des anomalies en basses fréquences qui sont les plus pénétrantes.

L'amplitude de variation électromagnétique en quadrature de phase est généralement plus importante que celle du champ en phase. Mais d'une manière générale, on note qu'il y a une coïncidence entre les anomalies électriques et celles électromagnétiques. Toutefois, l'importance de certains couloirs d'anomalies est beaucoup plus accusée sur les profils électromagnétiques que sur les profils de résistivités apparentes. Et ceci à tel point qu'on peut dégager sur les profils de traîné électrique s'estompe (figure 2a). Ainsi, sur les profils de la figure 2a, il n'y a pas de différence entre les anomalies centrées sur les mesures 11 et 25, alors que sur le profil de résistivités apparentes, l'anomalie centrée sur la mesure 25 est nettement plus marquée que celle de la mesure 11. Si bien qu'en l'absence du profil de traîné électrique le choix des couloirs d'implantation peut être difficile.

PROFILS ELECTROMAGNETIQUES APEX MAX-MIN ET RESISTIVITE APPARENTES



PROFILS ELECTROMAGNETIQUES VLF



PROFILS ELECTROMAGNETIQUES SUR SUBSTRATUM EBURNEEN

(Site de Mankarga)

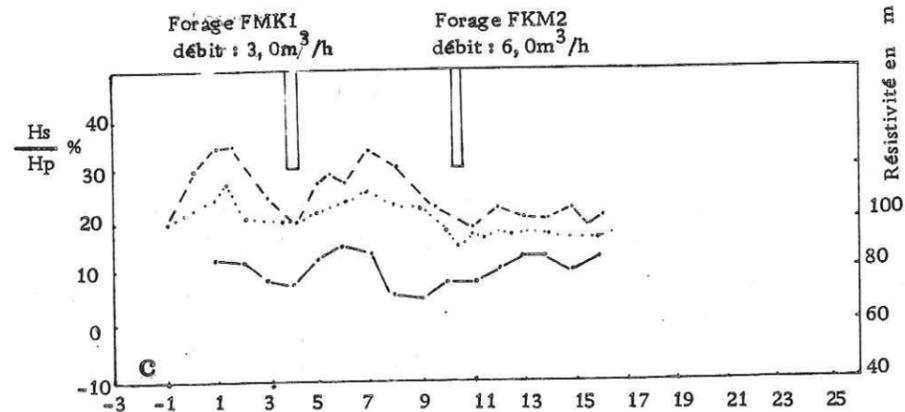
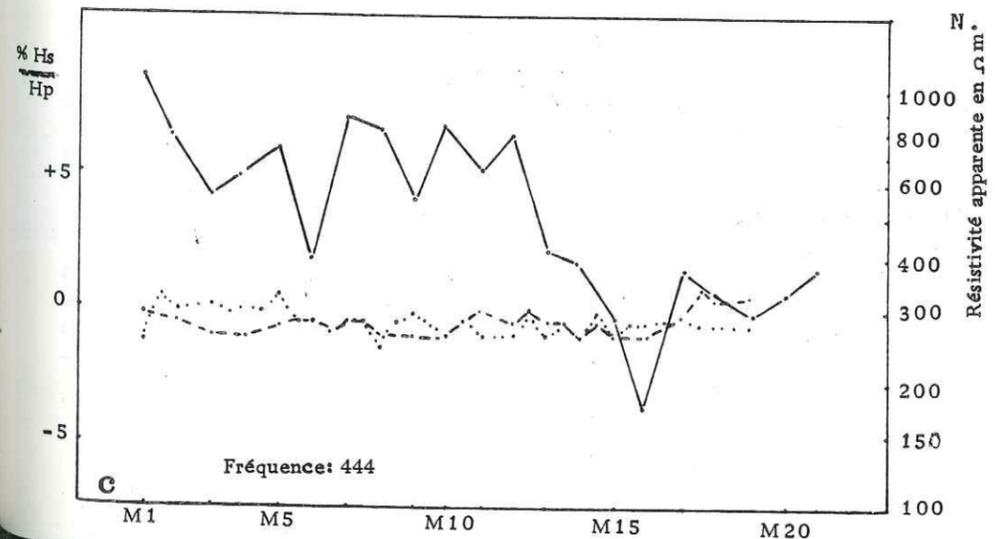
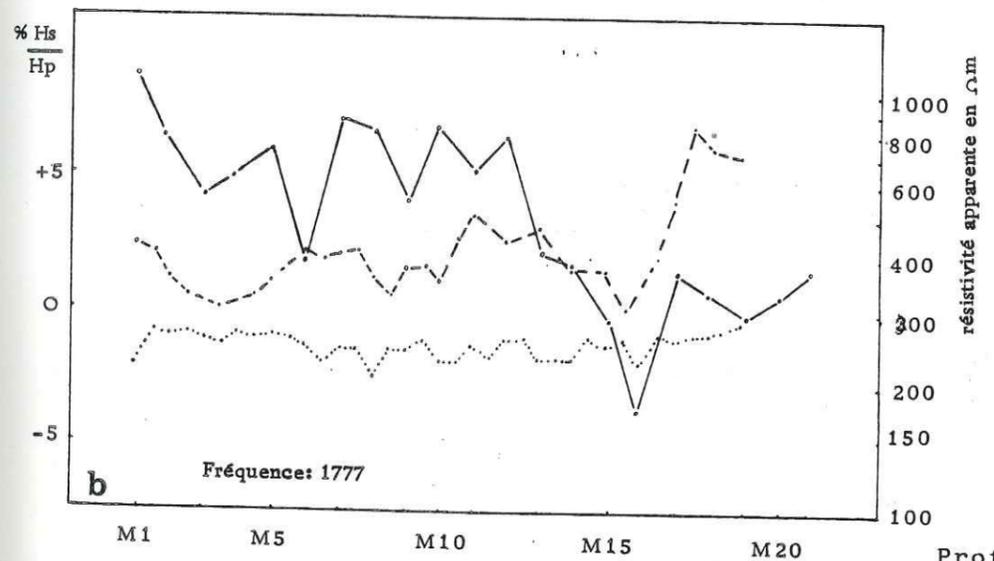
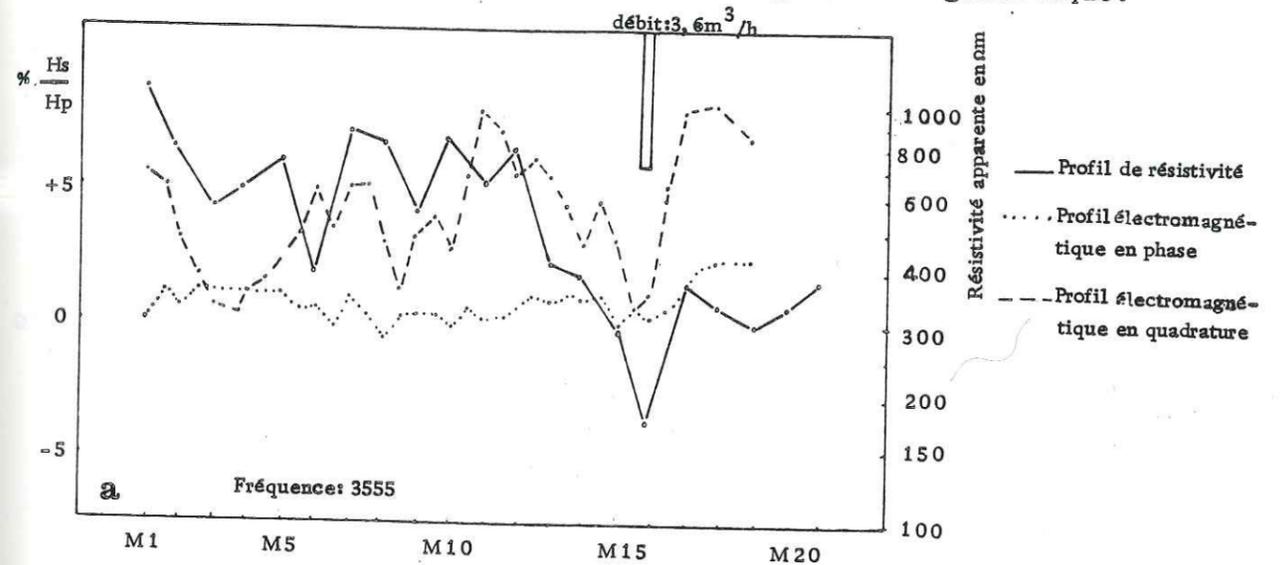


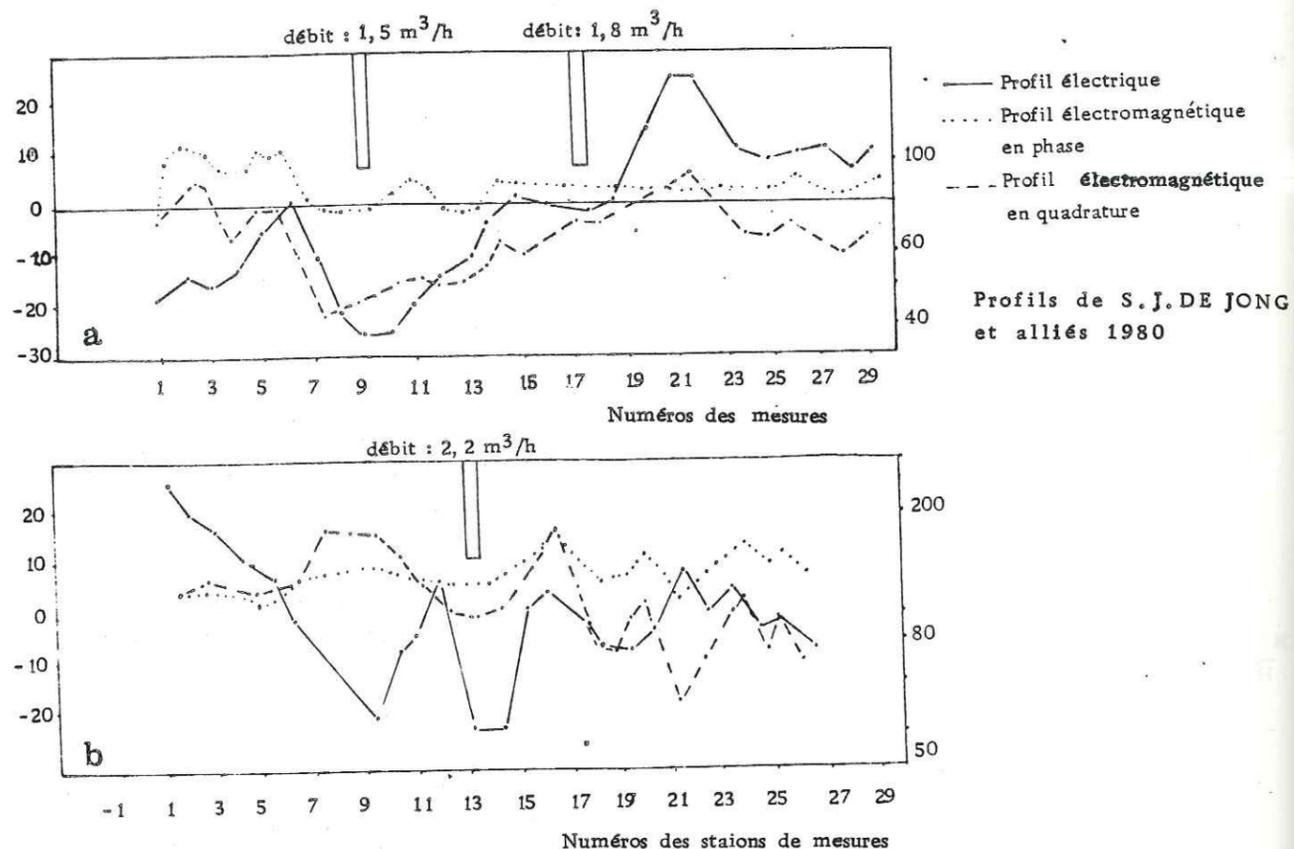
FIG. 68a : COMPARAISON ENTRE PROFILS ELECTROMAGNETIQUES ET LES RESISTIVITES APPARENTES

Figure 68b.: Comparaison entre profil de résistivités et profils électromagnétique. Camp militaire de Goughin (Ouagadougou Ouest), site sur granite migmatitique.



Profils établis par I.W.A.CO. et N. Savadogo, 1980.

Fig.68c: Profils électromagnétiques et électriques et ouvrages de captage sur substratum éburnéen



Un inconvénient notable de la méthode électromagnétique par rapport à la méthode de prospection électrique, c'est surtout la signification des axes d'anomalies recoupés. En effet, étant donné que la résistivité apparente obtenue par trainé électrique s'identifie à une donnée de sondage électrique un étalonnage permet une interprétation plus fiable des résistivités apparentes de trainé électrique que des valeurs du champ électromagnétique qui dépendent tout aussi bien des variations de faciès pétrographiques (passage de filon) que de l'altération jouxtant les mégafractures.

3.2.3.2.2. VARIATIONS DES DEBITS AVEC L'IMPORTANCE DES COULOIRS D'ANOMALIE

Les résultats de différents forages réalisés montrent qu'il n'y a pas une relation simple entre l'importance des variations de résistivités apparentes ou du champ électromagnétique et les débits des ouvrages de captage. Ce qui apparait par contre nettement dans les ouvrages implantés dans les sillons éburnéens (Mankarga), c'est la différence de productivité entre les forages implantés en plein axe conducteur et ceux situés en bordure immédiate. On constate que ces derniers sont les plus productifs (forages Mankarga FMK-KMK7, FMK1-FMK2).

Dans ces formations J. BERGER et al. (1980-1981) trouvent qu'en Côte d'Ivoire, les ouvrages implantés à mi-pente sont plus productifs que dans les axes les plus profonds où l'altération est la plus argileuse du fait certainement de la concentration vers ces points bas des altérites argileuses lessivées à partir des crêtes.

Nous terminons cet exposé sur l'électromagnétisme en signalant deux études récentes menées par DIRKS F., GEINAERT W. et GOUN M. sur les sites de Boussé et de Toma situés au Nord-Ouest de Ouagadougou (A.I.H., International symposium-Noordwijkerhout-Mai 1983-The Netherland).

La ville de Boussé repose sur un substratum granitique où l'on a cherché à localiser un important linéament repéré par photos interprétations. Les anomalies conductrices des profils électromagnétiques et de résistivités apparentes correspondaient, d'après les données des sondages mécaniques, à des filons d'amphibolites.

Il était donc normal que, dans ces conditions, les constats des données électromagnétiques entre encaissant et filon soient plus marqués que pour ceux des résistivités apparentes (figure 68). Nous ne voyons pas, comme le dit DIRKS F. un avantage absolu de l'électromagnétisme sur la méthode des résistivités quant à l'aptitude de mise en évidence de tout linéament. Ce fait n'est que la confirmation que, comme en prospection minière, l'électromagnétisme est mieux indiqué que la méthode des résistivités pour le repérage des filons. Or, tous les linéaments ne correspondent pas souvent à des filons et l'étude du site de Toma le prouve bien et met à égalité les deux méthodes.

Les débits obtenus à Boussé confirment ce que nous avons déjà avancé à propos de la productivité des filons intrusifs, mais ici la faible extension de ceux-ci devrait diminuer les risques de colmatage par leurs altérites argileuses.

Comme celui de Boussé, le site Toma est granitique. Profils électromagnétiques et de résistivités mettent en évidence deux conducteurs et un résistif terminal.

Le forage réalisé sur le second conducteur correspondant à une fracture du substratum a fourni 8 m³/heure, c'est-à-dire autant que les filons de Boussé. Il est dommage que le second forage, plutôt que d'exploiter le premier conducteur, ait été destiné à tester l'anomalie résistante.

Ces deux études montrent, comme c'était le cas pour les trois premiers sites dont nous avons parlé, qu'on peut comparer les données de l'électromagnétisme à celles de la méthode des résistivités et qu'une association des deux outils peut donner de bons résultats.

Dans certaines conditions (fréquence et configuration tellurique), la résistivité apparente du terrain peut être calculée à partir des mesures des composantes des champs magnétiques et électriques, mais aucune tentative n'a encore été faite en Haute-Volta dans ce sens.

CONCLUSIONS

Les premiers résultats obtenus dans les études comparatives entre méthode électromagnétique et méthode électrique sont bons. Cependant, l'électromagnétisme n'a pas été expérimenté tout seul sur quelques plates-formes tests. La rapidité d'exécution des mesures électromagnétiques fait qu'une telle expérience doit être menée, quitte à l'associer à des sondages électriques, avant implantation définitive. Une telle solution augmenterait sensiblement le nombre de sites prospectables par une brigade géophysique dont la composition pourrait ne pas être étoffée par rapport à ce qu'elle est dans la composition électrique.

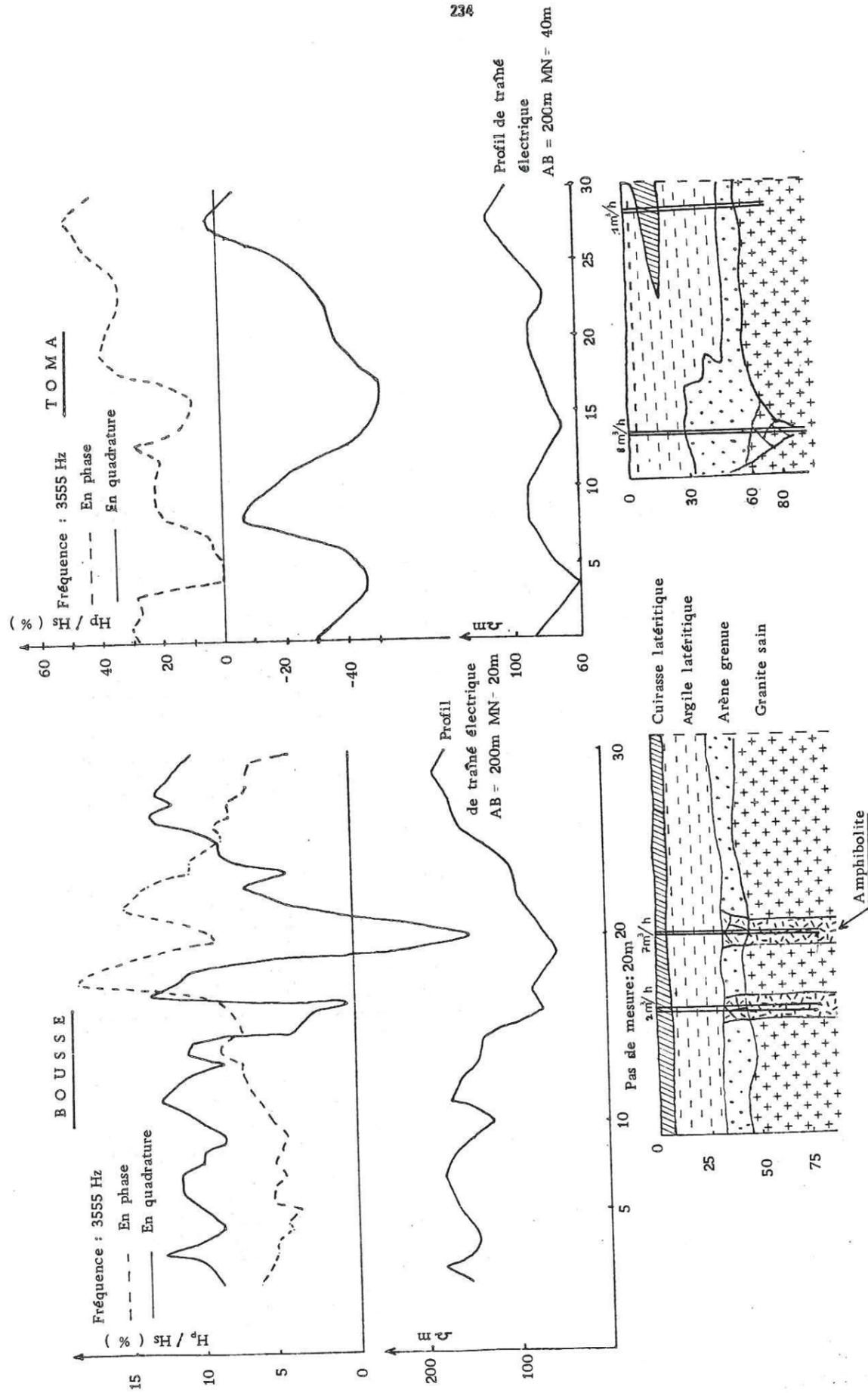


FIG. 68b : PROFILS ÉLECTRIQUES ET ELECTROMAGNETIQUES DES SITES DE BOUSSE ET DE TOMA (d'après F. DIRKS et alliés 1982)

3.2.3.3. PROSPECTION ÉLECTRIQUE ET HYDROGÉOLOGIE DU SOCLE CRISTALLIN

INTRODUCTION

Parmi les méthodes électriques existantes, nous avons choisi d'expérimenter celle des résistivités dans le but d'en connaître les avantages et les inconvénients réels dans notre région d'étude. La confrontation entre les mesures et les résultats des puits et forages devant permettre une meilleure interprétation des premières.

Nous ne traiterons pas ici des principes de la méthode dont les détails sont fournis par de nombreux ouvrages. Nous nous pencherons surtout sur l'interprétation des données des trois variantes de la méthode que nous avons eu à mettre en oeuvre. A savoir les sondages électriques, les profils de traîné et les sondages pluridirectionnels. Nous reprendrons et étofferons par de récents résultats la publication que nous avons faite dans le bulletin n° 35-36 du C.I.E.H. en Mars 1979.

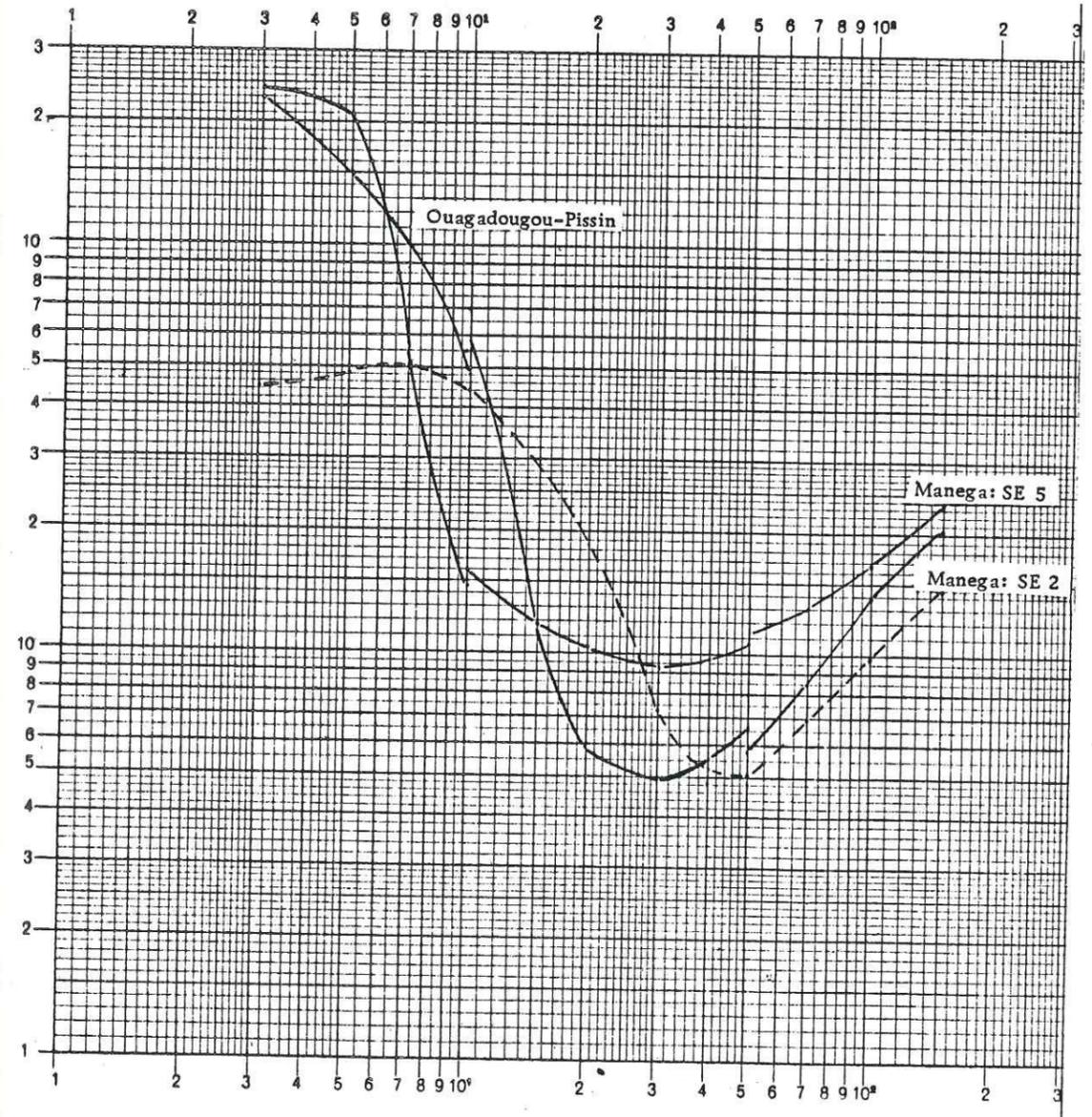


Figure 69: Influence de la frange fissurée sur la branche remontante des courbes

3.2.3.3.1. LES SONDAGES ELECTRIQUES

La courbe de sondage électrique la plus fréquemment obtenue dans les formations du socle cristallin de Haute-Volta et de ses régions voisines est une courbe trois terrains en fond de bateau. (figure 69 Ouaga-Pissin). La formation conductrice est constituée par les arènes granitiques ou les altérites argileuses des roches vertes. Le premier résistant correspond à la cuirasse latéritique et le dernier se traduit par une remontée à 45° au niveau du substratum sain de granite ou de roche verte.

Par le jeu des équivalences, certains horizons bien distincts sur les coupes géologiques ne vont pas se traduire sur la courbe expérimentale mais, suivant l'importance du couple résistivité-épaisseur présenté par chacune des formations du profil, l'allure générale de la courbe va se modifier.

Plus généralement, les fourchettes de variation des résistivités caractéristiques des horizons du profil d'altération sont les suivantes:

- cuirasse latéritique 200 à 4000 Ω m;
- arènes grenues 50 à 150 Ω m;
- altérites argileuses des roches vertes et arènes fluentes: 10 à 60 Ω m, voire de 5 à 60 Ω m;
- roche fissurée 100 à 300 Ω m.

On considère que le substratum sain a une résistivité infinie.

La carapace latéritique, lorsqu'elle est compacte et très résistante, provoque généralement des difficultés dans la réalisation même des mesures de sondages électriques. Elle constitue souvent un écran qu'on ne peut franchir qu'au prix d'une augmentation importante du voltage du courant injecté entre A et B. Son influence sur la courbe se traduit par une translation verticale de tout le graphe. Ce phénomène conduit bien souvent à une mauvaise appréciation de la résistivité des arènes sur lesquelles repose la cuirasse. Les courbes obtenues sur le site de Manega (fig. 69) illustrent bien cette translation verticale liée à l'effet de la cuirasse beaucoup plus résistante sur le sondage SE5 que sur celui SE2.

Dans bien des cas les résistivités baissent régulièrement de la cuirasse aux arènes séparées par les argiles bariolées.

Si nous avons affaire à deux nappes étagées formées au niveau de la cuirasse noyée et des arènes, mais séparées par des argiles bariolées sèches, la courbe devient une courbe à cinq terrains (fig. 70 Kossouka et Yamsindé).

Les arènes conductrices marquent le fond du bateau de la courbe. Elles sont constituées en réalité d'arènes argileuses fluentes, d'arènes grenues, mais aussi bien souvent de la roche fissurée qui, lorsqu'elle est peu épaisse passe inaperçue sur la courbe de sondage électrique. C'est donc géophysiquement un niveau équivalent que l'on rencontre. Et c'est pourquoi les résistivités vraies, mais aussi l'épaisseur des arènes humides sont difficiles à calculer surtout quand elles sont peu puissantes comme le montre la courbe SE1 de la zone 1 du Ranch de Léo (fig.70).

Sur les altérites argileuses des roches vertes, on obtient des résistivités très basses comme le montre la courbe de sondage Daramandougou, qui malgré la résistivité élevée de la cuirasse (2 500 Ω m) a un fond de bateau à 30 Ω m. Sur les roches vertes, une forte humidité permanente des altérites argileuses les rend très conductrices quand bien même elles ne contiennent pas d'eau exploitable.

La frange fissurée du bed-rock est généralement peu épaisse. Et comme sa résistivité est comprise entre celle des arènes et celle du substratum, elle passe souvent inaperçue, cela d'autant que la représentation bilogarithmique rend impossible l'individualisation à grandes profondeurs de couches peu épaisses et présentant les caractéristiques électriques de la roche fissurée. Mais quelquefois, et surtout au niveau des mégafractures, l'épaisseur de la zone broyée du substratum croît considérablement. Ceci se traduira par une remontée traînante de la courbe de sondage électrique (fig. 71).

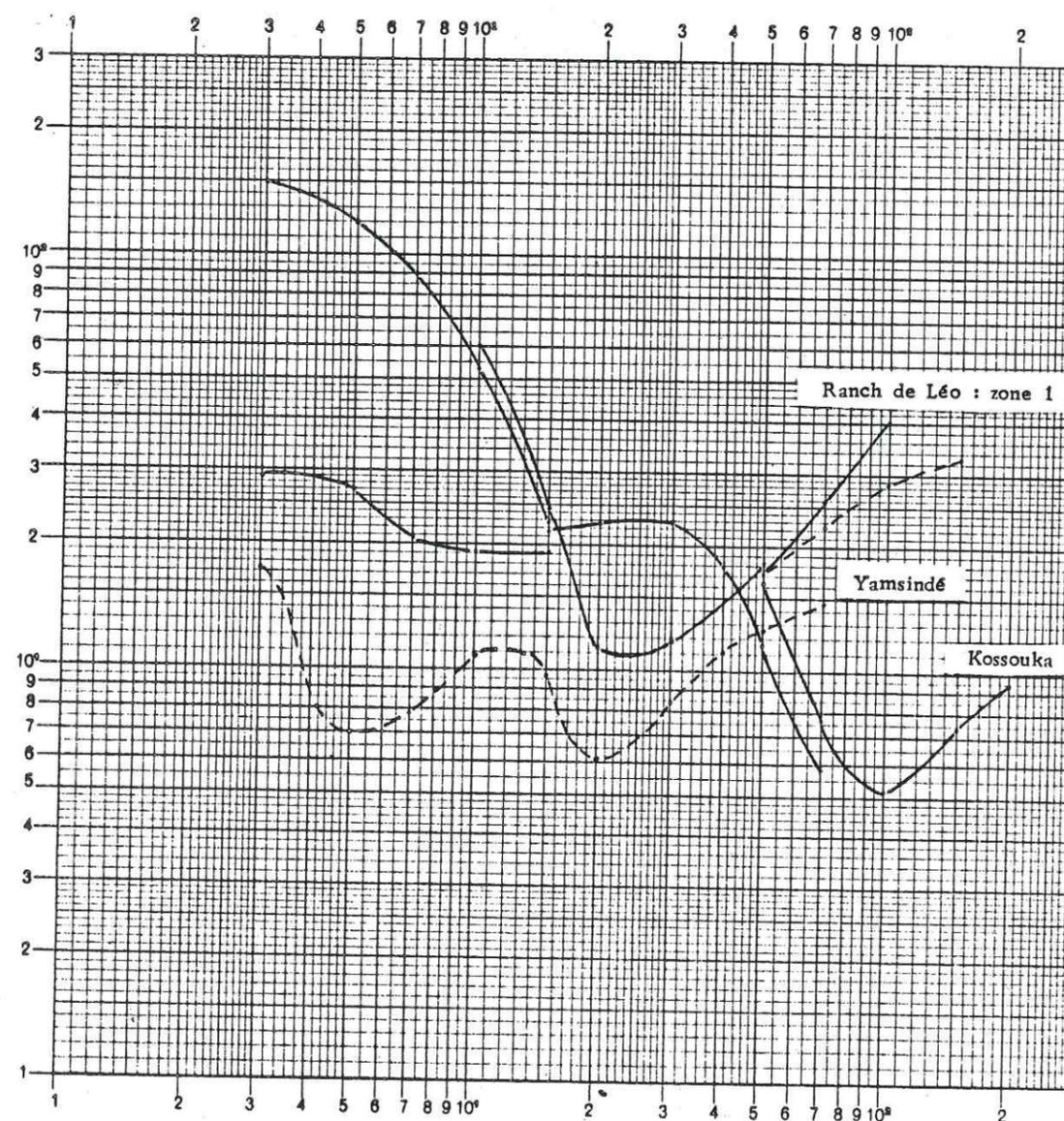


Figure 70: Allure des courbes des sondages électriques en fonction de la nature et de l'épaisseur des terrains

Influence des mégafractures sur l'allure des courbes de sondage électrique

L'importance des mégafractures dans l'hydrogéologie des formations du socle cristallin nous a conduit à analyser, sur les sites où la présence de failles a été prouvée, l'effet de ces failles sur l'allure des courbes de sondage. Plusieurs effets ont été remarqués:

— La remontée trainante, bien sûr, puisqu'elle est liée à une épaisseur importante de la roche broyée et fissurée que nous savons être la caractéristique principale des mégafractures: exemple: Bougouriba Pô Ouest (SE2) et Daramandougou.

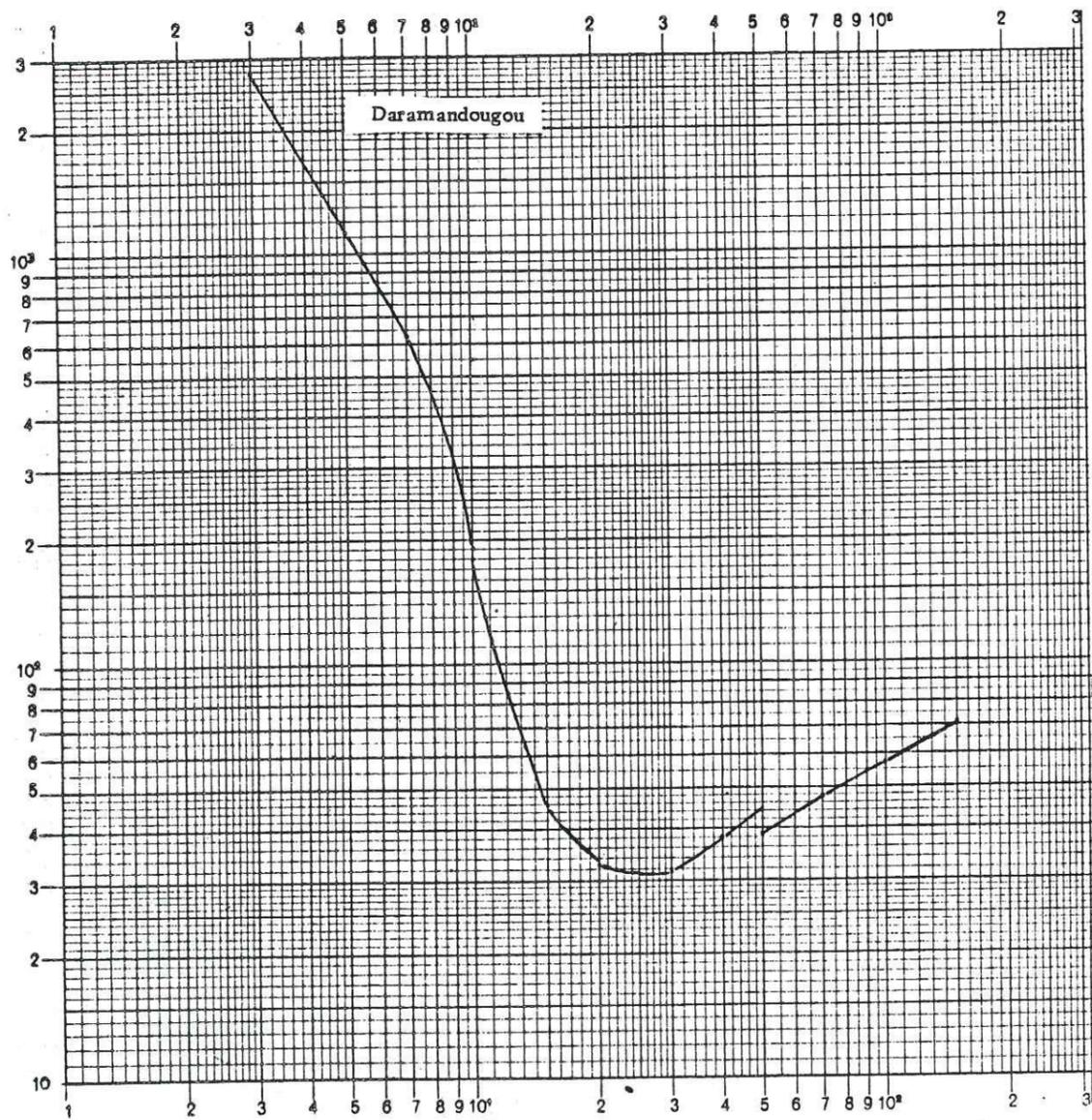


Figure 71: remontée trainante : exemple de Daramandougou

— L'accroissement brutal de l'épaisseur des altérites est aussi à retenir pour la détection des zones faillées, comme l'illustrent très bien les deux sondages électriques réalisés à Djibo à 200 m l'un de l'autre. (figure 72).

— Les sondages électriques incomplets. Comme nous l'avons déjà noté, on constate que la grande stabilité du socle précambrien, que l'on donne pour être une de ses caractéristiques principales, n'est qu'apparente et n'est vraie qu'à grande échelle. Dans le détail, les blocs fracturés continuent à rejouer localement les uns par rapport aux autres. Lorsque ces rejeux sont très récents, ils affectent la couverture d'altérites indurées. Si alors, nous réalisons un sondage électrique dont la ligne AB est tendue perpendiculairement à la direction de la faille, l'ouverture entre les deux lèvres de la fracture entraîne l'existence d'un écran électrique entre les deux compartiments. On constate que le passage de courant est nul jusqu'au toit de la nappe où l'eau vient fermer le circuit. Ce phénomène a été constaté en 1978 lors de la prospection que nous faisons dans les périmètres A.V.V. de la Bougouriba. Rappelons aussi le rejeu en ouverture qui s'est produit à Bollé lors de l'exécution du forage n°2 et près du marché de ce village.

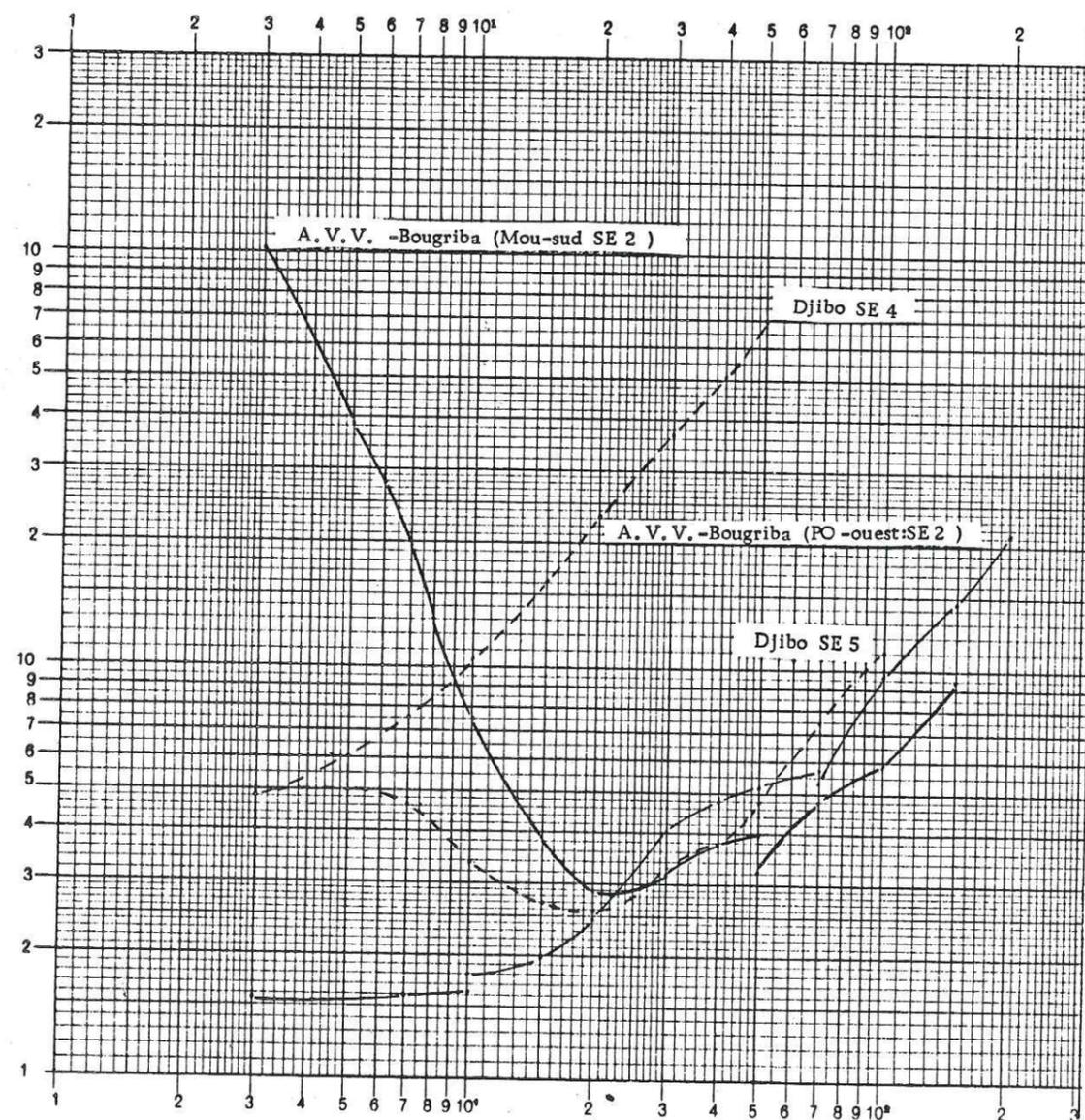


FIG. 72 : Influence des failles sur l'allure des sondages électriques

— *Les "embrayages" très larges. Un phénomène fréquent sur les courbes de sondages réalisés au niveau des mégafractures est l'effet d'embrayage lâche. Lorsque nous réalisons les sondages électriques, nous procédons à deux embrayages l'un à 10 mètres pour MN = 2 et MN = 5 m, l'autre à 50 mètres pour MN = 5 et MN = 20 m. Comme l'effet des failles se manifeste souvent à partir des 50 mètres de longueur de ligne OA, la courbe de sondage électrique est marquée par des valeurs écartées à l'embrayage.

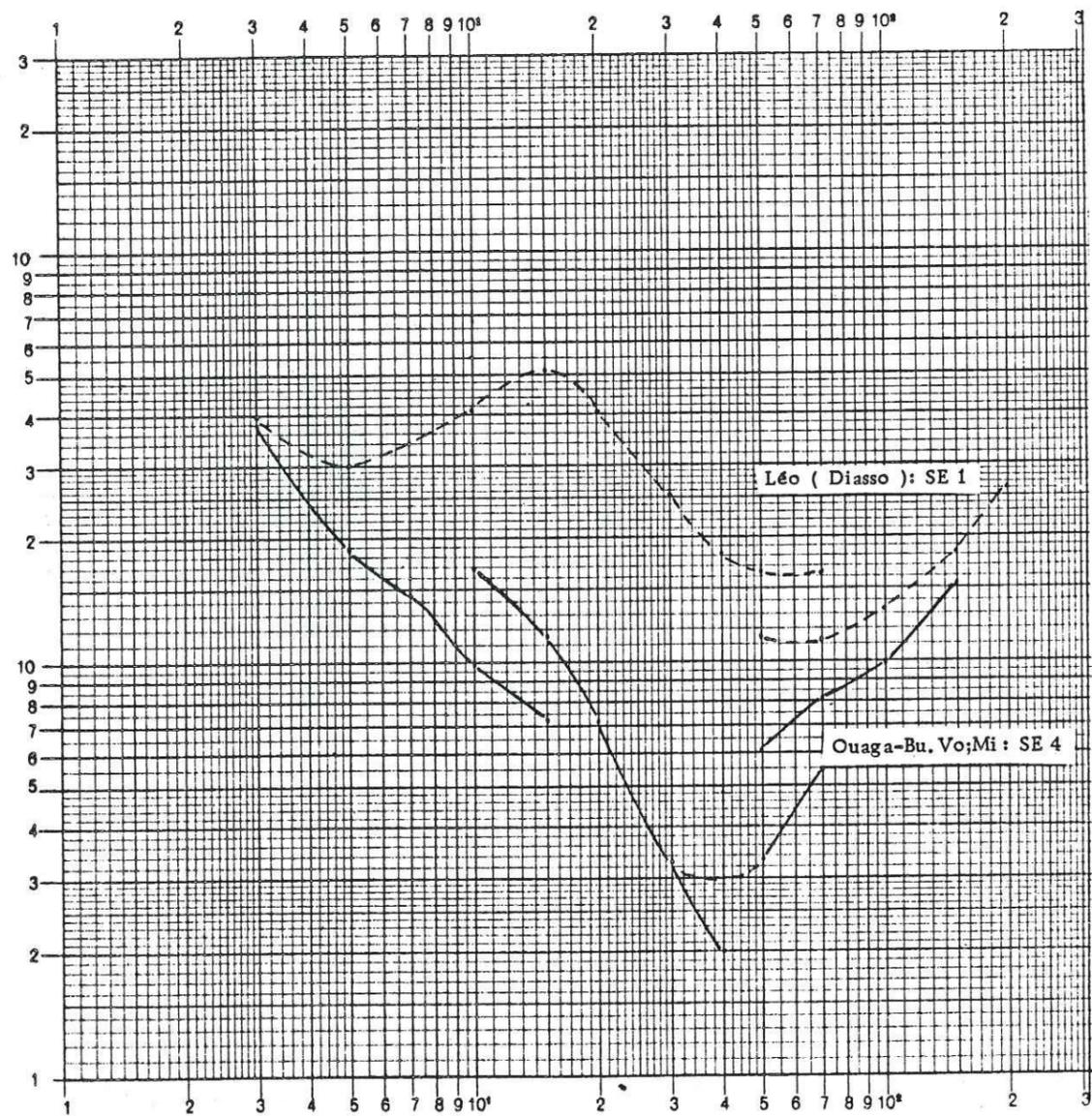


FIG. 73 : Influence des fractures sur l'allure des sondages électriques

* Définition de l'embrayage

Nous parlons d'embrayage lorsqu'au cours de l'exécution du sondage électrique, avec un dispositif de type SCHLUMBERGER, on réalise avec la même longueur de ligne AB deux mesures de la résistivité apparente en changeant l'écartement de M et N. Ce qui a lieu lorsque AB devenant grand la d.d.p. devient difficilement mesurable entre M et N.

Selon nous ce phénomène peut s'expliquer de la manière suivante :

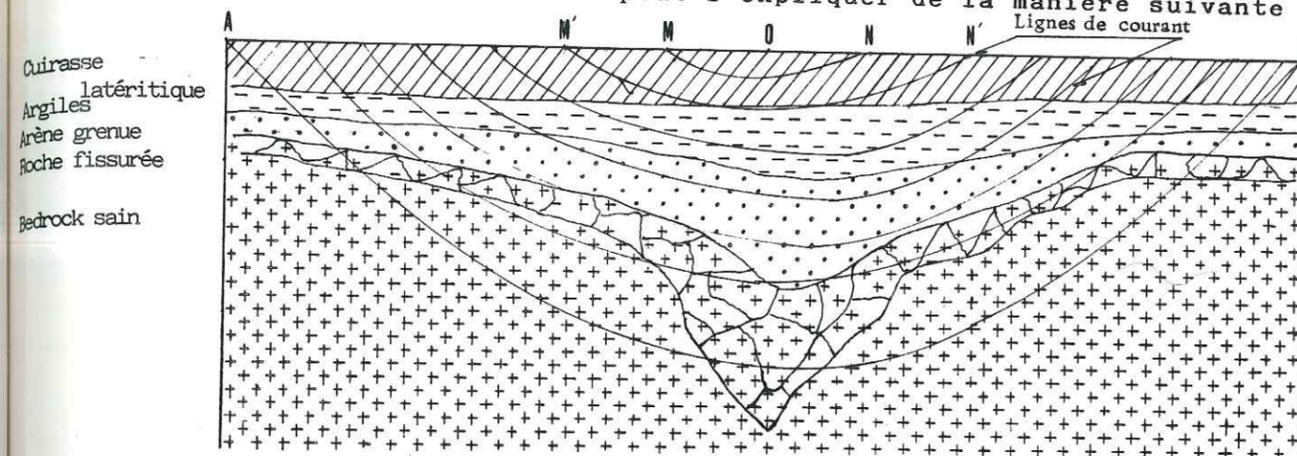


Figure 74 : Géologie et distribution des lignes de courant.

Avec une longueur de ligne AB = 80 mètres, nous restons souvent dans des arènes argileuses, et la courbe commence à se stabiliser au fond du bateau ou même à remonter sous l'influence des arènes grenues. Si alors à l'embrayage des 50 mètres (AB = 100 m), l'essentiel des lignes de courant qui intéressent les électrodes MN varie beaucoup parce que la régularité des horizons du profil d'altération est interrompue entre la zone fracturée et son encaissant, les valeurs à l'embrayage sont très différentes pour les deux valeurs de MN avec AB constant. Le saut à l'embrayage peut être négatif ou positif. Le premier cas est réalisé lorsque, quittant les arènes des zones bordières de la faille, on tombe sur de la frange encore argileuse surmontant la couche fracturée (Léo Diasso SE₁). Le saut positif se produit lorsque l'épaisseur des altérites argileuses et humides est faible, et qu'au changement de longueur de ligne MN on intéresse surtout la frange fissurée du bedrock. Nous avons retenu, pour illustrer ce cas, le sondage Ouaga-BU.VO.G.MI SE4 réalisé à l'intersection de deux failles. La courbe présente deux sauts: l'un à dix mètres correspondant à la cuirasse noyée et le deuxième à l'effet conjugué des deux failles. Notons que le forage qui y fut implanté débite plus de 6 m³/h.

Dans les zones faillées, l'expérience montre que pour obtenir une courbe régulière dont le dépouillement reflète les successions et les épaisseurs réelles des couches, il faut réaliser le sondage sur une ligne AB, parallèle à la faille.

. Les failles obliques. Les mégafractures, si elles sont généralement verticales dans nos formations du socle, peuvent être obliques. Elles ne sont alors repérables que par un dispositif carré (J. CAMERLO et J.C. FAHY, 1981) ou par traîné électrique, lorsque la longueur de ligne AB choisie permet de s'intéresser à la zone broyée de celle-ci.

Ces exemples, qui se rencontrent quelquefois sur les granites et les migmatites (Kossouka SE4), sont surtout fréquents dans les régions de roches vertes. Nous donnons ici des exemples que nous avons rencontrés dans les périmètres A.V.V de la Bougouriba en 1978. Les courbes en escalier de la figure indiquent la présence d'un recouvrement argileux qui peut être sec jusqu'au bed-rock (SE1) ou comporter des niveaux humides argileux (SE2) ou de roche fracturée (SE3). Ces courbes, après avoir entamé leur remontée à 45°, subissent des inflexions liées à l'intersection des fractures.

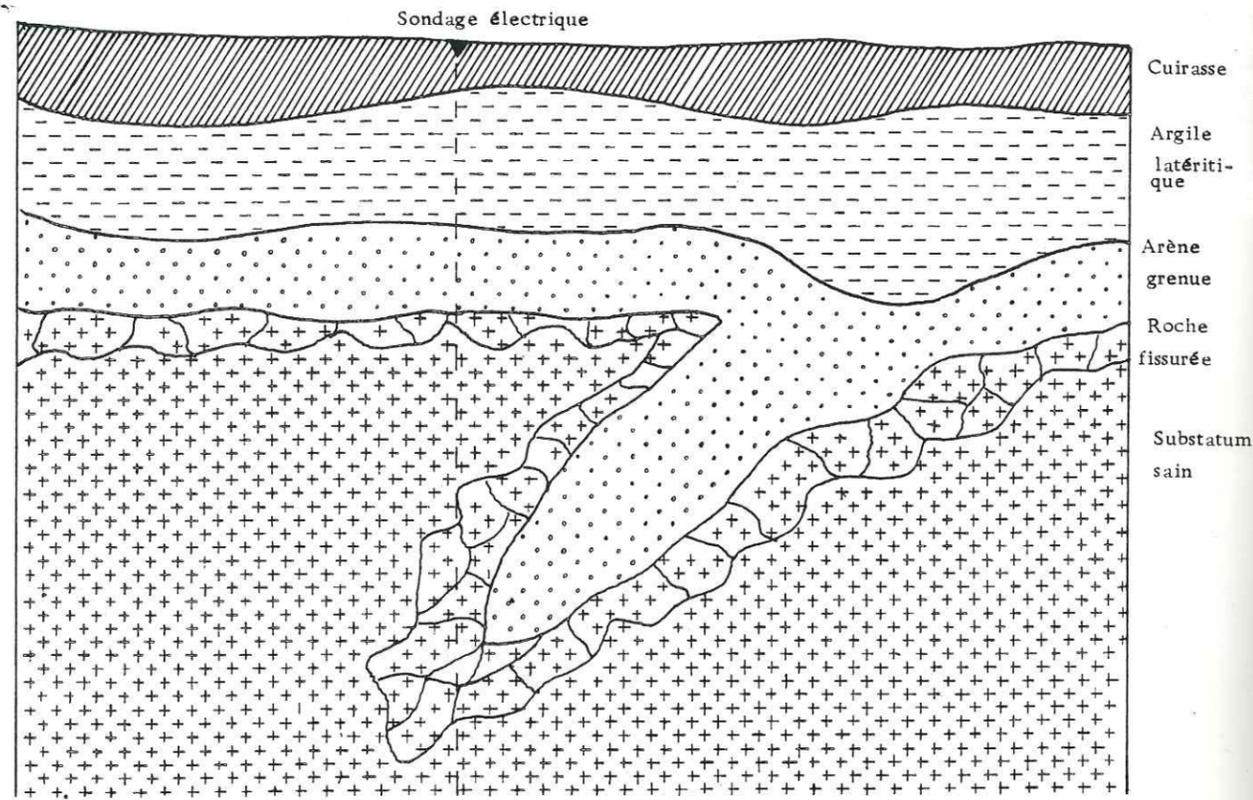
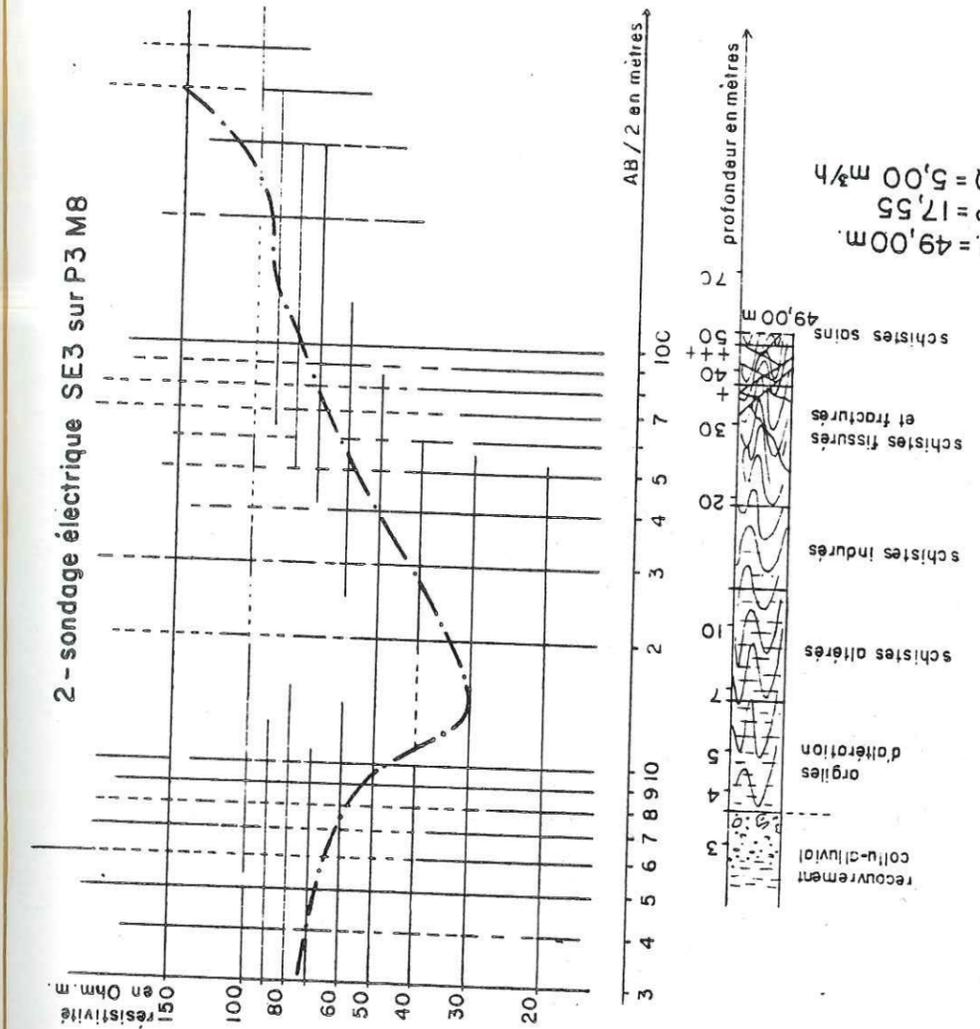
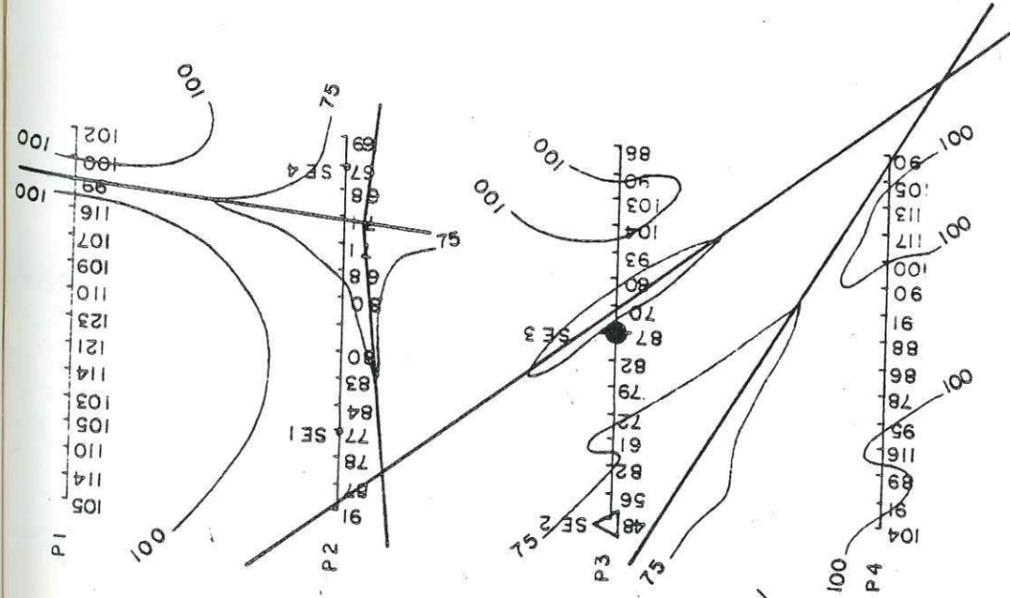


Figure 75: Exemples de structure donnant une courbe de sondage à branche montante en escalier

L'effet le plus spectaculaire des cas observés jusqu'à présent est donné par les courbes SE3 où, entre AB = 140 et AB = 200 m, les résistivités chutent comme au niveau de certains embrayages. La remontée trainante entre OA = 100 et OA = 200 mètres indique l'importance de la zone broyée qui accompagne la faille. La courbe amorce, à partir de OA = 200 m, la remontée à 45° liée au substratum sain. Dans le périmètre A.V.V. à substratum schisteux de Mogtêdo Bomboré, P. BERARD (1977) (fig. 76) donne un autre exemple correspondant à la mise en évidence d'une faille inclinée dont l'effet est bien marqué sur la remontée finale par une inflexion.



3 - sondage de reconnaissance SMB 15/ FMB 8



1 - carte de résistivité apparente
 Δ emplacement à tester
 ● forage SMB15

FIG. 76 : bloc de Mogtêdo Bomboré - plate-forme MB 13 - d'après P. BERARD A.V.V. - 05 / 1977 - échelle 1/5000
 corrélations prospection géophysique - sondages de reconnaissance

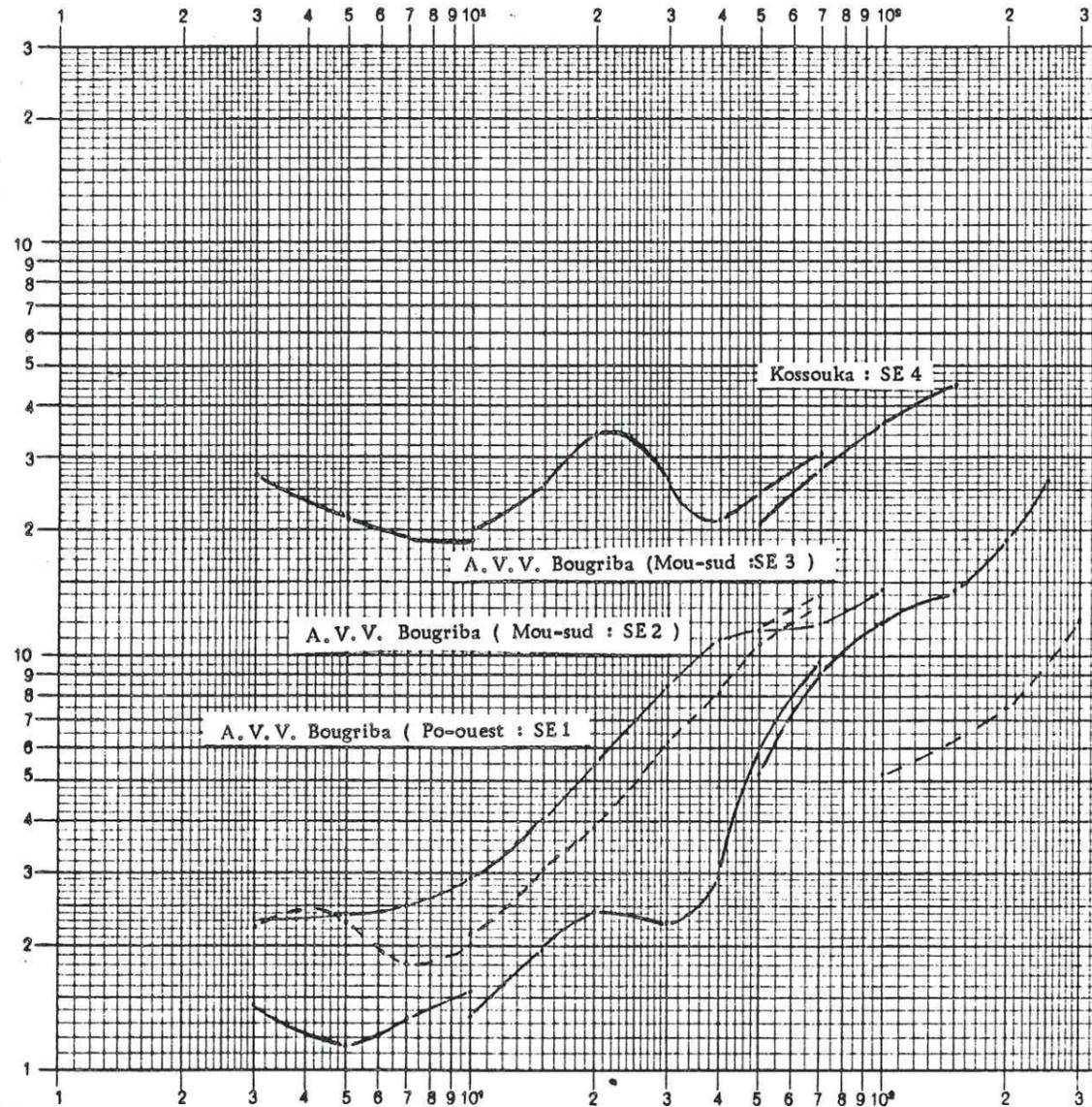


Figure 77 : Influence des fractures obliques sur les courbes de sondages électriques.

Calcul des épaisseurs des horizons du profil d'altération à partir des sondages électriques

L'un des buts assignés aux sondages électriques est de permettre une évaluation aussi précise que possible des épaisseurs et des résistivités vraies des formations surmontant le substratum sain. Le calcul des épaisseurs ne peut se faire de manière précise qu'à partir des données de sondages d'éta-lonnage. Or bien souvent, nous avons été amené à intervenir dans des zones où il n'existe pas d'ouvrages foncés jusqu'à la roche saine. Les puits tradi-tionnels captent la nappe de la cuirasse noyée ou celle des arènes fluentes. "Les puits modernes", lorsqu'ils existent, ne sont pas accompagnés de fiches incluant la coupe géologique de l'ouvrage. Comme ces derniers ne doivent leur qualificatif de puits modernes qu'au fait que leurs parois sont en béton, les formations traversées sont masquées et nous n'aurons aucune possibilité de les utiliser pour étalonner un sondage électrique. Tout au plus, aurons-nous l'épaisseur totale des altérites quand on a affaire à un puits parfait.

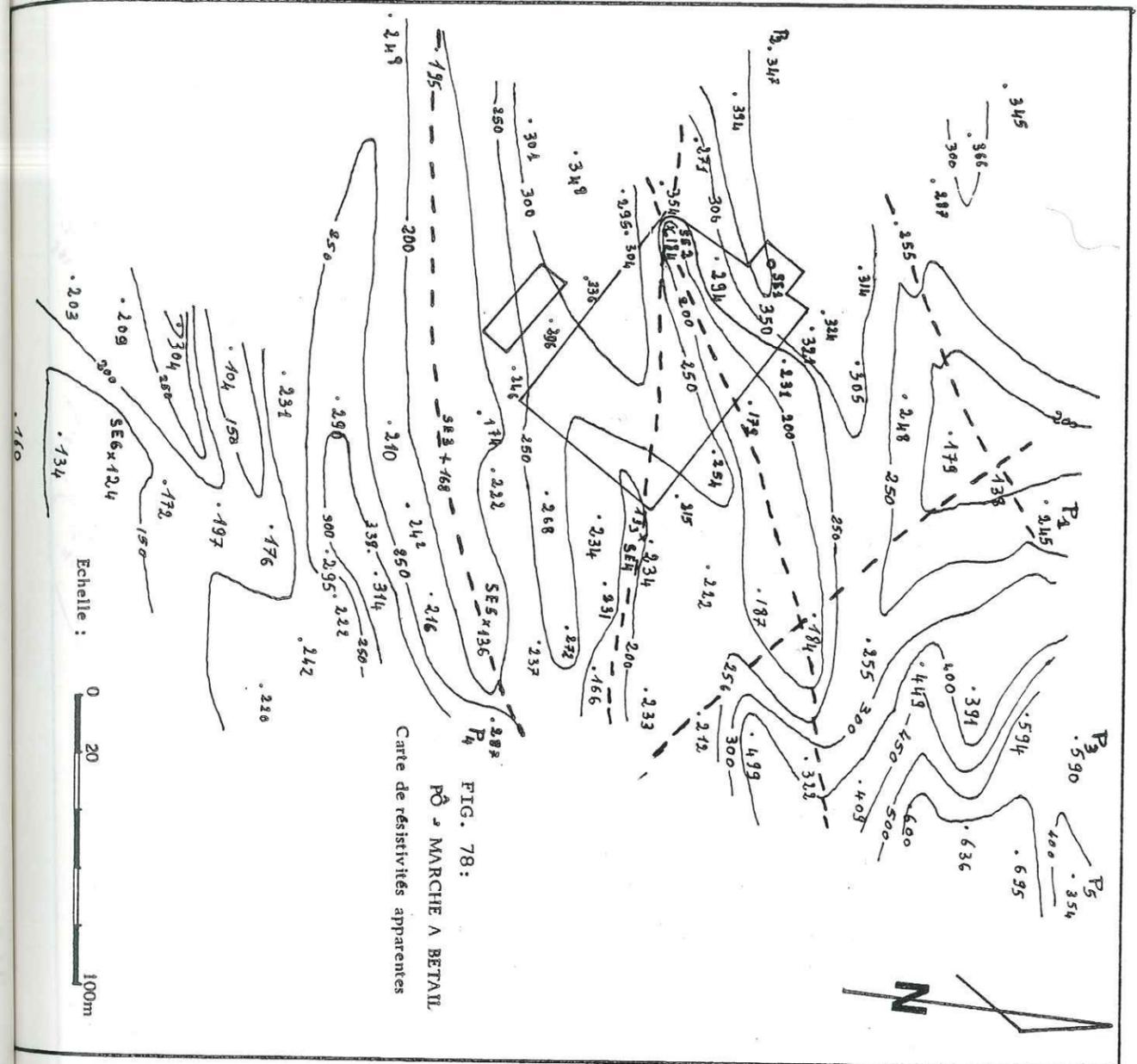


FIG. 78: P. MARCHÉ A BETAIL Carte de résistivités apparentes

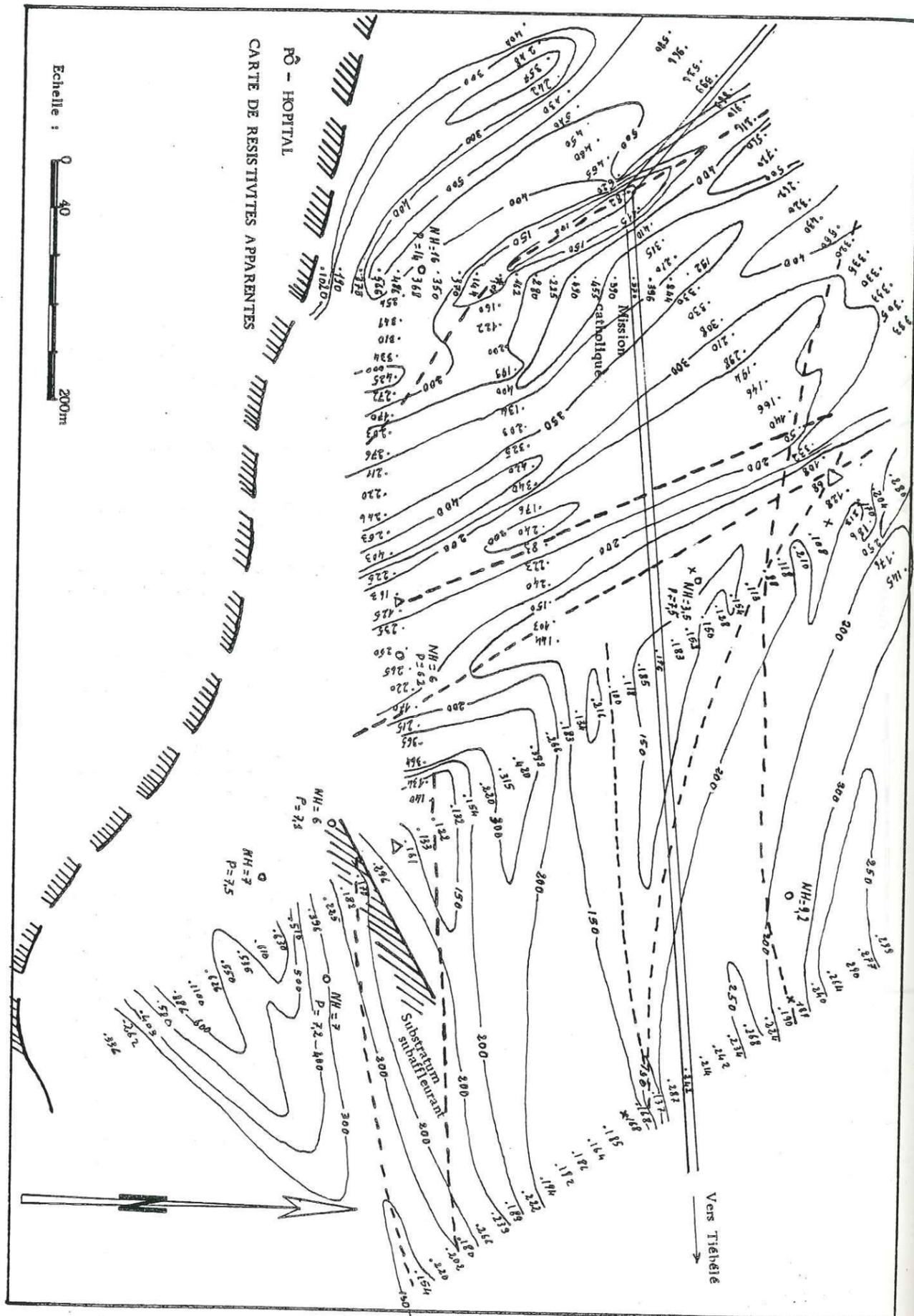


Figure 79

Nous avons réalisé le dépouillement de nos sondages électriques par recoupement de plusieurs méthodes: méthode de croix, calcul des conductances longitudinales ou des résistances transversales. On retient, bien sûr, comme bons résultats probables ceux dérivant de la concordance des méthodes utilisées. Il reste cependant que l'épaisseur de la zone fissurée qui est la tranche la plus productive du profil d'altération est souvent non déterminable, parce qu'à la profondeur où elle est enfouie et vu son épaisseur généralement faible, elle ne marque pas la courbe de sondage électrique.

Le dépouillement à l'aide d'abaques CH1 ou d'abaques à 3 terrains conduisant à des erreurs inférieures à 8% sur les épaisseurs, nous avons retenu une majoration systématique des épaisseurs totales trouvées de 10%. Solution qui nous a permis dans plus de 80% des cas d'atteindre le substratum sain.

Relation entre allure des courbes de sondages électriques et débits des ouvrages de captage

L'un des inconvénients de la prospection électrique comme de toutes les autres méthodes d'études indirectes est d'être incapable de fournir à son utilisateur un ordre de grandeur des débits d'exploitation des ouvrages qu'elle implante. C'est là une cause de déceptions pour de nombreux profanes intéressés de connaître, après les études avant-forage, la productivité hydraulique de l'ouvrage vu son implantation.

L'expérience montre que l'on peut même se tromper sur l'état d'humidité des altérites en se fondant sur leurs résistivités, surtout lorsque nous sommes sur des roches vertes dont les argiles, même humectées à moins de 80%, sont très conductrices.

On remarque généralement que pour des faciès pétrographiques différents et des courbes de sondages électriques d'allure semblable, les débits des ouvrages implantés sont très différents, variant parfois depuis le forage négatif (débit < 400 l/h) au forage de haute productivité (débit > 10 m³/h). Ce fait indique la primauté du facteur faciès pétrographique sur la productivité des ouvrages de captage.

Nous donnons ici, parmi les très nombreux cas observés, les exemples des deux forages de PÔ et du forage "Urgence Sahel, 1975" de Djibo. Les cartes de résistivités apparentes montrent que pour PÔ, les deux ouvrages ont été implantés dans des conditions presque similaires: intersections de deux directions anormales, dont celle N 100° est commune. Les courbes de sondage électrique présentent la même allure avec surtout une remontée trafnante nette liée à l'existence d'une épaisse couche de roche fracturée. On notera cependant que le fond du bateau du sondage de l'hôpital est beaucoup plus bas que celui du sondage du marché à bétail. Ce qui est l'expression du caractère plus argileux des altérites rencontrées par le forage de l'hôpital implanté sur amphibolites. Les forages de PÔ (marché à bétail) et de Djibo exploitent bon du forage de l'hôpital de PÔ, puis son colmatage ultérieur viennent appuyer ce que nous avons déjà dit au sujet des roches vertes, quant à leur état de fissuration et à la possibilité de colmatage des fissures par les altérites très argileuses qui les caractérisent et la productivité des ouvrages de captage qui exploitent leurs aquifères.

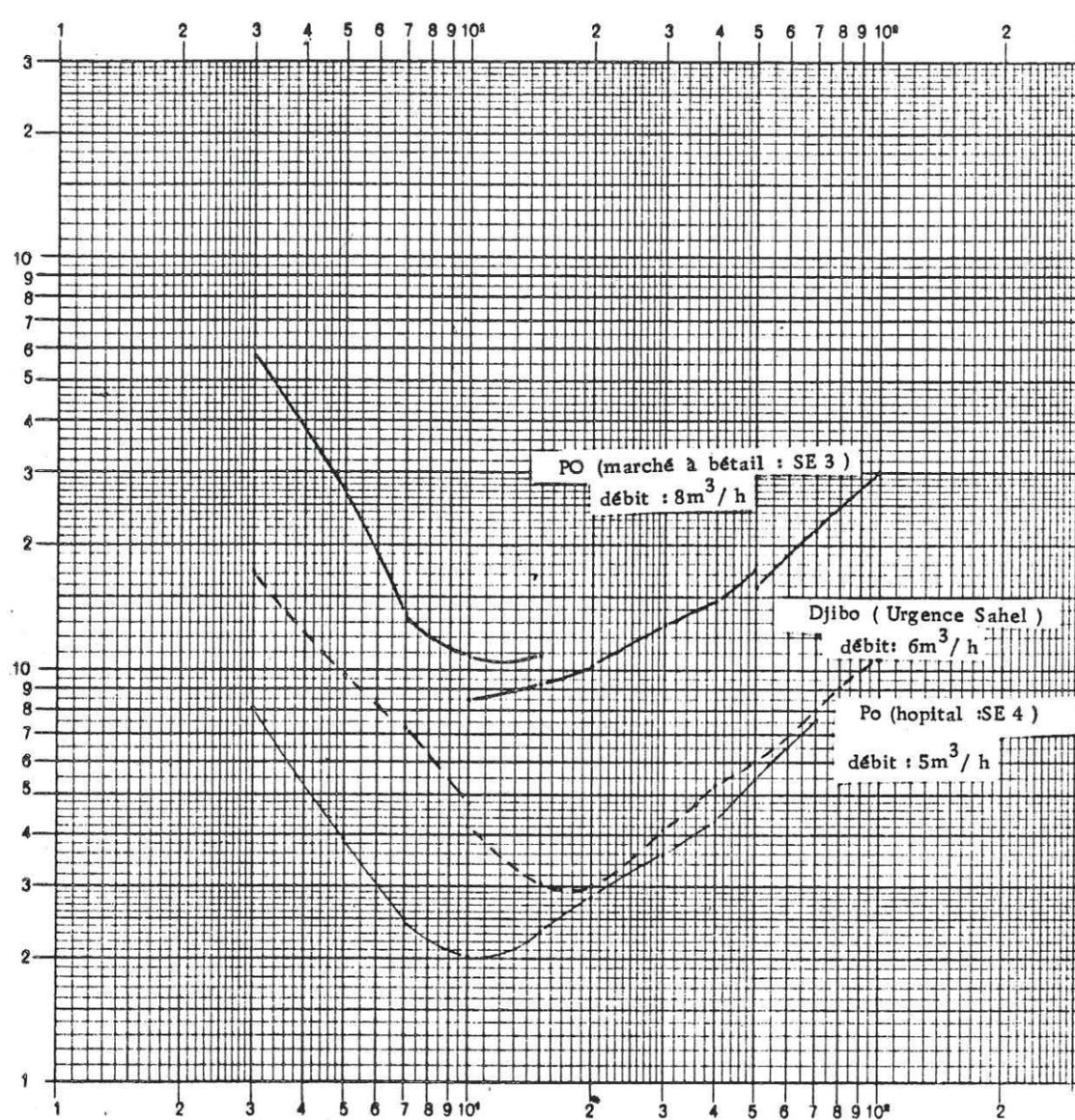


Figure 80 : Influence des fractures sur les sondages électriques

En conclusion, grâce aux sondages électriques, nous pouvons déterminer à 10% près l'épaisseur des horizons à résistivités contrastées du profil d'altération, lorsqu'à la profondeur où ils se situent ils présentent une épaisseur assez importante pour marquer la courbe de sondage électrique. Si nous avons affaire à des altérites très épaisses (supérieures à 40 mètres), la tranche fissurée du bed-rock, si elle n'a que 5 mètres d'épaisseur et fait suite à des arènes, passera inaperçue.

Le choix du sondage électrique sur lequel on doit implanter s'appuie tout autant sur l'approche hydrogéologique qui pose le problème à résoudre que sur l'interprétation des sondages électriques et des cartes de résistivités apparentes tirées des profils de traîné électrique.

LE TRAINÉ ELECTRIQUE

Bref rappel de principe: en partant d'une courbe trois terrains typiques (SE3 A.V.V. Bougriba), on voit que le fait de reporter les mesures du sondage électrique sur un repère bilogarithmique entraîne qu'une augmentation de la résistivité du premier terrain ou de celle du second conduit à une translation verticale de la courbe. Un accroissement de l'épaisseur totale des altérites surmontant le bed-rock provoquera une translation horizontale vers la droite de la courbe.

Ce dernier phénomène permet de voir qu'avec une longueur de ligne OA choisie de telle sorte qu'elle reste toujours sur la branche montante de la courbe, on pourra, en la déplaçant, suivre les variations de l'épaisseur totale des altérites et donc aussi la morphologie du toit du bed-rock. Sur la figure les valeurs du traîné reflètent bien les différences d'épaisseur au niveau des deux sondages.

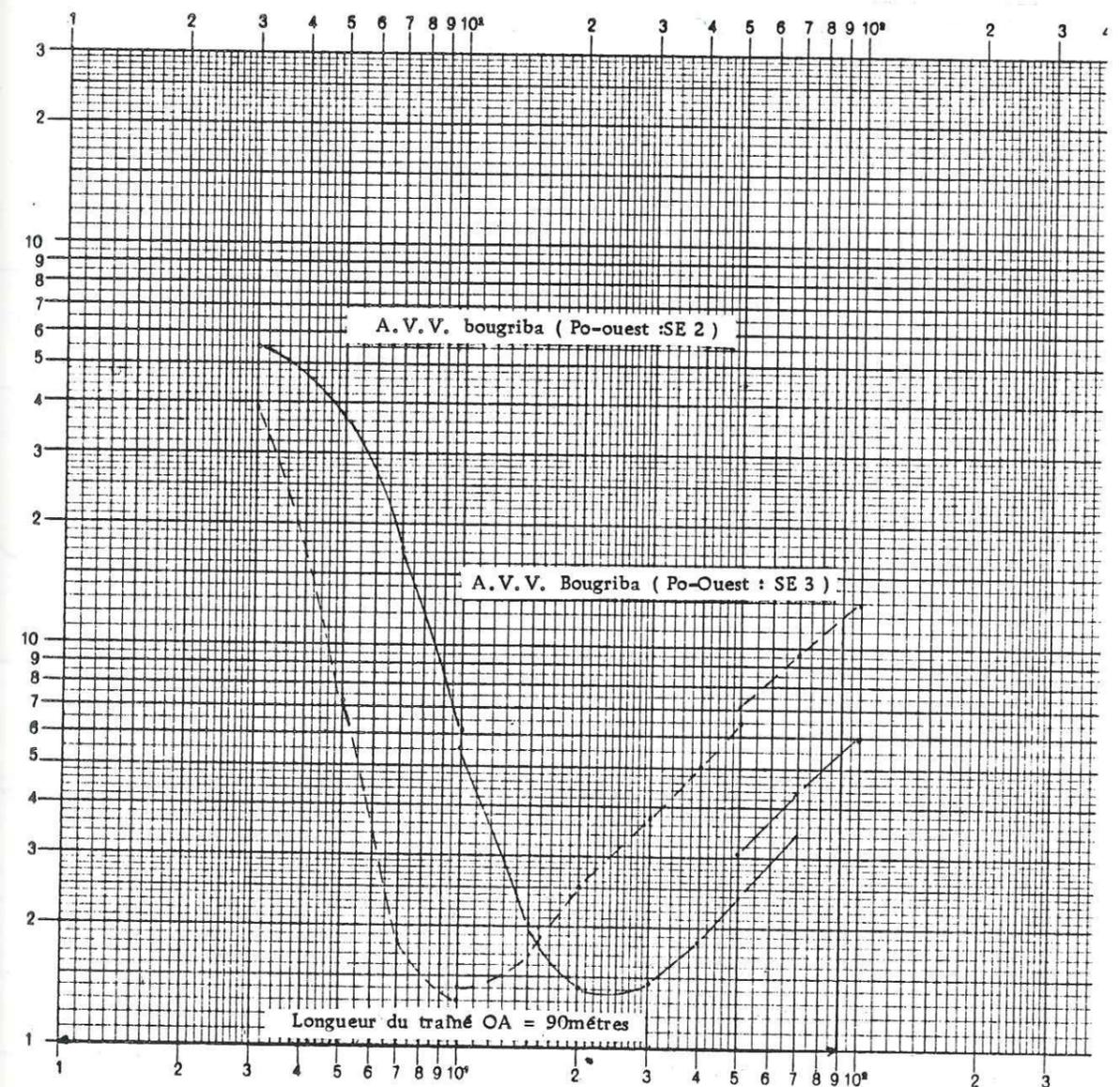


Figure 81 : Influence des fractures sur les sondages électriques

En se fondant sur le fait que les mégafractures s'accompagnent de zones broyées sur lesquelles l'épaisseur des altérites croît brutalement par rapport aux autres parties non fissurées du massif, ce traîné électrique, qui permet de mettre en évidence les variations d'épaisseur, peut servir à confirmer et à localiser avec précision les failles correspondant aux linéaments visibles sur les photos aériennes ou les images de satellites.

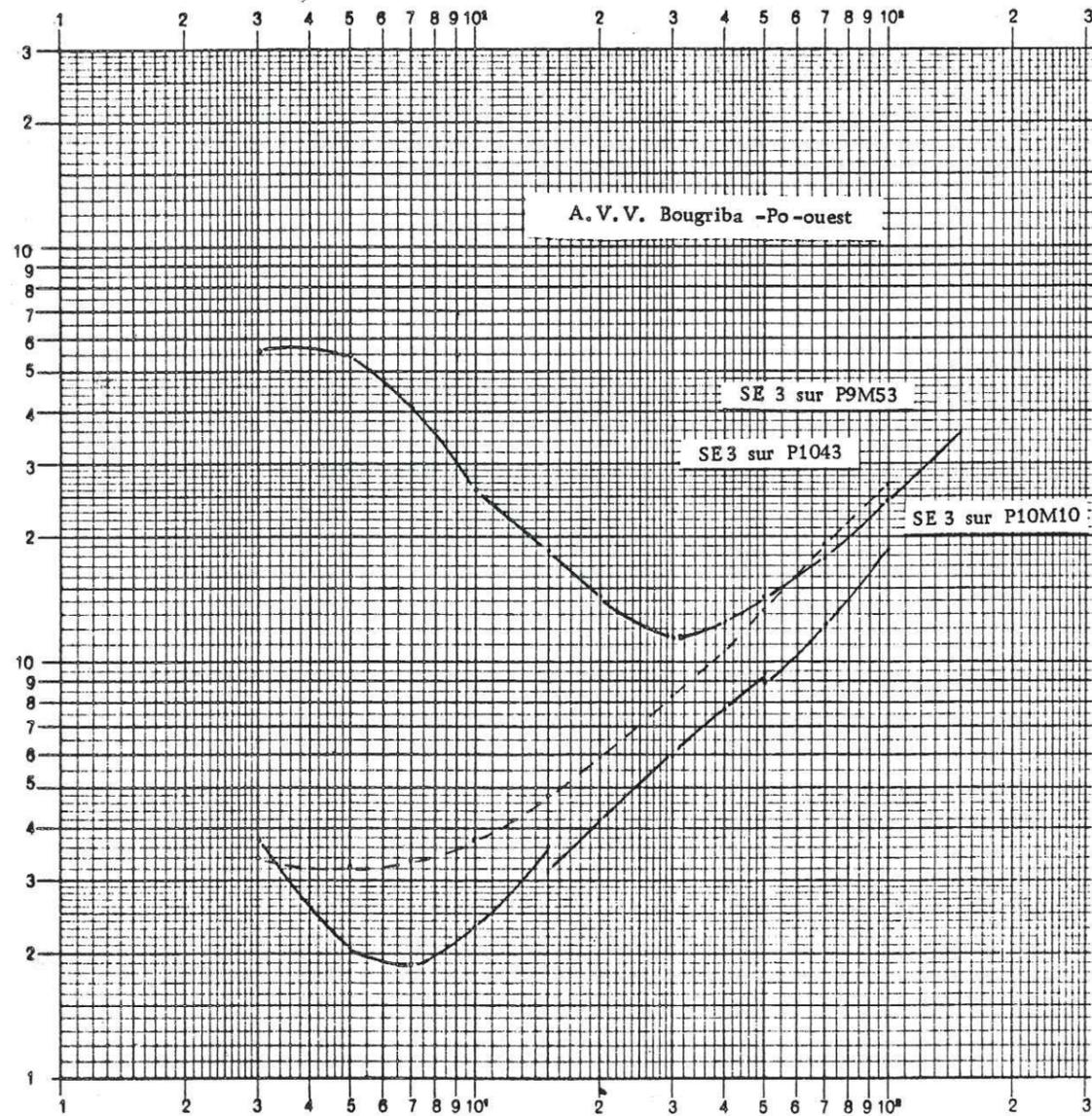


Figure 82 : Influence des fractures sur les sondages électriques

La conduite de la prospection, ainsi que le volume du travail sont fonction du problème hydrogéologique à résoudre. Pour des ouvrages de captage destinés aux villages et qu'on prévoit d'équiper d'une pompe manuelle dont les débits d'exhaure n'excèdent pas le m³/h, un seul profil de traîné électrique peut être suffisant, lorsque le bedrock est migmatitique ou de roches vertes, pour mettre en évidence une fracture déjà repérée par photo-interprétation. Lorsque le site n'a fait l'objet d'aucune étude préalable par photo-interprétation, nous avons adopté la réalisation systématique de deux profils orthogonaux, alors susceptibles de recouper toute fracture existante quelle que soit sa direction. Un sondage électrique est toujours nécessaire pour préciser la nature de l'anomalie conductrice repérée par le traîné.

En effet, même si la valeur de résistivité apparente obtenue par le traîné représente un point d'une courbe de sondage électrique qu'on aurait réalisé à son point de mesure, la résistivité mesurée ne représente qu'un point et ne donne nullement une idée de la forme de la courbe qui précède, ou succède, au point. C'est précisément la variation de la valeur de la résistivité apparente du traîné avec l'épaisseur des altérites, mais aussi avec la forme de la courbe qui introduit une difficulté notable dans l'interprétation des données du traîné. En effet, si théoriquement la résistivité apparente baisse avec l'augmentation de l'épaisseur des altérites, on constate que le même effet est obtenu lorsque le substratum subaffleurant est recouvert d'un placage argileux très conducteur. Ces cas sont fréquents sur substratum de roches vertes.

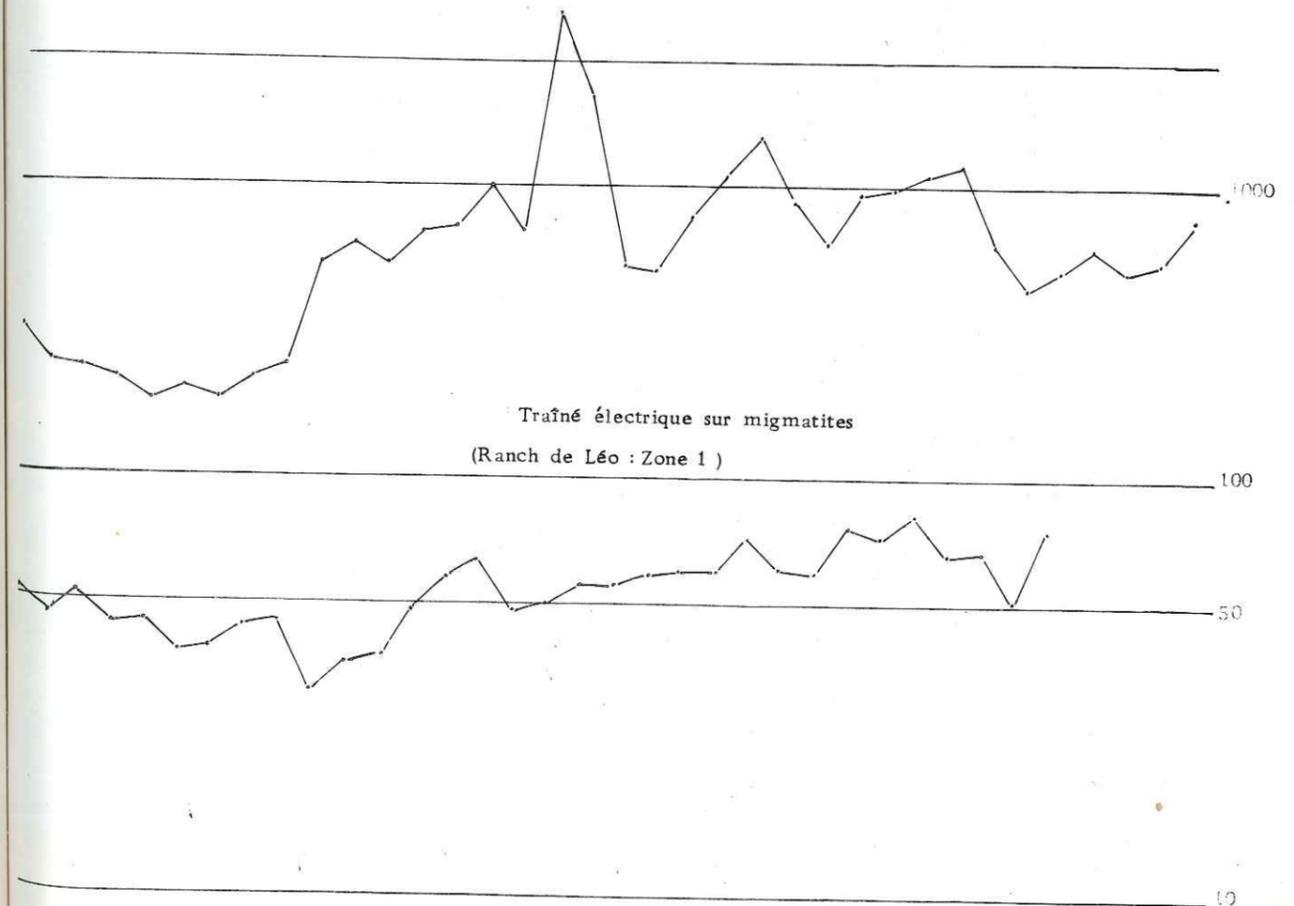


Figure 83a: Trainés électriques sur migmatites et roches vertes.

(A.V.V. Bougriba-Secteur Mou sud)

On est alors en présence d'une courbe trois terrains, très basse, qui de ce fait donne de faibles valeurs au traîné, alors que l'épaisseur du recouvrement est faible. Il existe même des cas où la courbe devient celle d'un bicouche. Les exemples que nous avons tirés de notre étude des périmètres A.V.V. de la Bougouriba nous semblent bien illustrer les phénomènes décrits: le sondage SE1 (P 10, M 10) est un trois terrains, dont les épaisseurs cumulées des deux premiers excèdent à peine celle de la première couche du sondage SE3 (P 9, M 53-54). Le bicouche SE3 (P 10, M 43) présente pratiquement la même valeur au traîné que le SE3 (P 9, M 55-54). Cependant, ici on réalise que du point de vue puissance des altérites on a:

$$SE3 (P10 M43) < SE1 < S33 (P3, M 53-54).$$

Des sondages électriques doivent donc nécessairement compléter et expliciter les données du traîné. Traîné et sondages électriques sont donc indissociables dans une bonne prospection électrique (méthode des résistivités).

Les données des sondages électriques et mécaniques permettent de voir qu'en dehors des difficultés d'interprétation liées aux phénomènes que nous venons de décrire, l'allure des courbes du traîné électrique concorde bien avec celle du bed-rock. De leur analyse, on arrive à dégager des caractéristiques constantes liées aux différents faciès pétrographiques.

Les résistivités apparentes sont plus basses pour les profils réalisés sur les formations volcano-sédimentaires, les schistes et les roches basiques que sur les granites et les migmatites. Ce qui n'est que la traduction de la teneur en argile des altérites auxquelles donnent naissance les premières roches citées (profil A.V.V., Bougouriba, figure 82).

Les profils présentent des valeurs moins contrastées sur les roches vertes et les migmatites que sur les granites intrusifs ou les granites migmatitiques homogénéisés. L'intense microfissuration que l'on retrouve associée aux migmatites et aux roches vertes favorise à leur niveau une plus grande extension de la zone d'influence latérale des mégafractures (figure 83, zone 1, ranch de Léo, Poké-Mengao, Daramandougou, Kossouka).

La différenciation des faciès peut être possible par traîné électrique lorsqu'il s'agit d'un passage entre roches vertes ou schistes à des granites ou à des migmatites (Kossouka P3). L'exemple d'Arbinda illustre également très bien le contraste au traîné entre granite et schistes.

Les cartes de résistivités apparentes

Comme nous l'avons dit pour de nombreux sites villageois en zone de migmatites ou de roches vertes, la localisation d'une fracture déjà repérée sur les photos aériennes par un seul et unique profil de traîné électrique peut être suffisant pour implanter un ouvrage de captage. Mais lorsque les débits demandés sont importants ou lorsque le site est sur une zone de faciès défavorable (granite intrusif ou granite migmatitique homogénéisé), la réalisation de nombreux profils à l'aide desquels on trace la carte des résistivités apparentes est indispensable. L'interprétation de la carte permet de tracer des axes conducteurs qui sont assimilables aux mégafractures. Les études que nous avons menées pour le ranch de Léo ont contribué en 1975 à prouver la grande densité des fractures du bed-rock cristallin, mais aussi l'aptitude de la prospection électrique à les mettre en évidence (fig. carte de résistivité de la zone 1 et son interprétation hydrogéologique).

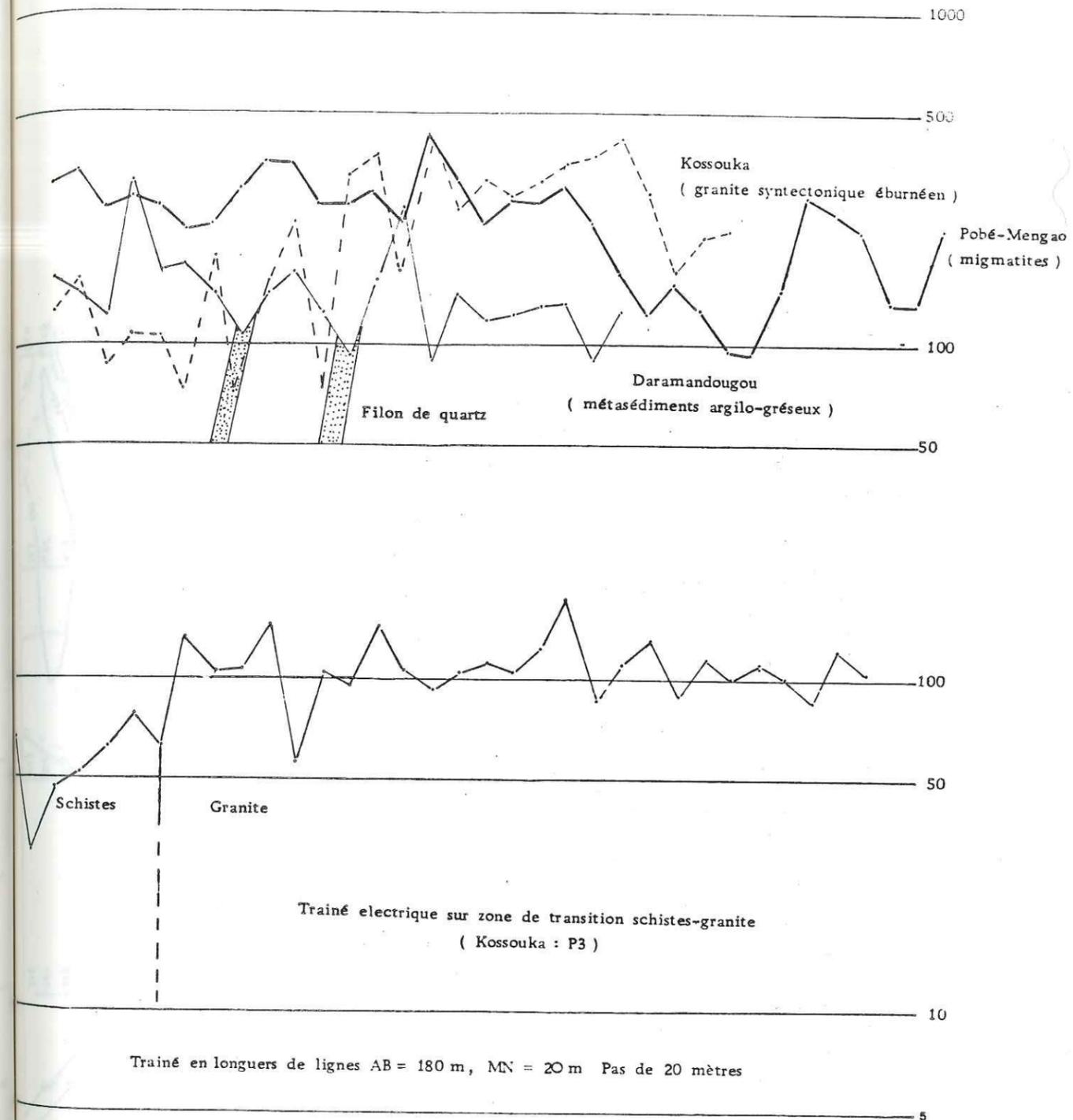


FIG. 83 b : PROFILS DE TRAINES ELECTRIQUES SUR DIFFERENTS FACIES PETROGRAPHIQUES

Figure 84a : Ranch de Léo - zone 1, carte de résistivités apparentes

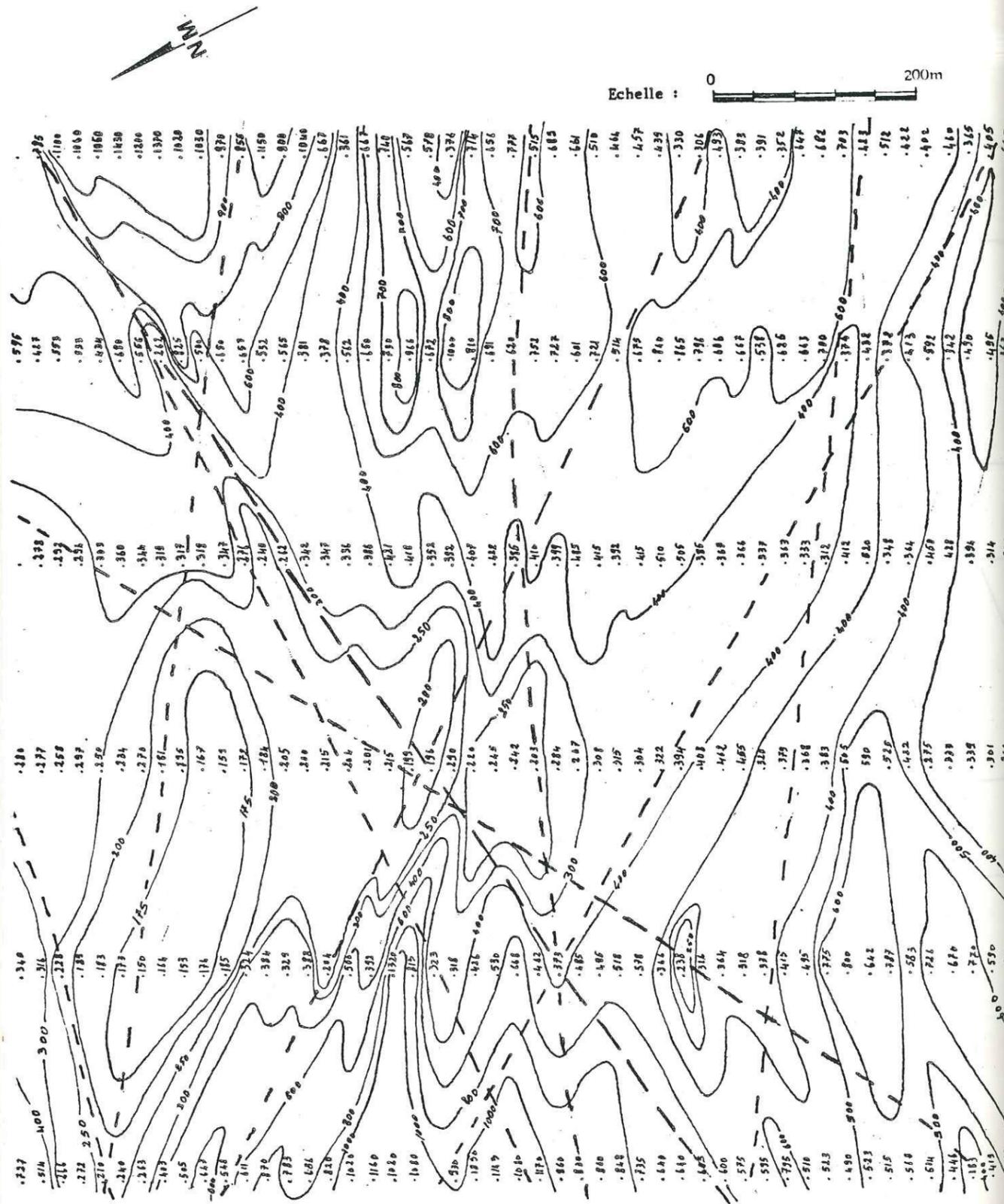
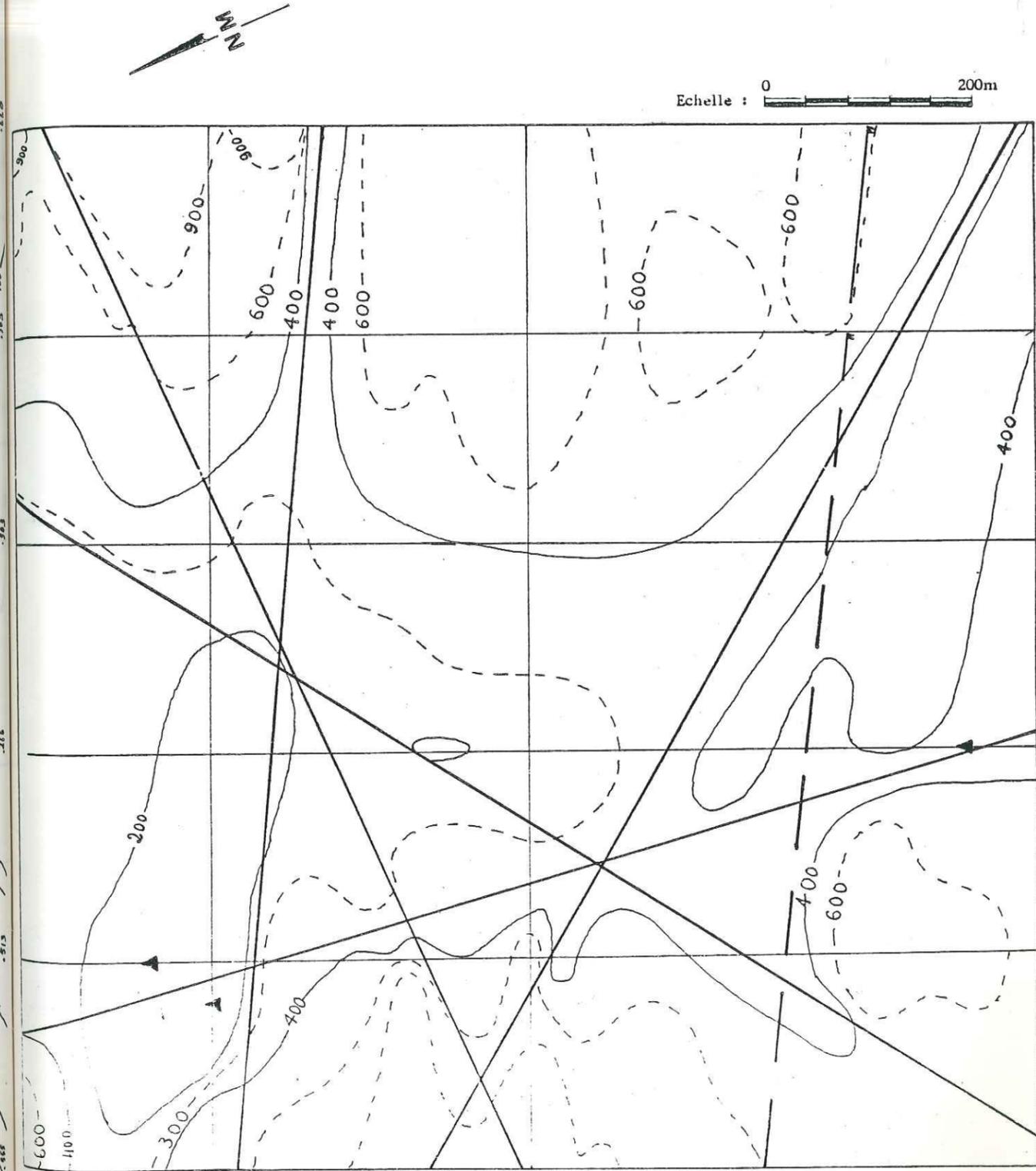
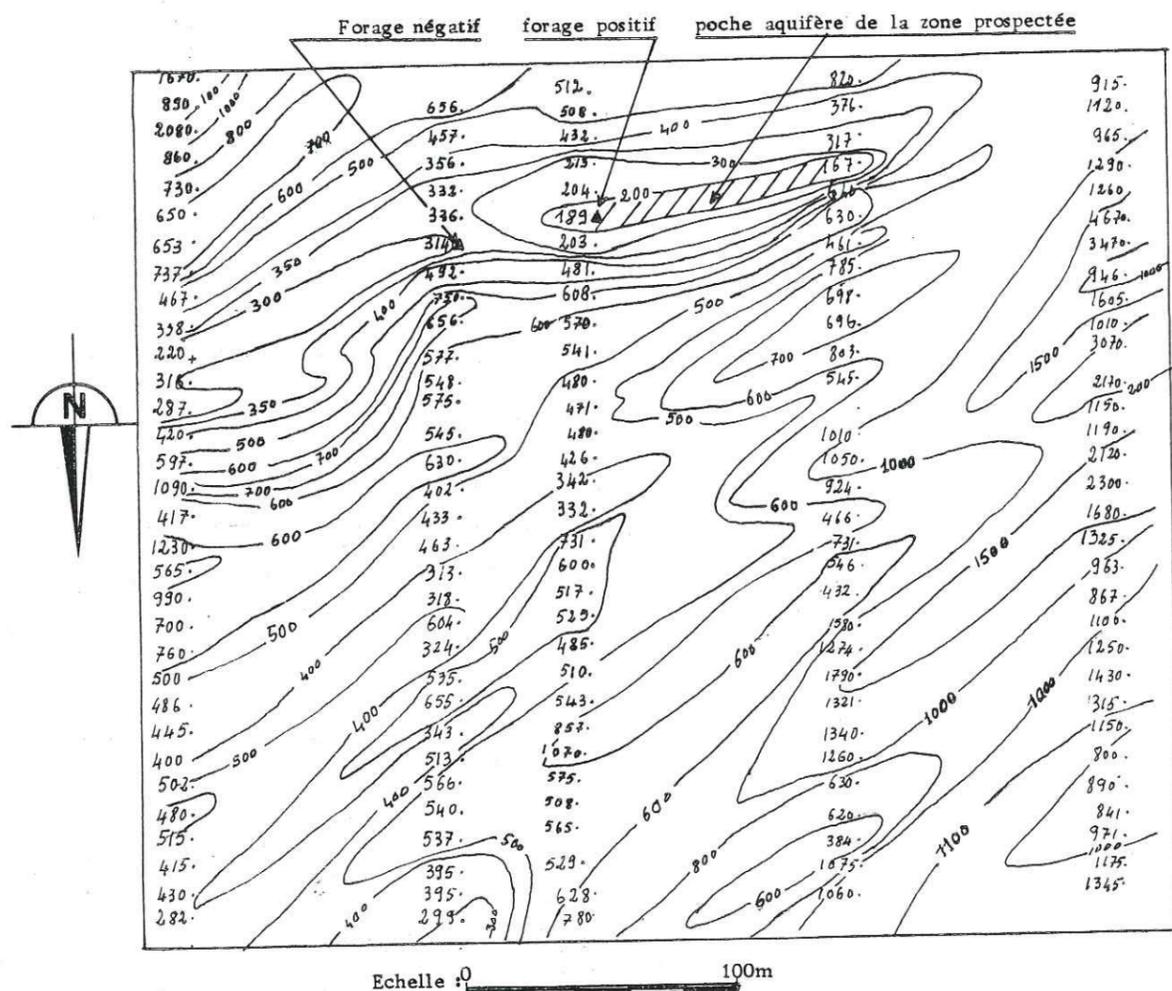


Figure 85 : Ranch de Léo - zone 1, linéaments de photos aériennes et carte de résistivités apparente.



DAKAYE

CARTE DE RESISTIVITES APPARENTES



Echelle 0 100m

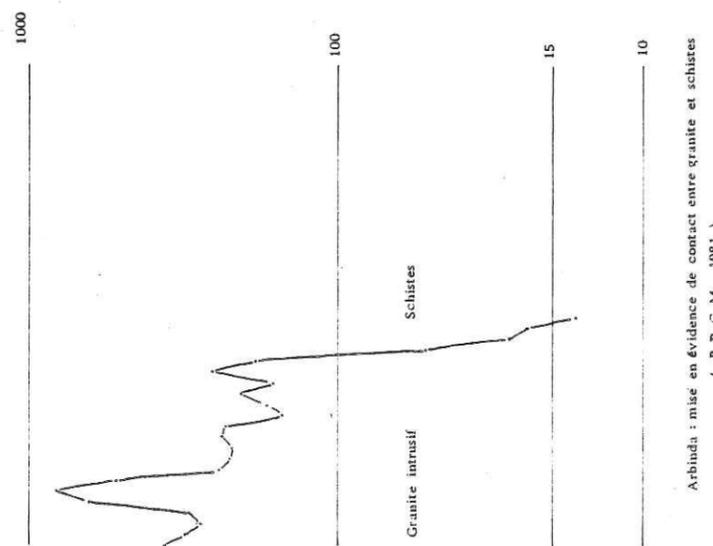


Figure 86

Les cartes de résistivités que nous avons obtenues sur toute l'étendue des formations cristallines de Haute-Volta montrent que très généralement les nappes liées aux fractures sont non seulement de faible extension latérale, mais aussi qu'il s'agit souvent de poches d'eau discontinues séparées les unes des autres par des seuils.

L'exemple de la zone 5 du ranch que nous avons eu à évoquer en traitant du mode d'alimentation, de la chimie des eaux et leur teneur en tritium illustre bien cette configuration des nappes d'eau du cristallin de Haute-Volta. L'exemple de Dakaye (carte de résistivités apparentes, figure 86) où, après huit sondages secs à la calweld comme au marteau fond de trou, la prospection géophysique a permis de réaliser la seule implantation positive démontre la géométrie capricieuse des nappes de roches faillées.

Amélioration à apporter aux implantations d'après l'interprétation des cartes de résistivités

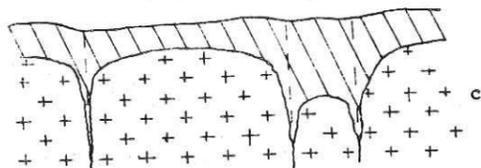
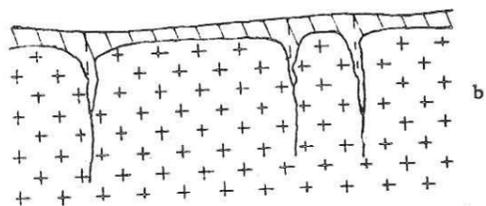
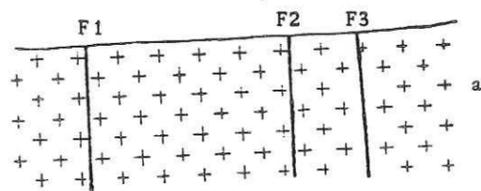
Nous avons précisé en 1975 les conditions les plus favorables pour l'implantation des ouvrages de captage dans le socle cristallin (fig. 87). Le but de la prospection géophysique est donc de nous permettre de nous placer dans ces conditions définies. Dans les pratiques méthodologiques, nous avons hérité de la C.G.G. la conduite suivante:

trainé en longueur de ligne AB = 180 m; MN = 20 m; pas de mesure 20 m; réalisation presque systématique de sondages électriques sur les valeurs les plus basses et quelques rares fois sur les plus hautes. Si le choix de l'implantation se fait sur analyse de la carte de résistivités apparentes, il ne correspond que très rarement à une intersection d'axes d'anomalies situées hors des profils.

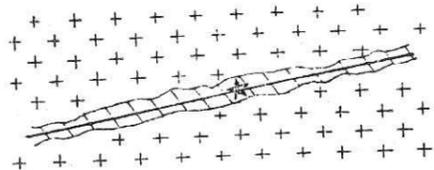
L'exemple des implantations de la zone 1 du ranch de Léo montre que l'implantation choisie ne répond pas aux conditions d'optimisation de la productivité des ouvrages de captage. En effet, alors que l'étude avait pour but de localiser les intersections de failles, l'implantation choisie se limite au point bas du profil délaissant les points de croisement des axes d'anomalies. Les bons résultats obtenus sur des intersections d'axes, tels que ceux de Pô Hôpital (6m³/h), Pô marché à bétail (15 m³/h), Buvogmi, Ouaga (6m³/h) montrent l'intérêt qu'il y a à implanter sur des croisements d'axes. Ce choix peut nous amener à délaissier quelquefois des points bas rencontrés sur la carte comme ce fut le cas pour le périmètre du Buvogmi.

Comme celle des failles, la localisation des points d'intersection des axes conducteurs de la carte de résistivités apparentes va être difficile. En effet, lorsque des profils de trainé recoupent des zones broyées, c'est l'intersection de la faille avec le profil qui est connue avec précision. La direction de l'axe conducteur recoupé ne l'est que rarement, avec certitude car on la déduit souvent de façon interprétative de la carte de résistivités apparentes.

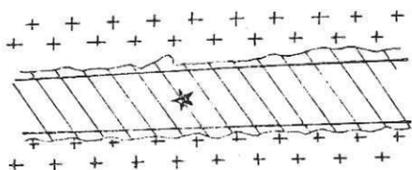
Or l'intérêt que présente l'intersection des axes d'anomalies mérite que celle-ci soit connue avec précision. Le problème ne peut être résolu qu'en réduisant de 20 à 5, voire à 2 mètres le pas de trainé électrique, afin de préciser le point d'intersection de la faille avec le profil et en réalisant à partir de ce dernier point des sondages pluridirectionnels qui donneront la direction de la mégafracture recoupée.



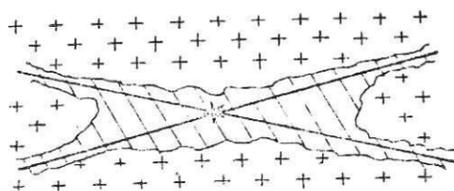
Evolution de l'altération sur les fractures



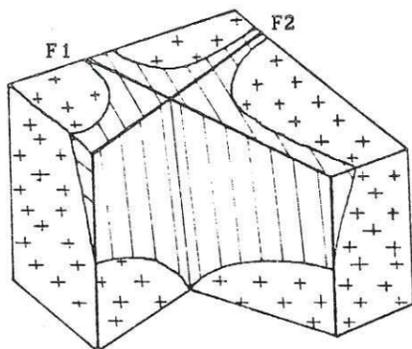
Altération sur une fracture



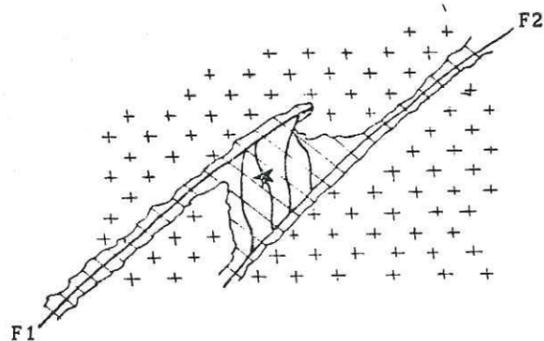
Couloir d'altération entre deux fractures



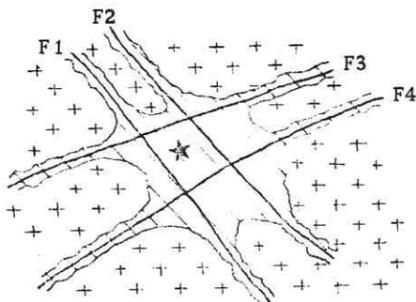
Altération sur croisée de deux fractures



Altération à l'intersection de deux failles



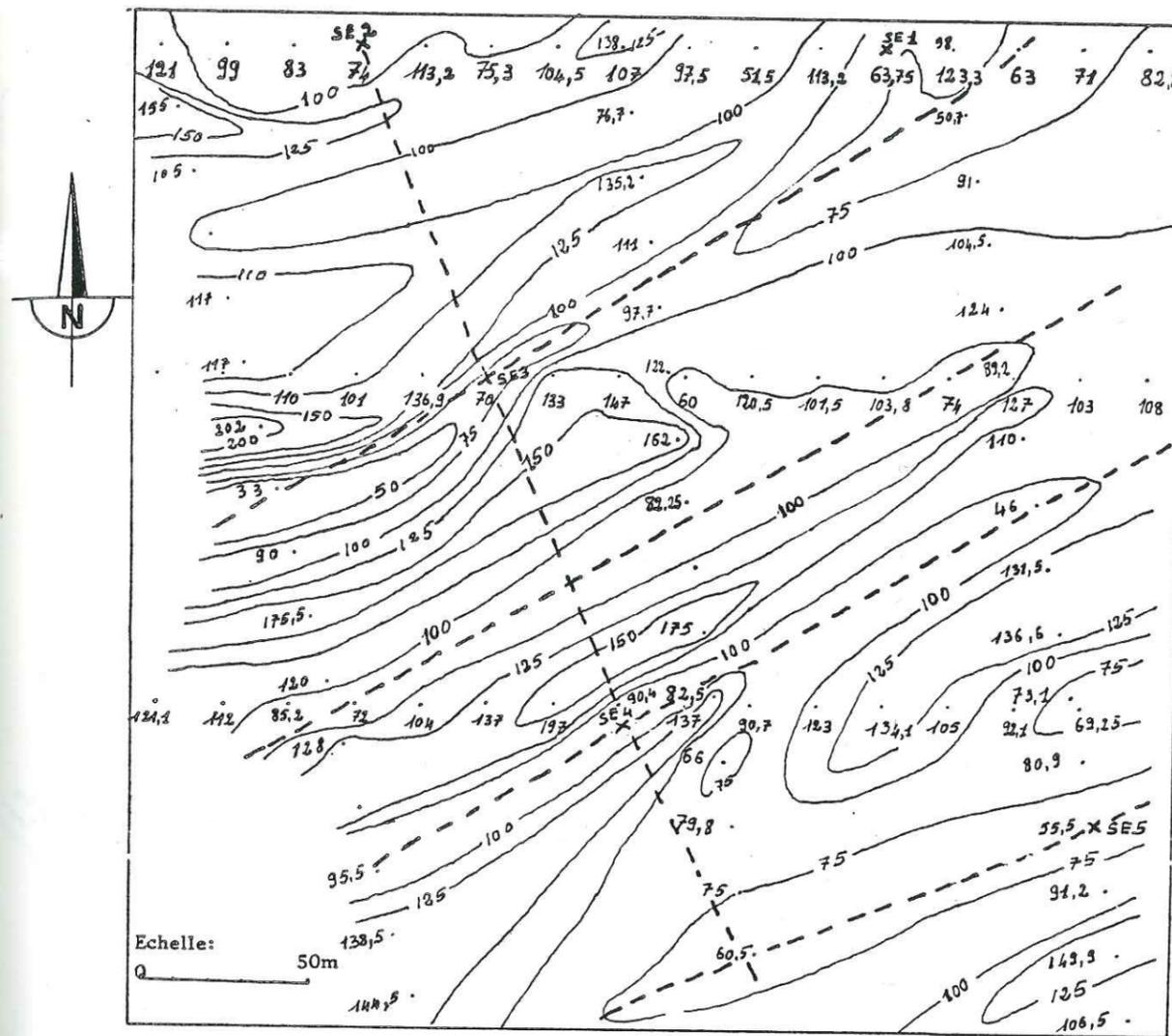
Altération en zone de recouvrement de fractures en relais



Altération au niveau d'une maille de fractures

EVOLUTION DE L'ALTERATION ET POINTS D'IMPLANTATION FAVORABLES DES FORAGES D'EAU

Figure 87



OUAGADOUGOU (périmètre Bu. Vo. G. Mi.)

CARTE DE RESISTIVITES APPARENTES

Figure 88

3.2.3.3.3. LES SONDAGES PLURIDIRECTIONNELS

Les mégafractures, par les zones broyées qui les accompagnent, introduisent au niveau du massif qu'elles traversent une anisotropie hydraulique qui se retrouve au niveau du champ de propagation électrique. En plus donc de l'anisotropie verticale liée au changement des horizons du profil d'altération de la surface jusqu'au rocher sain, il va exister une anisotropie horizontale que les sondages électriques pluridirectionnels peuvent mettre en évidence.

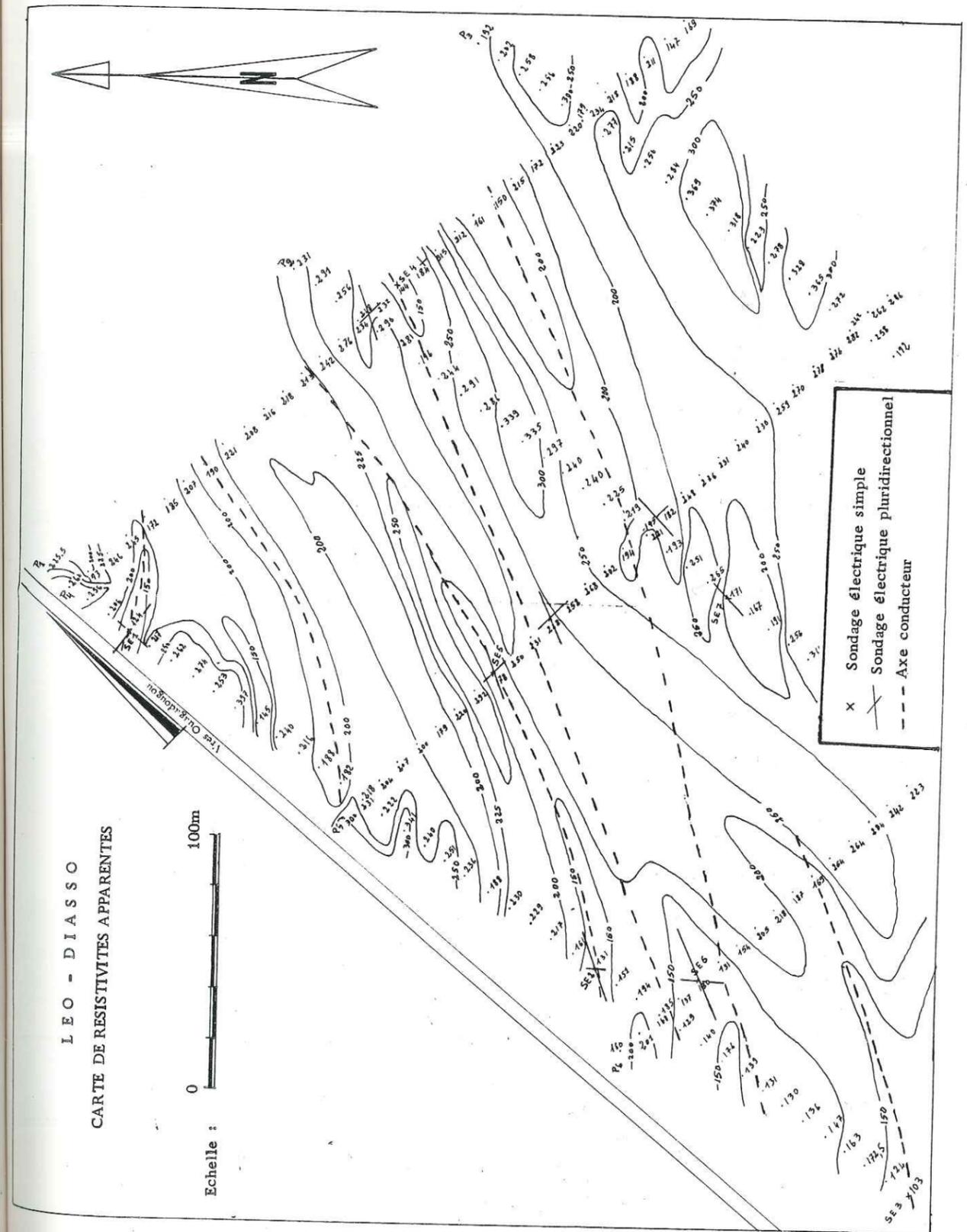
Nous avons choisi l'étude réalisée à Léo (Diasso) pour discuter des données de cette variante de la méthode des résistivités.

Le sondage pluridirectionnel est effectué en un point donné en changeant, après la réalisation complète du sondage suivant une orientation de AB définie cette dernière orientation. Les résultats des mesures sont traduits en courbes de sondages électriques ou en diagrammes circulaires de répartition de la résistivité apparente en fonction de la longueur de ligne AB centrée en O. Ce dernier type de représentation où les axes sont gradués en longueur de ligne OA, mais avec report de la résistivité apparente obtenue à chaque point OA, permet une visualisation conique de la répartition des résistivités avec la profondeur.

Les diagrammes circulaires permettent de voir que les directions de conductibilité maximale peuvent varier entre les horizons superficiels (cuirasse, argile à canaux et argile latéritique) et les horizons profonds (SE2 sur P1 M27, SE1 sur P1 M5). Si nous nous intéressons à la roche fissurée, on ne tient compte que des deuxièmes directions. Le prolongement de ces directions permet d'obtenir sur la carte les intersections des directions anormales. On s'aperçoit que pour avoir la direction de l'allongement au niveau de la zone fissurée, rien qu'une seule mesure par direction dans la partie remontante de la courbe suffit amplement. Ce qui permet de réduire le temps de réalisation autrement trop long du sondage multidirectionnel.

Les courbes de sondages pluridirectionnels indiquent que la direction selon laquelle il faut tendre la ligne AB du sondage pour obtenir, à l'aide des abaques existants, des épaisseurs proches de la réalité est la direction de conductibilité maximale selon le traîné, autrement dit la direction même de la mégafracture. Les sondages SE7, SE2, SE4, mais notamment celui SE1 montrent comment en changeant la direction d'exécution du sondage, l'épaisseur totale des altérites semble croître pour atteindre un maximum lorsque la ligne AB devient parallèle à la fracture. Les ruptures à l'embranchement au passage de la fracture s'atténuent jusqu'à s'annuler quand AB est parallèle à la faille. Le fait qu'au SE5 cette rupture reste toujours importante indique que de toutes les directions choisies pour réaliser le sondage pluridirectionnel, aucune n'est tombée dans l'axe de la fracture. Ce fait vient aussi confirmer l'étroitesse des couloirs d'altération accompagnant les failles. Les sondages pluridirectionnels complètent donc bien les données de la carte de résistivités apparentes et facilitent l'interprétation de celle-ci en vue d'une meilleure implantation des ouvrages de captage des eaux souterraines.

Figure 89 : Léo - Diasso, carte de résistivités apparentes



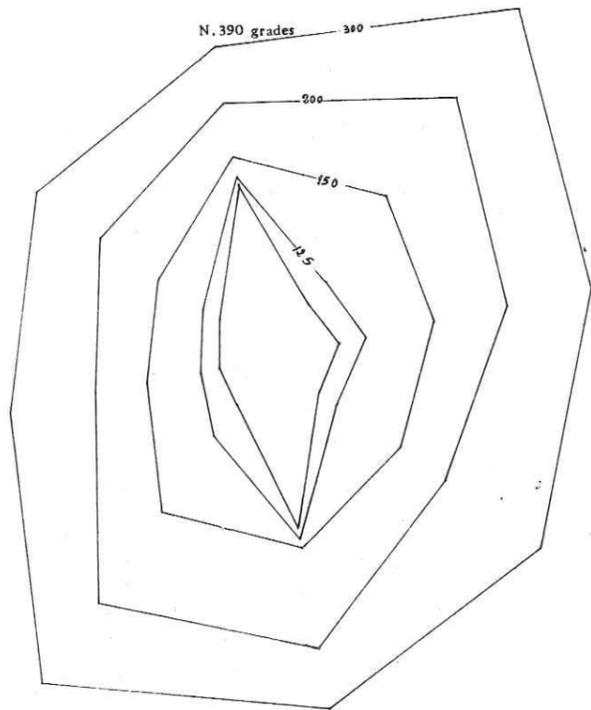


Figure 90a : Sondages électriques pluridirectionnels.

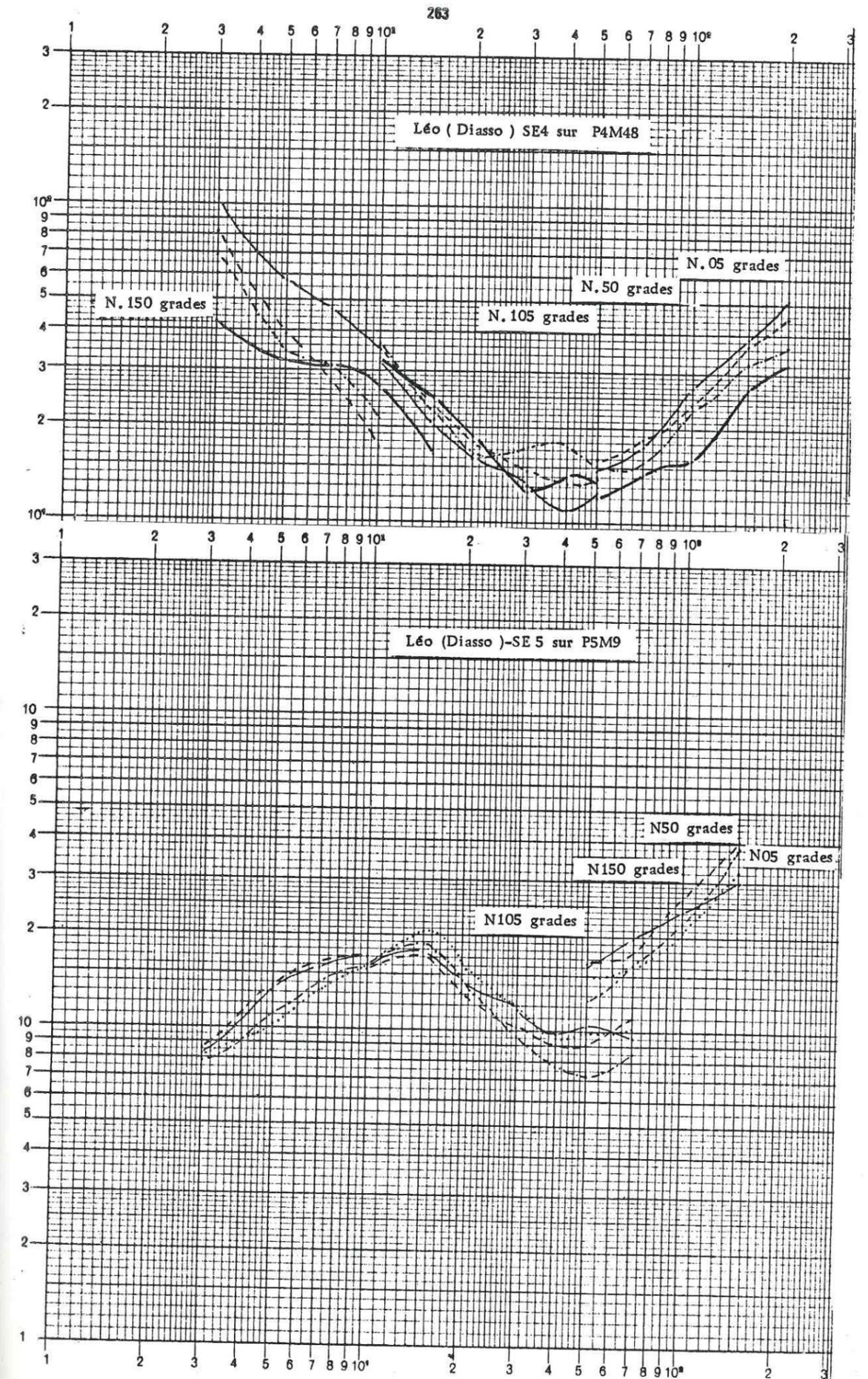
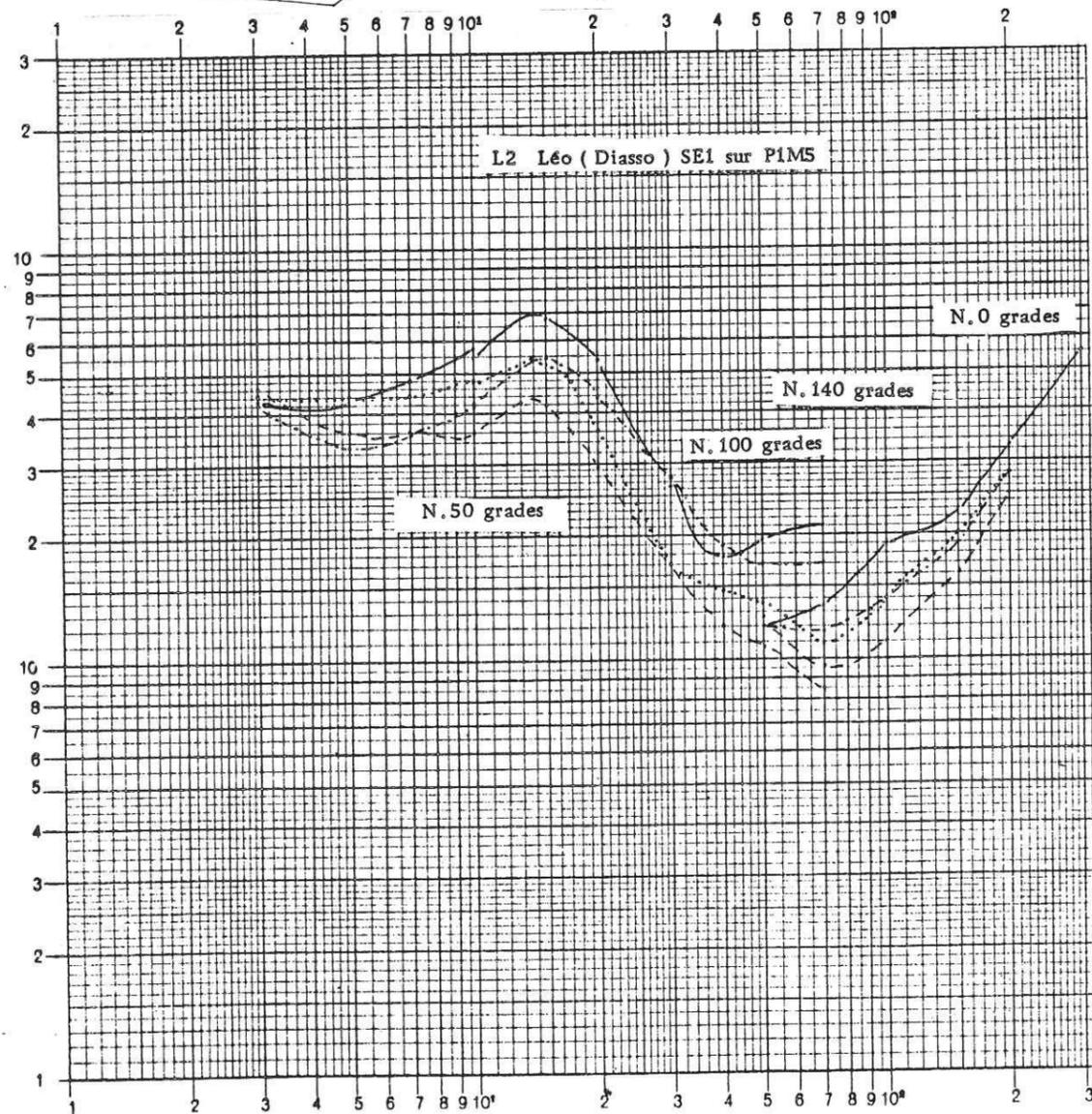


Figure 90b : Influence des fractures sur les sondages électriques.

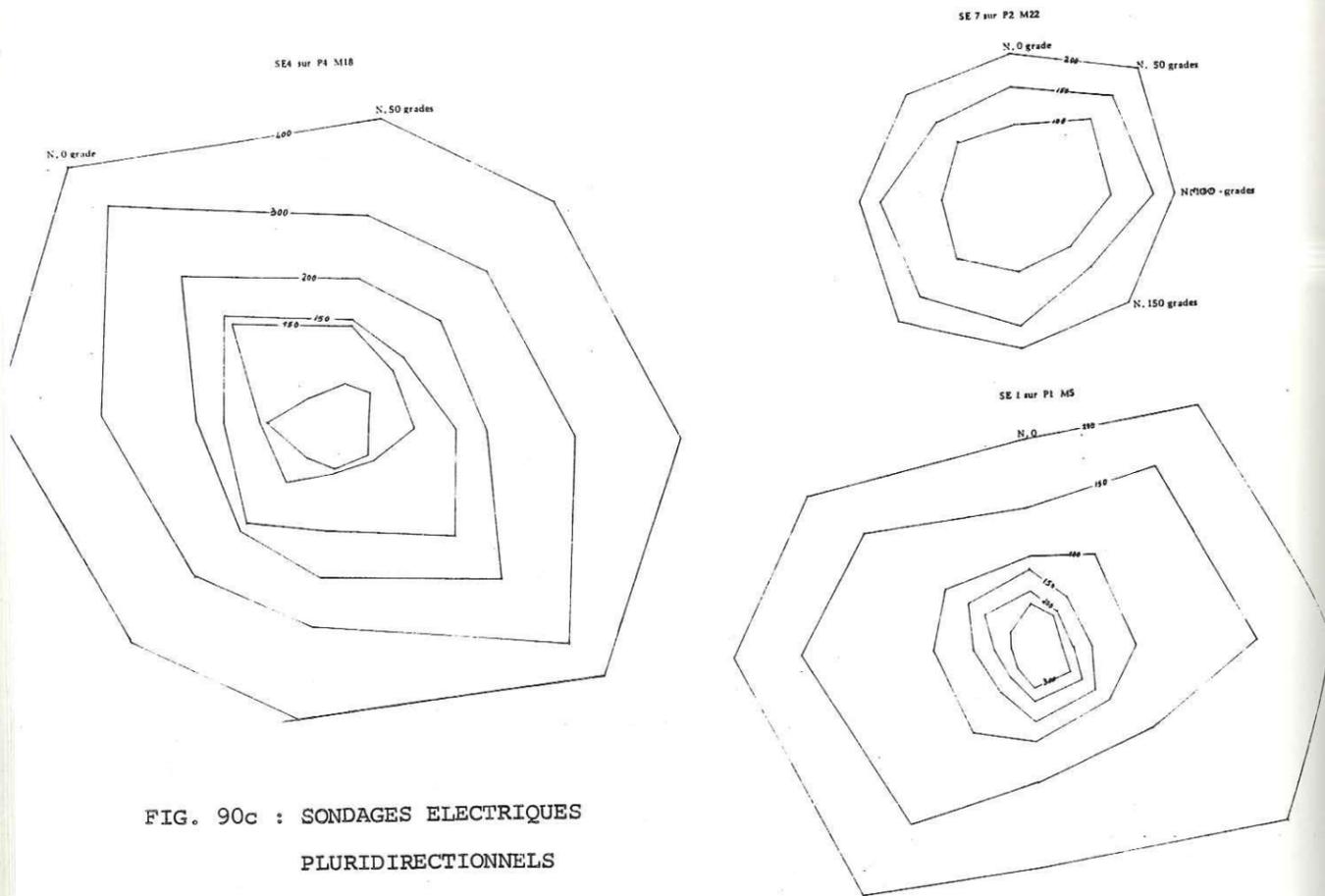
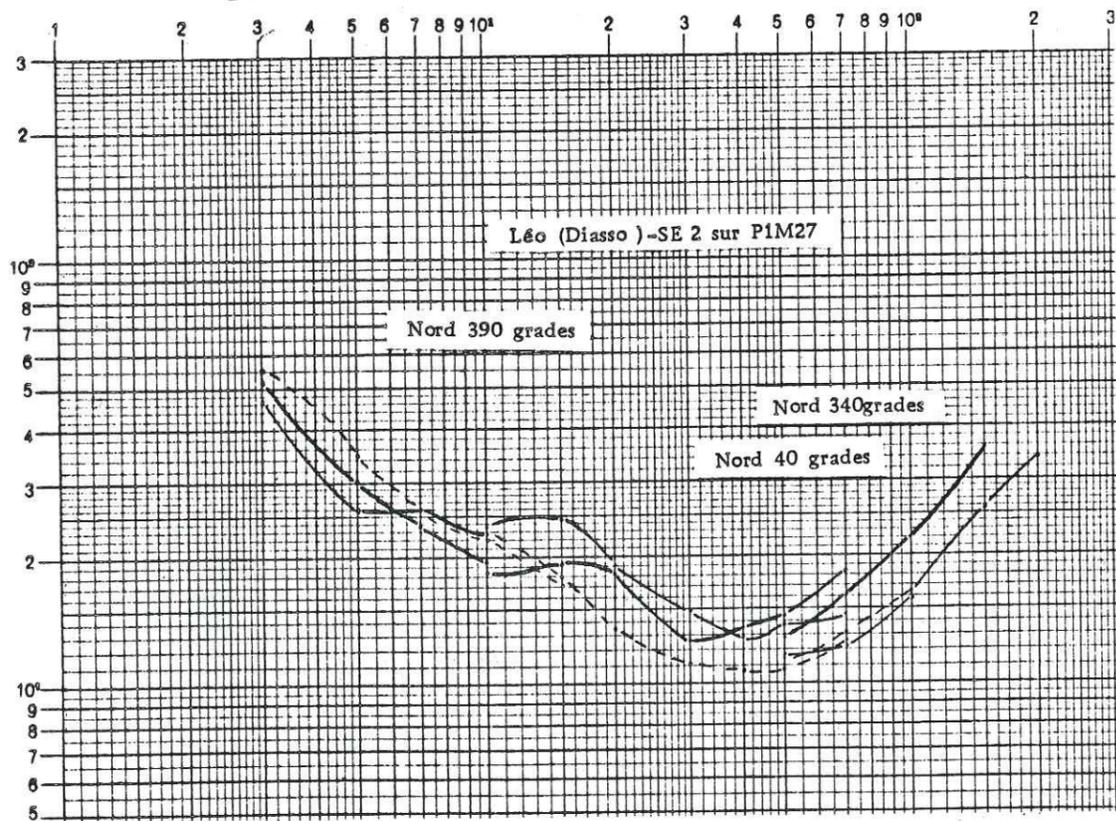
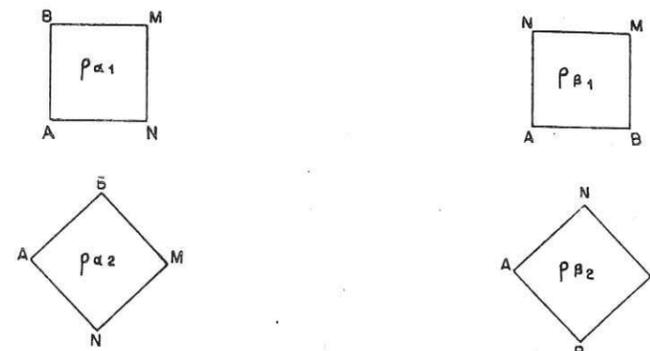


FIG. 90c : SONDAGES ELECTRIQUES PLURIDIRECTIONNELS

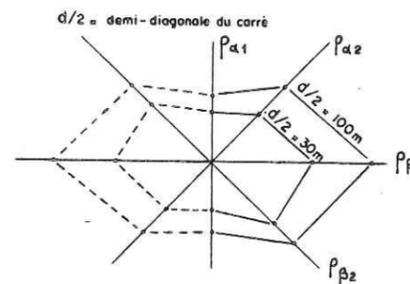


3.2.3.3.4. Les méthodes du rectangle et du dispositif carré

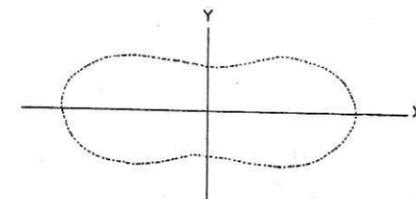
Elles ont été l'une et l'autre employées à titre expérimental par J.C. LACHAUD (1979) à la demande du C.I.E.H. et pour être comparées l'une au traîné électrique et l'autre en substitution aux sondages pluridirectionnels.



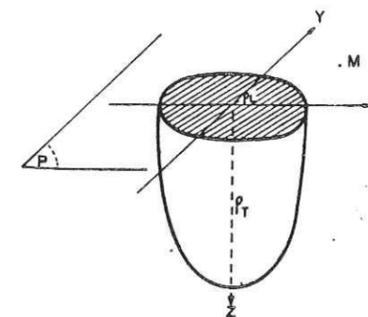
Mise en œuvre du dispositif carré



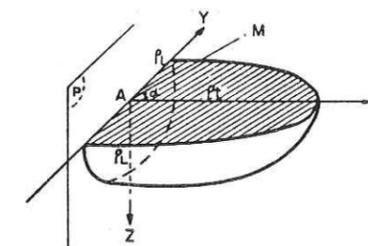
Exemple de Diagramme obtenu sur le terrain



Exemple de diagramme théorique



Cas où l'axe portant la résistivité transversale est vertical (P = Plan de schistosité, de fissuration.....)



Cas où l'axe portant la résistivité transversale est horizontal (P = Plan de schistosité, de fissuration.....)

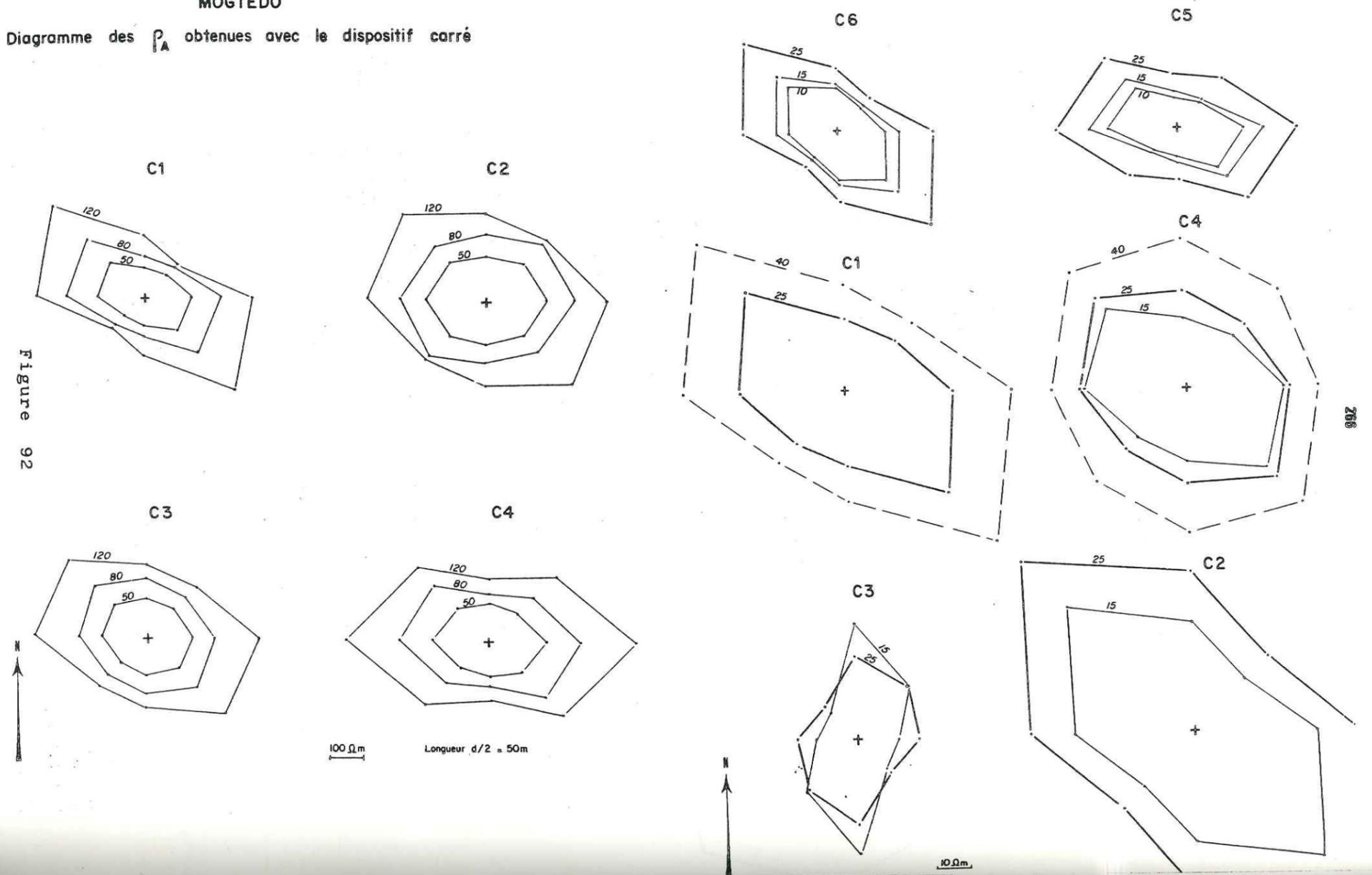
Figure 91 : Le dispositif carré, mise en œuvre, principe.

ZIGLA

Diagramme des P_A obtenues avec le dispositif carré

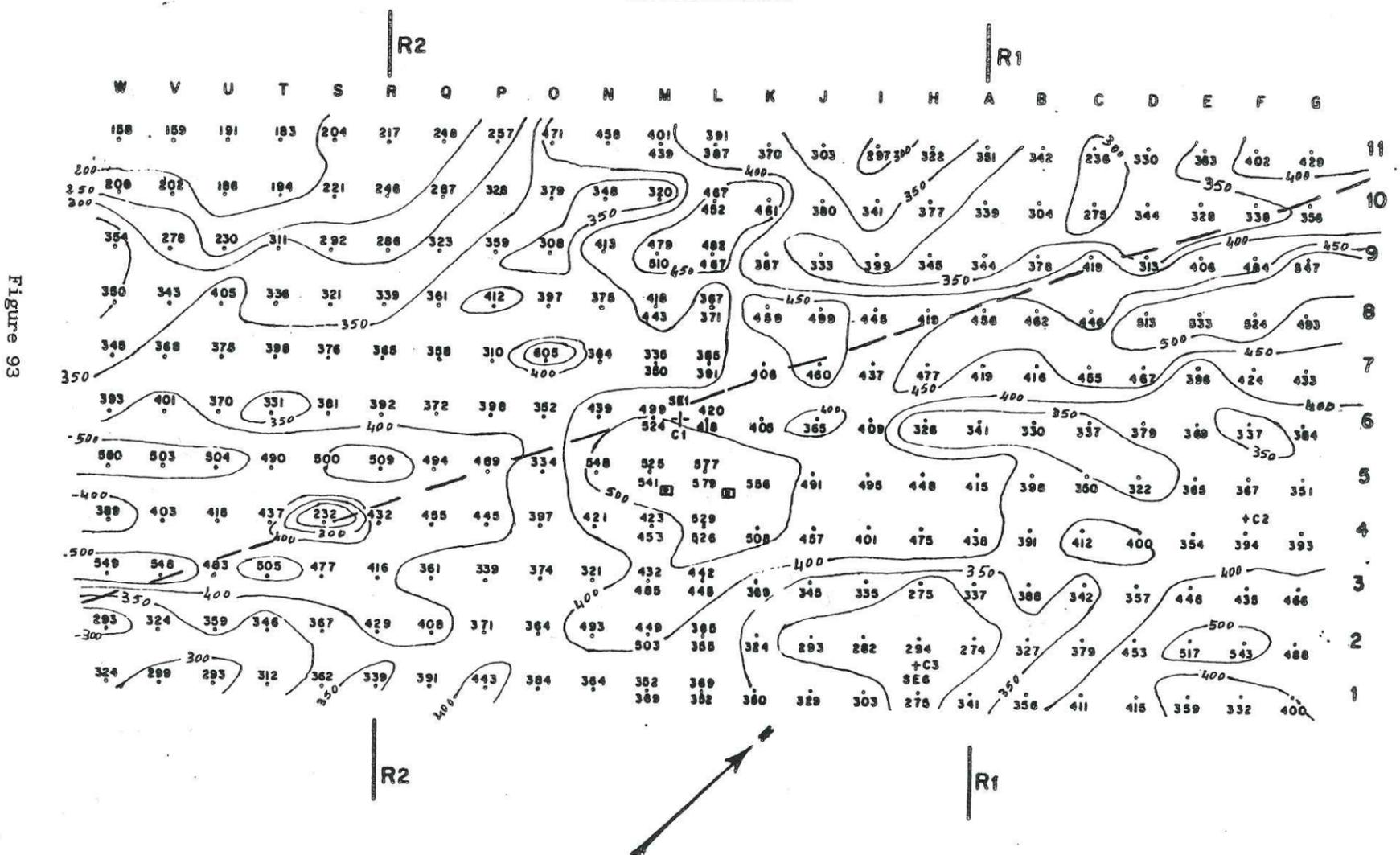
MOGTEDO

Diagramme des P_A obtenues avec le dispositif carré



MOGTEDO - VALEUR DES PA DES RECTANGLES 1 ET 2

ECHELLE
0 10 20 30m



La carte de résistivités apparentes de la méthode du rectangle nous semble moins adaptée pour la mise en évidence des réseaux de fractures du bed-rock, cela d'autant que nous ne pouvons pas interpréter ses valeurs de la même manière que celles du traîné électrique à cause de la dissymétrie du dispositif AMNB.

J.C. LACHAUD évoque la facilité de mise en oeuvre pour préférer la méthode du dispositif carré au sondage pluridirectionnel, qui toutes les deux sont des méthodes destinées à préciser les directions d'anisotropie. Nous ne partageons pas l'avis de LACHAUD à ce sujet. En effet, comme les directions d'anisotropie les plus intéressantes sont celles qu'on retrouve dans la zone fissurée du substratum, nous avons pu voir qu'une seule mesure (avec des longueurs appropriées du AB et MN) était suffisante par directions. Dans ces conditions, le sondage pluridirectionnel devient plus rapide à réaliser surtout lorsqu'on veut avoir des valeurs dans de nombreuses directions, afin de déterminer avec précision l'azimut de la fracture recoupée.

Du point de vue résultats, les données du dispositif carré (figure) sont à tous les égards comparables à celles des sondages pluridirectionnels. Il faut cependant considérer ici que la direction de la fracture correspond à celle du plus petit axe du diagramme selon laquelle la résistivité est minimum alors que c'est le contraire pour les diagrammes des sondages pluridirectionnels où dans la branche montante de la courbe du sondage électrique, l'allongement se fait dans la direction de la fracture.

CONCLUSIONS

La prospection géophysique et principalement la méthode des résistivités, alliée à la photo-interprétation demeure, le meilleur outil pour l'implantation des ouvrages de captage d'eau dans les formations du socle cristallin de Haute-Volta. Son efficacité est maintenant prouvée: à ce jour tous les ouvrages ayant pu fournir des débits supérieurs à 10 m³/h, tirés de la nappe profonde ont été implantés après prospection géophysique (méthode des résistivités). Le coût modeste de l'équipement pour la prospection électrique et sa mise en oeuvre rapide a fait d'elle une méthode privilégiée. Ses faiblesses résident dans le manque de précision des épaisseurs calculées et dans le fait que, sous une grande épaisseur d'altérites, la puissance de la zone fissurée du bedrock, qui est la frange productive recherchée, est indéterminable.

En fait, la complexité du problème traité résulte de l'hétérogénéité et surtout de l'anisotropie des divers milieux et plus spécialement du milieu fissuré dont nous venons de voir plusieurs exemples en nous aidant des sondages pluridirectionnels.

Pour comprendre le mécanisme de la circulation des eaux dans ce milieu, il convient d'avoir toujours ce fait en mémoire.

3.3. LES OUVRAGES DE CAPTAGE D'EAU DANS LES FORMATIONS DU SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE VOLTA

INTRODUCTION

Nous avons déjà, à travers les études pétrographiques et hydro-géologiques du bassin versant de la Sissili, ainsi que de celles de nombreux sites répartis sur l'ensemble des formations cristallines de Haute-Volta, montré, en nous appuyant sur les données de la géophysique, de la géochimie et de la corruption isotopique des eaux, les difficultés d'implantation des ouvrages de captage. Difficultés liées à l'hétérogénéité du milieu cristallin.

Les études avant forage, bien conduites avec photo-interprétation, prospection géophysique, prise en compte des indices naturels, ont permis d'accroître considérablement le taux de succès et la productivité hydraulique des ouvrages.

Cependant, l'expérience de ces dernières années montre que la réalisation technique des ouvrages de captage continue à poser des problèmes de nature variée dont il convient de parler ici, car le succès d'un ouvrage dépend tout aussi bien de son implantation pour laquelle nous sommes sollicité que de ses caractéristiques techniques propres.

Ces problèmes sont:

- la traversée des arènes fluentes;
- le diamètre des puits et leur équipement;
- le contrôle de l'exécution des ouvrages.

La traversée des arènes fluentes

Une fois humides, les arènes argileuses dérivant de l'altération des granitoïdes ou les argiles provenant des roches basiques deviennent très bouillantes. On les désigne alors sous le terme de "fluent". Lorsque cet horizon présente une grande épaisseur (même supérieure à 5 mètres), sa traversée va poser des problèmes techniques tant au niveau des forages que des puits.

Lors de la réalisation du forage d'essai de la zone 3 du ranch de Léo en 1975, le phénomène suivant s'est produit: la foration se faisait à la boue et en rotary. La puissance de la pompe à boue étant faible pour assurer une évacuation très rapide des cuttings, nous avons observé dès la profondeur de 20 mètres un retour de ces derniers dans la colonne d'injection chaque fois qu'on devait s'arrêter pour ajouter un tube. Il y avait donc un bouchage systématique, lié à l'appel par différence de densité, entre boue chargée de cuttings, et boue légère en cours d'injection. Nous avons résolu le problème en assurant après la descente de chaque tube un nettoyage du trou en faisant tourner la pompe 10 à 25 minutes pour éliminer les cuttings et assurer ainsi une homogénéité de densité entre boue à l'intérieur et à l'extérieur du tubage. Cet exemple montre que la bouillonnance dans les arènes fluentes peut se faire par appel de pression différentielle. En fait, ce phénomène est devenu rare au niveau des forages d'eau avec l'emploi généralisé des compresseurs, comme source d'entraînement des marteaux-fond-de-trou et d'évacuation des cuttings par pression résiduelle. Mais la traversée des arènes fluentes épaisses continue à nécessiter, même avec cette technique, l'utilisation d'un

tubage provisoire à l'avancement destiné à maintenir les parois du trou dont la boullance rapide vient coincer l'outil de foration.

Les équipes de l'A.V.V. connurent ces problèmes à Manga en 1976 et à la "Patte d'Oie" de Ouagadougou, où dans les deux cas la foration a été interrompue puis abandonnée en raison du caractère argileux et de l'épaisseur très grande des altérites humides.

Une fois le forage exécuté jusqu'au socle sain, la pose du tubage définitif ne présente généralement pas de difficultés particulières mais il importe de munir celui-ci d'un bouchon de fond dont l'absence peut favoriser la naissance du phénomène décrit dans la zone 3 du ranch de Léo, entre cette fois le terrain et l'intérieur du tubage, et qui s'est reproduit dans le cas du forage de Pô "adduction d'eau-9 centres secondaires" dont nous parlerons en traitant des pompes d'essai.

Si le problème de la traversée des arènes fluentes est résolu au niveau des forages, il reste entier pour les "puits modernes". En effet, jusqu'en 1981, la pratique d'exécution des puits n'avait point techniquement évolué: elle consistait, soit à descendre un cuvelage monolithique en béton imperméable jusqu'à 2 ou 4 mètres dans la nappe, ou à réaliser un captage de diamètre réduit destiné à pénétrer dans le fluent de 4 à 8, voire 10 mètres. Seulement ces colonnes monolithiques ou ces captages n'étant pas crépinés, on observe souvent une remontée du fluent dans la colonne par effet de pression différentielle exactement de la même manière que ce qui a été observé dans la zone 3 du ranch de Léo. Cette remontée du fluent fut observée dans de nombreux puits avec captage, et notamment dans le puits de Kossouka (Teninbougroun) où l'on constata que 12 heures après la descente de 4 mètres de colonne, la moitié de celle-ci était envahie par la boue.

Nous voyons deux solutions à la résolution du problème des fluents au niveau des puits:

1°) Un crépinage de la colonne captante; celui-ci présente en effet deux avantages: une diminution de la pression sur le fond du puits, donc aussi de la remontée du fluent; et aussi une amélioration de la productivité hydraulique du puits. En effet, ce qui rend les arènes fluentes peu productives, c'est leur faible perméabilité (10^{-8} à 10^{-7} m/s), donc aussi la faible vitesse d'écoulement de l'eau vers les ouvrages de captage. Si v est la vitesse maximum de percolation de l'eau dans ces formations qui permet aux puits de produire un débit Q , celui-ci est relié à v par la relation:

$Q = v s$ s étant la surface interceptée par les filets liquides. C'est dire que pour un puits qui n'est productif que par son fond, le débit devient:

$$Q = v (\pi r^2) \text{ puis passe à } \\ Q' = v (\pi r^2 + \pi_2 rh)$$

si la colonne de captage est crépinée sur une hauteur h dans un puits de diamètre r .

L'intérêt du crépinage de la paroi de la colonne nous paraît donc des plus évidents. La productivité de l'ouvrage serait encore accrue si on lui associait au crépinage un développement efficace à travers un gravillon filtre correctement calibré.

La deuxième solution au problème du fluent consiste à l'éviter en choisissant une implantation judicieuse. La grande majorité des "puits modernes", même ceux dotés de colonnes de captage, sont des puits imparfaits. Ils exploitent les arènes fluentes et très rarement les arènes grenues. D'où leur faible productivité (plus de 60 % des puits ont des débits insuffisants et

tarissent aux périodes où ils sont le plus sollicités, c'est-à-dire de Mars à Juin. La réalisation d'un puits parfait à travers une grande épaisseur de fluent étant une opération lente et onéreuse, il faudrait implanter les puits dans des zones de roches broyées, recouvertes d'une faible épaisseur d'altérites fluentes. Il est bien sûr évident qu'une implantation répondant à ces conditions nécessite, pour les puits, des études, avant réalisation, aussi complètes que celles réalisées pour certains forages, c'est-à-dire photo-interprétation, suivie d'étude de terrain et de prospection géophysique. Le taux très élevé de puits à débit insuffisant devrait conduire à la réalisation de telles études qui, en permettant de capter les arènes grenues et la roche fissurée par dynamitage, assureraient certainement aux puits qui seraient alors des puits parfaits, une meilleure productivité. Du point de vue du coût, il faut remarquer que celui des études est bien minime auprès de celui des ouvrages secs ou à débits insuffisants.

Le diamètre des puits

En dehors des puits forés, réalisés à la sondeuse "Calwel" par l'A.V.V., les puits modernes creusés par les services publics en Haute-Volta ont des diamètres de 1,80 et de 2 m, intérieur et extérieur avec une colonne de captage (si elle existe) de 1,40 - 1,60 mètres. Ces puits présentent pour les utilisateurs du monde rural, l'inconvénient de ne pouvoir être entretenus (curage, approfondissement) sans l'utilisation de poulies et de cordes robustes dont le monde rural est souvent dépourvu. Il y a donc lieu de réduire à 1,40 - 1,60 mètres, les dimensions de cuvelage des puits.

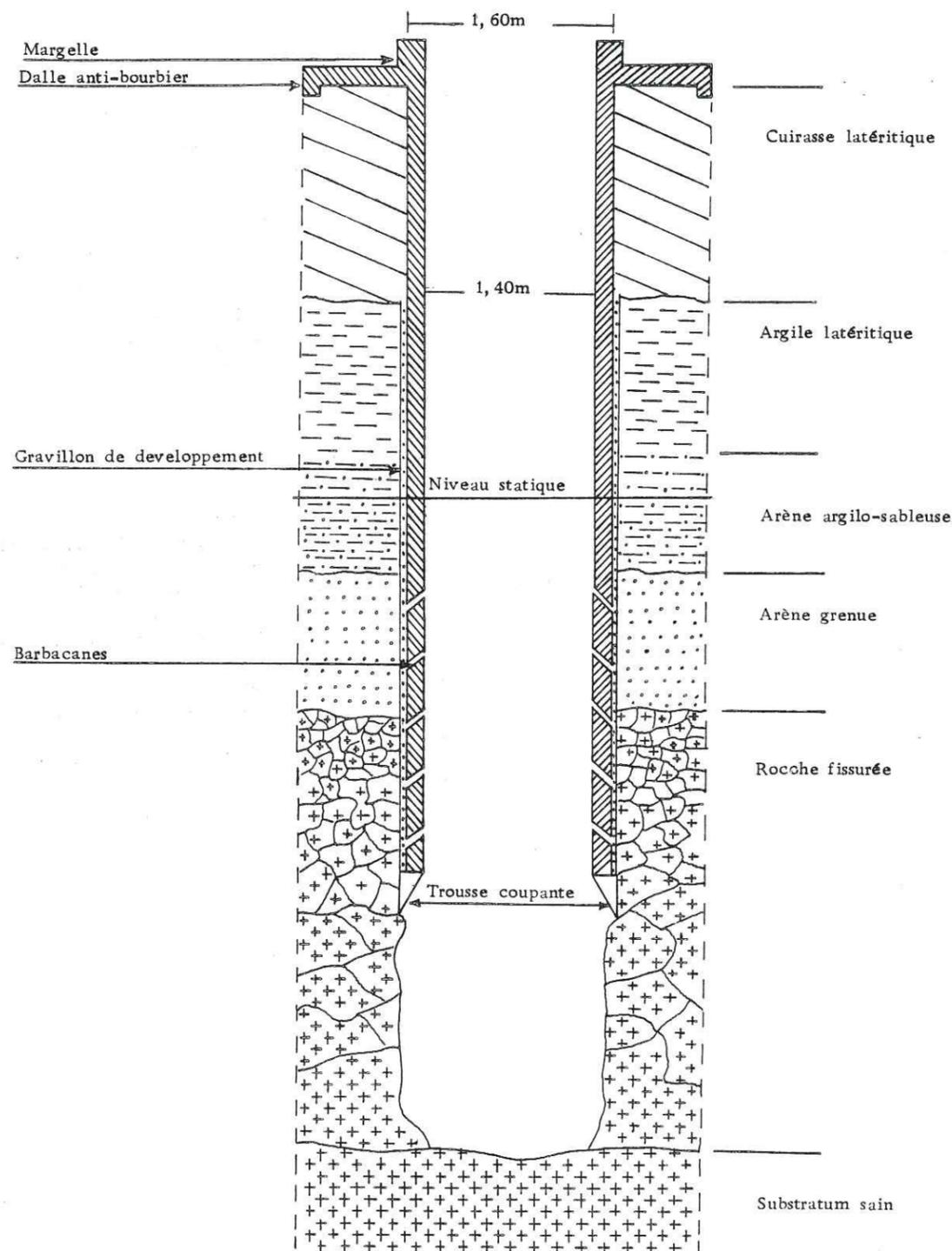
Nous proposons des puits monolithiques de diamètres 1,40 - 1,60 mètres, parfaits crépinés au niveau des arènes grossières et de la roche fissurée (fig.). Ceux-ci présenteraient sur les puits existants l'avantage d'être plus productifs. La réduction du diamètre permet une économie de 20% sur le prix de la colonne, tout en autorisant son entretien par les utilisateurs qui pourraient descendre sans corde, ni poulie dans les puits.

Le contrôle de l'exécution des ouvrages de captage

Tant que les puits et les forages étaient réalisés en régie par des organismes d'Etat, encadrés par des fonctionnaires gérant des projets dont l'objectif final était de fournir de l'eau en quantité suffisante aux hommes et au bétail, le problème du contrôle de l'exécution des points ne se posait pas; les réalisateurs ne voyant dans les opérations aucun aspect lucratif. Mais ces dernières années, l'ampleur des besoins d'équipement en points d'eau fut telle que l'Etat, voyant ses structures débordées, fut amené à passer des marchés de forages à des entreprises privées, créées pour répondre à la demande croissante de foration. Malheureusement, nombre de ces entreprises étaient beaucoup plus soucieuses de vendre des mètres linéaires forés, plutôt que des points d'eau productifs, ce qui les conduisit à travailler en marge des règles techniques et même morales recommandables.

Devant les difficultés que représente la traversée des arènes et des argiles fluentes pour des ateliers non équipés en conséquence (absence de tubage à l'avancement), certains entrepreneurs n'hésitent pas à mettre en cause la fiabilité des études d'avant-forage. D'autres vont jusqu'à frauder sur les profondeurs recommandées, dès qu'ils sont obligés d'interrompre techniquement la foration. Des coupes géologiques falsifiées sont alors confectonnées avec description de couches imaginaires pour des profondeurs non atteintes.

Parmi les nombreux cas de fraude que nous avons rencontrés, nous ne citerons que ceux de Pô et de Pouni:



TYPE DE Puits RECOMMANDE POUR LE CAPTAGE DES EAUX SOUTERRAINES DANS LES FORMATIONS DU SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE-VOLTA

Figure 94

. A Pouni, après avoir annoncé les forages négatifs sans avoir réalisé le métrage recommandé, l'entrepreneur foreur, prié de reprendre les travaux sous surveillance réalisa des forages de 7 et de 5 m³/heure.

. A Pâ, après notre implantation, le foreur nous communiqua une coupe géologique couvrant le métrage recommandé par la géophysique et annonça le forage négatif (débit inférieur ou égal à 600 l/h). Le Maître d'Oeuvre dut demander une nouvelle prospection, mais avant de la réaliser nous avons tenu à voir sur le terrain les déblais du forage dont on nous avait transmis la coupe.

Devant la non conformité entre coupe et déblais, le foreur fut sommé de reprendre la foration au même point, et y obtint un débit de 3,6 m³/heure, alors suffisant pour alimenter le campement du chantier routier Boromo-Houndé qui se composait de 15 villas, d'un garage et du Laboratoire de mécanique des sols des travaux publics.

CONCLUSIONS

Nous avons inséré dans ce mémoire ces lignes sur les ouvrages de captage afin d'insister sur l'importance de la qualité de ces derniers sur la productivité hydraulique d'un point d'eau. Les études avant forages, aussi fines soient-elles, ne suffisent pas pour assurer le succès d'un forage ou d'un puits. Il faut nécessairement les accompagner d'un ouvrage de captage dont les caractéristiques doivent être en rapport avec les propriétés hydrogéologiques de l'aquifère qu'on choisit d'exploiter. Il revient au Maître d'Oeuvre de veiller à ce que cette exigence soit respectée. L'Etat qui assure ce rôle en Haute-Volta, doit mettre en place des structures de contrôle appropriées pour la surveillance de l'exécution des ouvrages de captage confiée à des tiers, afin de tirer profit des études avant-forages qui, bien que d'un coût modeste par rapport à celui des ouvrages de captage, représentent des investissements non négligeables.

IV . HYDROGEOLOGIE DU SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE-VOLTA

4-1 LES TRAVEAUX RÉALISÉS.

4-2 MODE DE GISEMENT DES EAUX SOUSTERRAINES.

IV - HYDROGEOLOGIE DU SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE-VOLTA

INTRODUCTION

On peut parler de l'hydrogéologie générale des formations du socle cristallin de Haute-Volta en partant de deux facteurs principaux qui la commandent : la géomorphologie externe et la morphologie profonde du substratum.

Nous essaierons de traiter le problème en nous appuyant sur l'hydrogéologie du bassin versant de la Sissili dont nous avons commencé l'étude depuis 1973, grâce aux recherches d'eaux souterraines dans le ranch d'embouche de Léo, mais aussi et surtout en nous aidant des nombreuses observations que nous avons pu faire en participant aux programmes d'équipement en points d'eau des villes et des villages de Haute-Volta qui ont été menés au sein de la direction de l'Hydraulique et de l'Equipement Rural (H.E.R.) depuis 1974.

4.1- LES TRAVAUX RÉALISÉS

Notre participation au niveau de ces travaux se situait dans les études avant-forage, c'est-à-dire Interprétation photogéologique et Prospection géophysique .

La carte ci-après (figure 95) donne la situation géographique des sites prospectés dans les divers projets dont nous indiquons ici les plus importants.

1974-1975

"Projet urgence Sahel" avec prospection et équipement de 33 villes et villages dont, Yako, Gourcy, Tougan, Kiembara, Séguénéga, Tikaré, Mané, Sebba, Djibo, Titao, Koumbri, Arbinda, Falagountou, Markoye, Boussouma, Téma.

1973-1975

Etude hydrogéologique du bassin versant de la Haute Sissili dans le cadre du projet du ranch d'embouche de Léo: prospection suivie de forages et de pompages d'essai de six plates-formes.

1977-1978

"Alimentation en eau de neuf centres secondaires": photo-interprétation, prospection géophysique, suivies de forages et de pompages d'essai, puis de pose de canalisations d'adduction d'eau des villes de Boromo, Dédougou, Gaoua, Nouna, Tougan, Koupéla, Tenkodogo, Fada-N'Gourma et Pô.

1978-1981

"Hydraulique villageoise dans l'O.R.D. du Centre Nord-Kaya" financée par le Fond de Développement Rural (F.D.R.): prospection, équipement en forages avec pompes manuelles de plus de 100 villages des sous-préfectures de Barsalogho, Pissila, Kongoussi et Kaya.

1980-1981

"Hydraulique villageoise dans l'O.R.D. de la Volta-Noire" financée par les Pays-Bas: prospection de 24 sites villageois répartis notamment dans les sous-préfectures de Safané, Tougan, Kiembara.

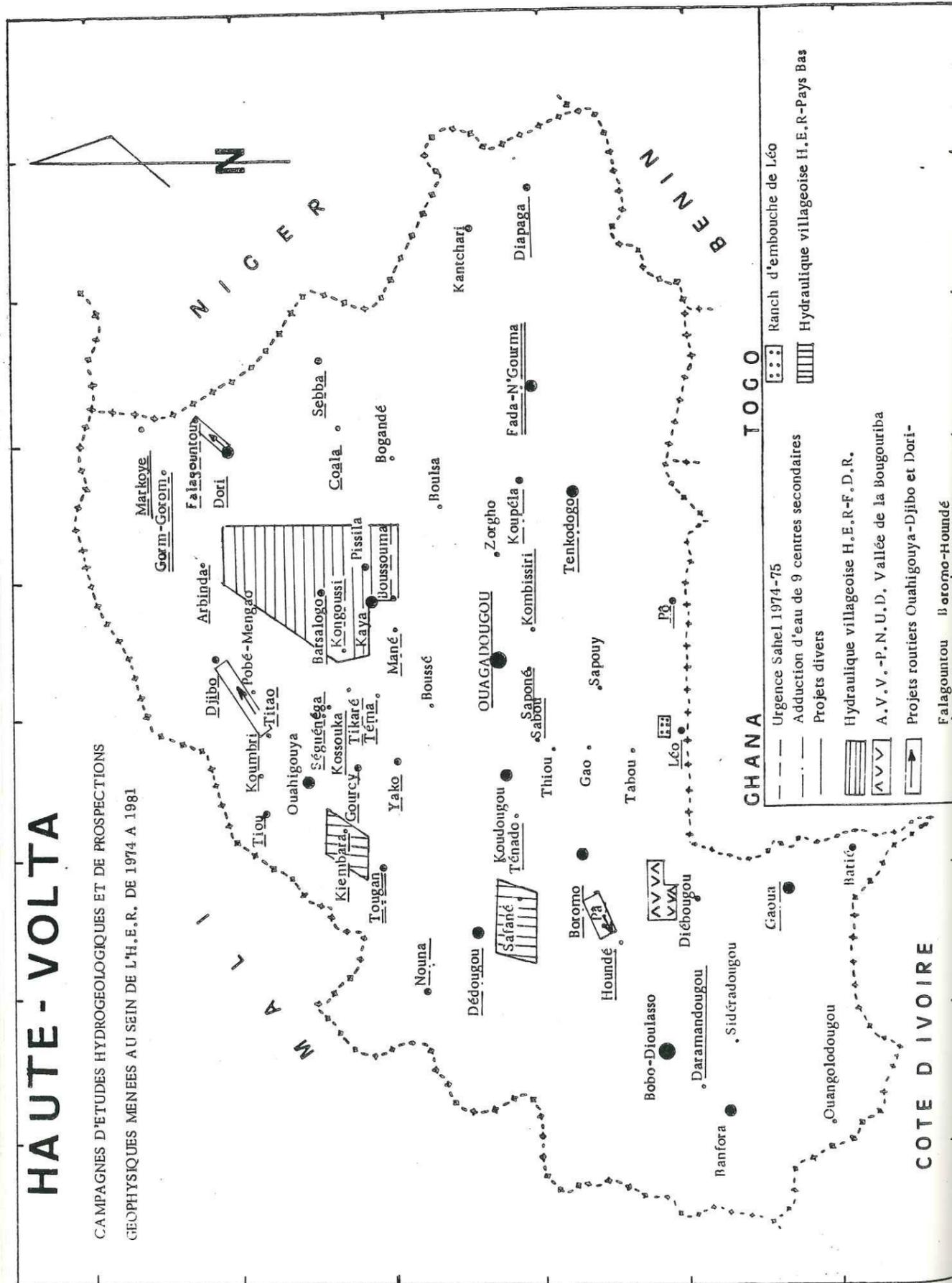


Figure 95

1978-1979
Prospection de sites pour l'alimentation en eau des chantiers routiers Ouahigouya-Djibo et Dori-Falagountou.

1978
Prospection de 20 sites dans la vallée de la Bougouriba pour l'alimentation en eau de villages A.V.V., financée par le P.N.U.D.

1977
Implantation des forages d'eau des marchés à bétail de Markoye, Gorom-Gorom, Pouytenga, P8.

1979-1980
Alimentation en eau de quatre centres scolaires de Dori, Pouni, Boromo et Léo.

Signalons enfin un ensemble d'études ayant permis la prospection d'une centaine de sites, que nous avons regroupées dans la rubrique "Forages divers" avec notamment:

- La prospection de cinq sites dans la ville de Ouagadougou, dont la "Patte d'Oie", le périmètre du BUVOGMI et l'E.N.A.;
- Prospection du périmètre de la cellule de développement de l'I.S.P.O. à Gampéla;
- Etude du site de Daramandougou pour le projet Elevage-Ouest Volta;
- Etude de quatre sites villageois dans la sous-préfecture de Kombissiri;
- Etude d'implantation de forages d'eau du campement de bitumage de la route Boromo-Houndé, du C.E.G. et de deux quartiers de Yako pour le compte de l'entreprise Kanazoé;
- Prospection de la ville de Diapaga pour l'O.R.D. de l'Est et du site touristique de Sabou pour le Ministère de l'Environnement et du Tourisme.

Toutes ces études ont nécessité une présence de trois à quatre jours par semaine sur le terrain entre les mois d'Octobre et de Juin de chaque année afin d'orienter les travaux de la brigade de géophysique opérant en permanence.

Les faits que nous avancerons dans ce chapitre ne sont que nos analyses des données de ces campagnes de prospection tant photogéologiques que géophysiques, ainsi que celles des forages qui en firent suite.

4.2. MODE DE GISEMENT DES EAUX SOUTERRAINES

En se fondant sur les observations géomorphologiques, le comportement des nappes (semi-captivité, fluctuation des niveaux piézométriques) et la chimie des eaux, on peut proposer aujourd'hui un schéma du mode de gisement des eaux souterraines qui laisse apparaître deux types de nappes: l'une superficielle et dépendante de la géomorphologie externe, et l'autre profonde liée au modelé du bedrock.

4.2.1. GÉOMORPHOLOGIE ET NAPPES SUPERFICIELLES

GEOMORPHOLOGIE

Les paysages pénéplanés qui caractérisent les régions du socle cristallin de Haute-Volta sont marqués par la présence quasi générale de cuirasses latéritiques mollement ondulées ou tabulaires, mais étagées. Les différents niveaux de la cuirasse ont été entaillés par le réseau hydrographique permettant de distinguer du point de vue topographique des marigots, des bas-fonds, des versants et enfin des interfluves.

Les interfluves

Ils sont constitués par les collines des sillons éburnéens, et plus rarement par des moles de granite batholitique ou de migmatite. Des buttes-témoins de cuirasse latéritique peuvent coiffer ces collines. Les différentes cuirasses sont étagées suivant une disposition en rapport avec leur âge relatif. Ainsi G. HOTTIN et O.F. OUEDRAOGO (1975) distinguent:

- Des cuirasses éocènes d'une altitude de 700 à 750 m dans le Sud-Ouest de la Haute-Volta; elles y coiffent les grès et leurs intrusions doléritiques. Dans la partie cristalline du pays, il leur correspond les cuirasses des environs de Kongoussi transformées en bauxite par le lessivage de leur fer. Ici leurs altitudes avoisinent 500 mètres.

- Des cuirasses pliocènes contemporaines des dépôts du continental terminal dont les nodules ferrifères et violacées à irisations vertes et bleues se retrouvent dans de nombreuses cuirasses plio-villafranchiennes, ce qui témoigne de leur grande extension initiale.

- Des cuirasses plio-villafranchiennes. Elles représentent les parties indurées d'un des glacis les mieux conservés et les plus épais. Elles sont surtout remarquables dans la partie nord du plateau mossi, notamment dans le Yatenga où les plus spectaculaires sont celles de Kossouka, de Ouahigouya, de Kombri et de Pilimpikou. Leur épaisseur qui est de 4 à 8 mètres sur les granites et les migmatites peut atteindre les 15 mètres, voire plus, dans les zones occupées par les schistes ou les roches vertes et dans les zones de transition roches vertes ou schistes-granites. D'une altitude de 480 à 500 mètres sur les grès du Sud Ouest, on les rencontre entre 320 et 360 mètres sur les formations du socle cristallin.

- Des cuirasses ouljiennes. Épaisses de 1 à 2 mètres, elles occupent la zone de transition entre les cuirasses plio-villafranchiennes et les cuirasses flandriennes situées dans les axes de drainage actuel.

En fait la différenciation des niveaux cuirassés est difficile et les corrélations inter-régionales peu aisées en raison de l'inexistence de fonds topographiques adéquats (les seules cartes topographiques disponibles pour la Haute-Volta sont à l'échelle 1/200 000, avec des courbes de niveau équidistantes de 40 mètres).

On notera que dans les régions voisines, M. MAURET (1975) a pu identifier 7 niveaux cuirassés dans le plateau mandingue du Mali (figure 97). Ces différentes cuirasses peuvent être comparées à celles distinguées par MICHEL (1970) au Sénégal et en Gambie et par BOULET (1970) en Haute-Volta (Tab. 53).

SENEGAL & GAMBIE MICHEL (1969)		MALI M. MAURET (1975)		HAUTE - VOLTA SEPTENTRIONALE - BOULET (1970)	
AGE		SURFACES		Régions granitiques et schisteuses	Régions schisteuses
				Régions de collines basiques	
Jurassique moyen	1ère surface-aplanissement				
Crétacé (Albien)	2ème surface-aplanissement				
Eocène inférieur	3ème surface-aplanissement				
Pliocène	Relief intermédiaire				
Quaternaire ancien et moyen (Inter- glaciaire (Mindel- Riss))	Haut glacis	Haut surface bauxitique Surface intermédiaire	Haut glacis cuirassé Moyen glacis cuirassé Moyen glacis cuirassé dégradé	Glacis supérieur à cuirasse conglomératique	Surface bauxitique Surface à cuirasse ferru- gineuse pisolithique Glacis à cuirasse conglomératique (supérieur)
Quaternaire moyen (interglaciaire Riss/Würm)	Moyen glacis	Bas-glacis		Glacis inférieur à cuirasse conglomé- ratique	Glacis polygénique Glacis à cuirasse conglo- ratique inférieur
Quaternaire récent	Bas glacis	Remblais récent			
				S u r f a c e f o n c t i o n n e l l e	

Tableau 53 : Tableau de corrélation entre les cuirasses latéritiques de l'Afrique Occidentale (Sénégal- Gambie, Mali, Haute-Volta septentrionale)

SCHEMA DONNANT LA DISPOSITION DES DIFFERENTES CUIRASSES DANS LA REGION DE KONGOUSSI

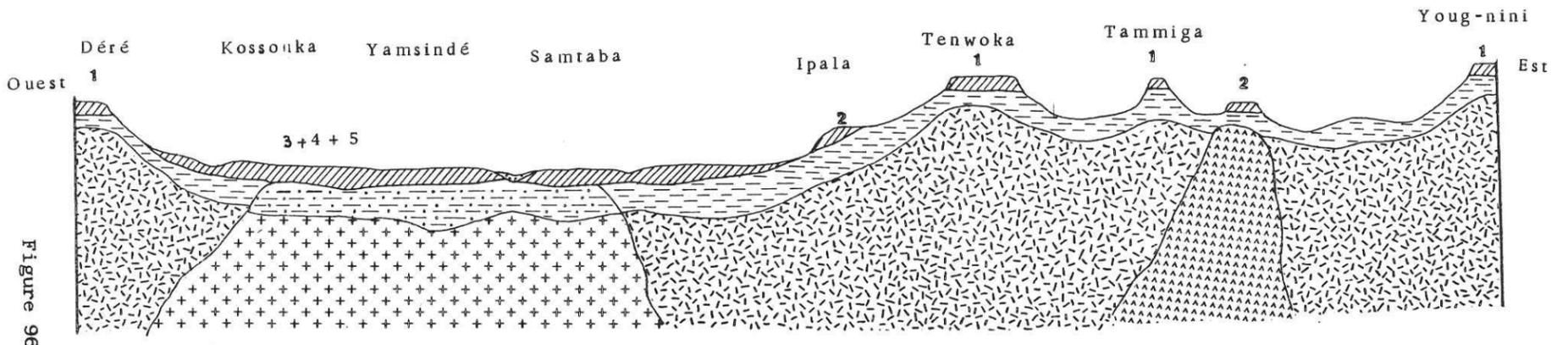


Figure 96

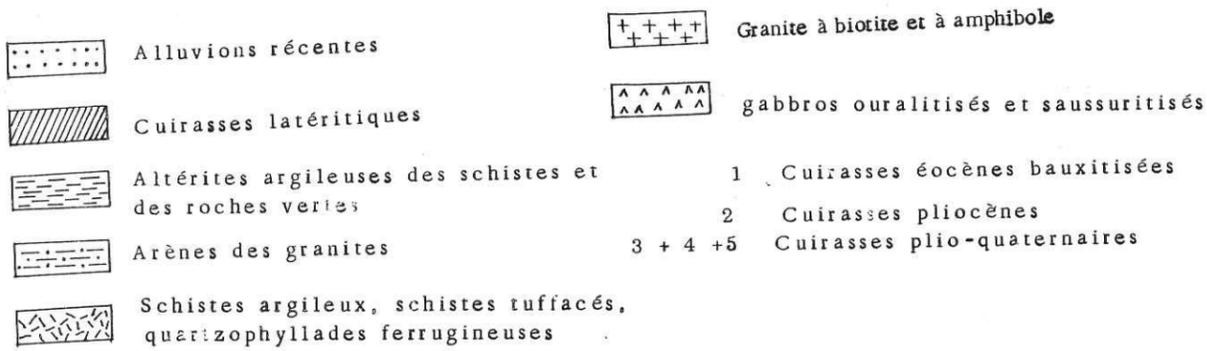
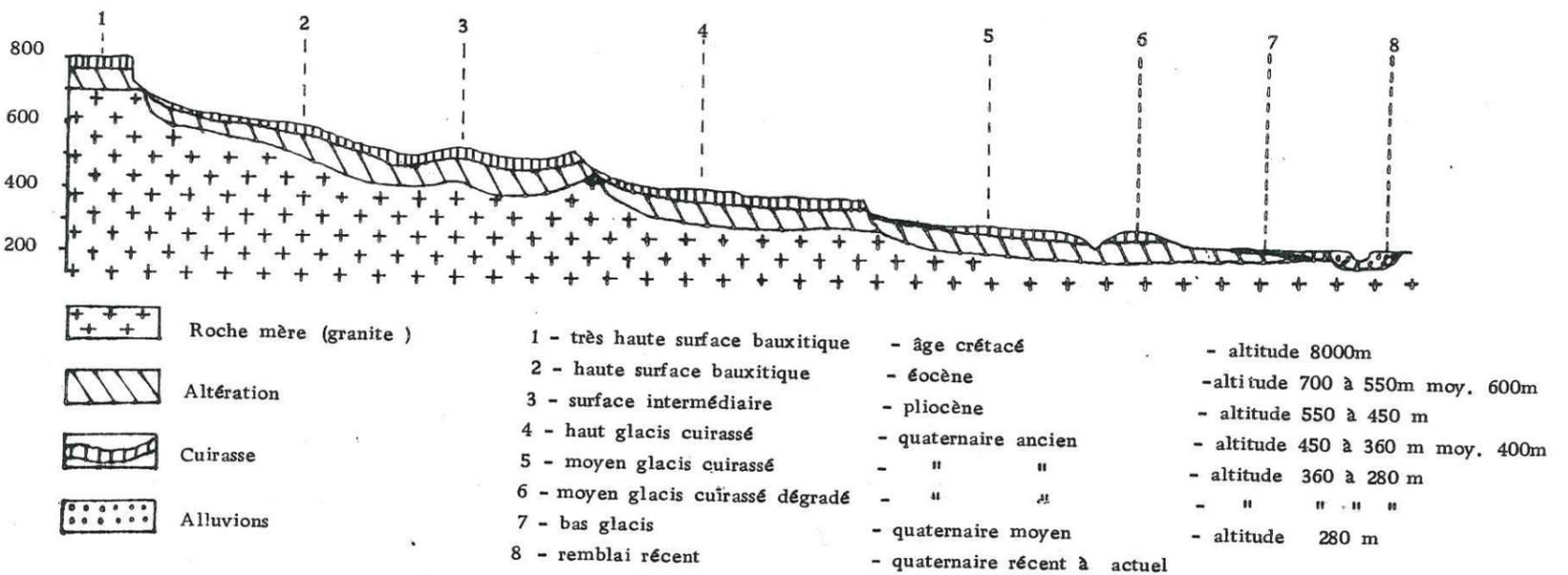
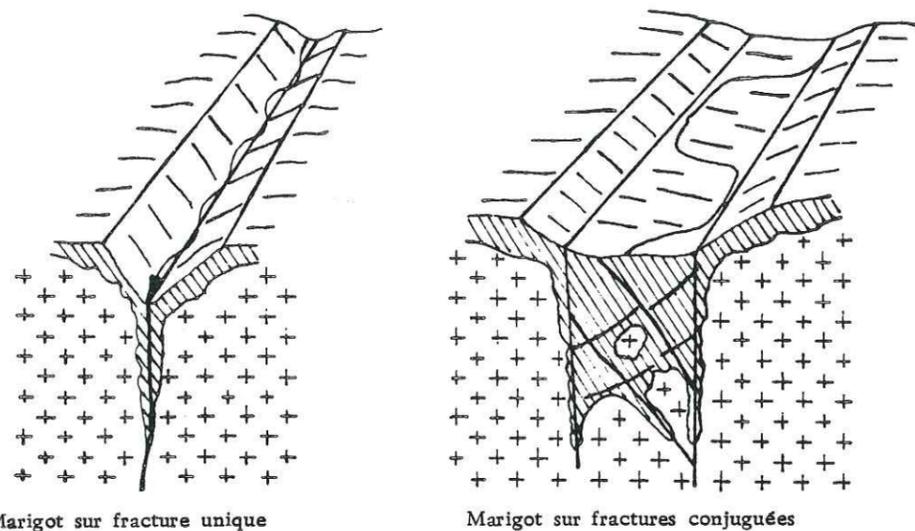


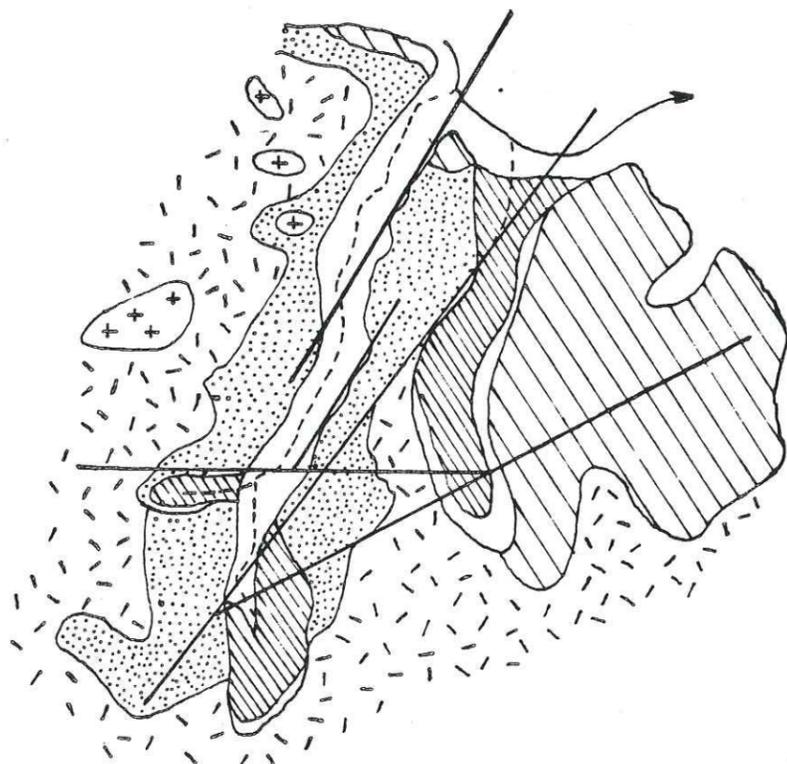
Figure 96

Figure 97 : Profil géomorphologique du Plateau Mandingue (Mali) d'après M. Raunet, 1975.





a) Influence des fractures sur la géométrie des marigots



b) Bas-fond en tête de talweg-fractures et marigots- Ranch de Léo

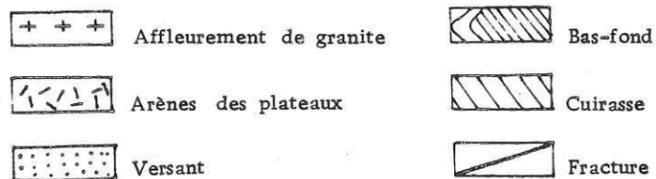


Figure 98

Les marigots

Ce sont les bras de rivière et leur environnement en replat où les eaux ruissellent et stagnent en partie. Dans le Nord de la région sahélienne les marigots à eau stagnante prennent le nom de mares.

L'étude de la répartition fréquentielle des directions des marigots montre que celles-ci correspondent bien souvent aux directions des linéaments (figure 98). Ceci est surtout vrai pour la Côte d'Ivoire où M. HAUBERT (1977) y rencontre, dans la boucle du Cacao, une très bonne corrélation entre alignement du réseau hydrographique et directions des linéaments (figure 98). Mais nous sommes ici en zones de forêt où les linéaments repérables se réduisent presque au réseau hydrographique, alors qu'au Nord les alignements végétaux, ainsi que le grisé des photos jouent un rôle de repérage aussi important que le réseau hydrographique. C'est ce qui explique qu'en zone de savane, la corrélation linéament-réseau hydrographique soit moins bonne.

Les zones fracturées correspondent à des couloirs facilement érodables qui deviennent vite des axes de drainage des eaux de ruissellement d'où l'existence aussi du phénomène d'inversion du relief qu'on rencontre souvent car une fois la cuirasse décapée les argiles sous-jacentes sont rapidement sapées pour laisser à nu la roche fissurée.

Les bas-fonds

Ils correspondent à deux phénomènes bien distincts:

- étalement du lit des marigots en flat lié au fait que ceux-ci coulent sur des couloirs de failles conjuguées ou voisines (fig. 98);
- têtes amont des marigots caractérisées par une absence de réseau hydrographique organisé et où le faible dénivelé permet une inondation de vastes superficies souvent occupées par des plateaux de cuirasse à peine recouvertes de colluvions;

Les plateaux et les versants

Les plateaux caractérisent la plus grande partie des régions du socle de Haute-Volta, et en particulier la zone centrale désignée sous le nom de plateau mossi. La cuirasse y est presque partout présente, mais la monotonie du relief est à rattacher à la prédominance des formations graniti-

Plus au Sud (régions frontalières du Ghana comme le bassin versant de la Sissili) la notion de versant apparaît un peu plus nettement avec le décapage de la cuirasse et l'apparition de plages couvertes d'arènes qu'on peut cartographier comme subaffleurant sans grand risque de se tromper sur la proximité du substratum dont les pointements deviennent nombreux.

Les nappes liées à la morphologie externe

Les implantations des puits traditionnels montrent une distribution spatiale qui indique qu'elle ne se faisait pas au hasard. Une mention particulière doit être faite à cet effet à propos des puits Dogon. Ces tribus qui habitent maintenant le Nord-Ouest de la Haute-Volta et l'Est du Mali avaient jadis occupé le plateau central de la Haute-Volta avant de migrer plus au Nord sous la poussée des conquérants mossi. Elles laissèrent derrière elles des puits foncés dans la cuirasse latéritique, et quelquefois même cuvelés à l'aide de buses en terre cuite, dès lors que les formations traversées devenaient bouillantes. Ces puits sont situés tous au pied des bowé où la planéité ou l'ondulation de la cuirasse a souvent donné lieu à l'existence

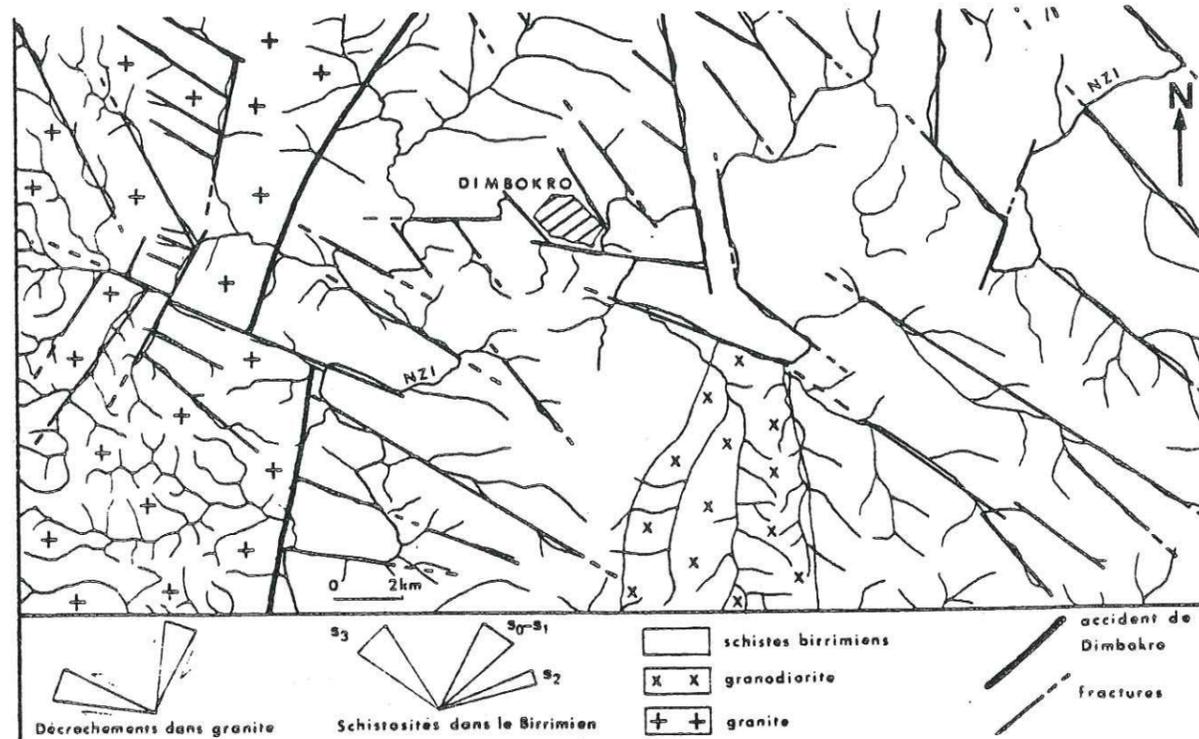


Figure 99 Côte-d'Ivoire : région de Dimbokro
Relation entre la structure et le réseau hydrographique sur substratum granitique et schisteux.

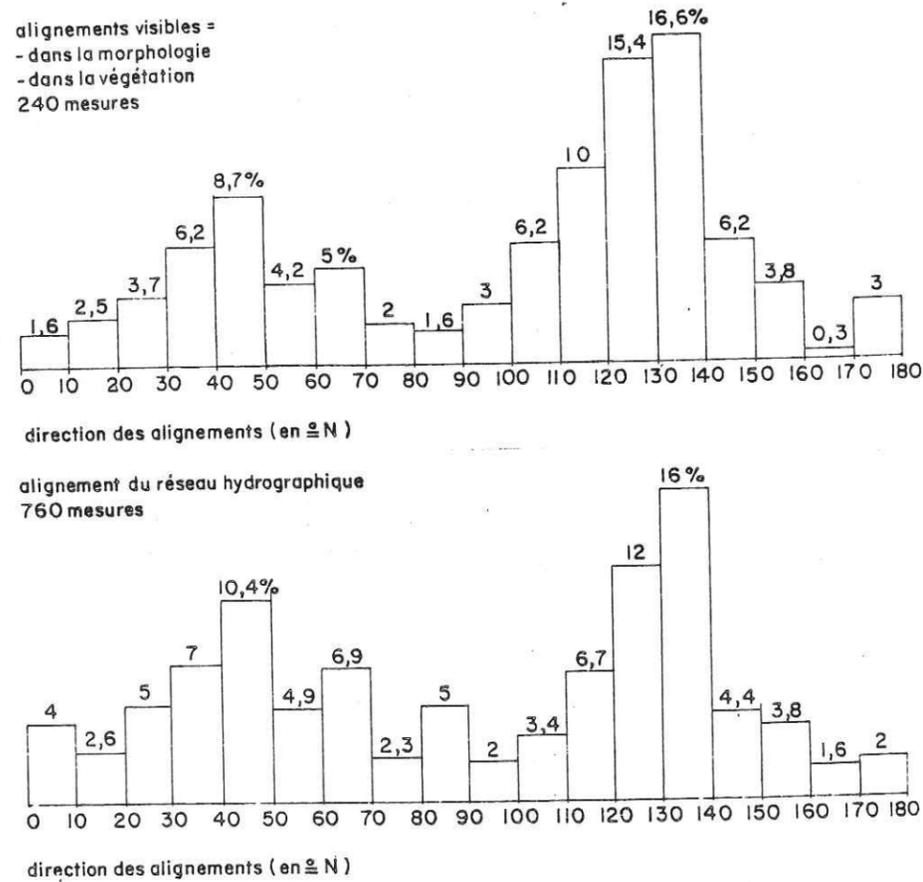


Figure 100 Boucle du Cacao
Répartition des directions des alignements (de plus de 2 km) visibles sur photographies aériennes dans les zones granitiques et birrimiennes

Haubert M.1977

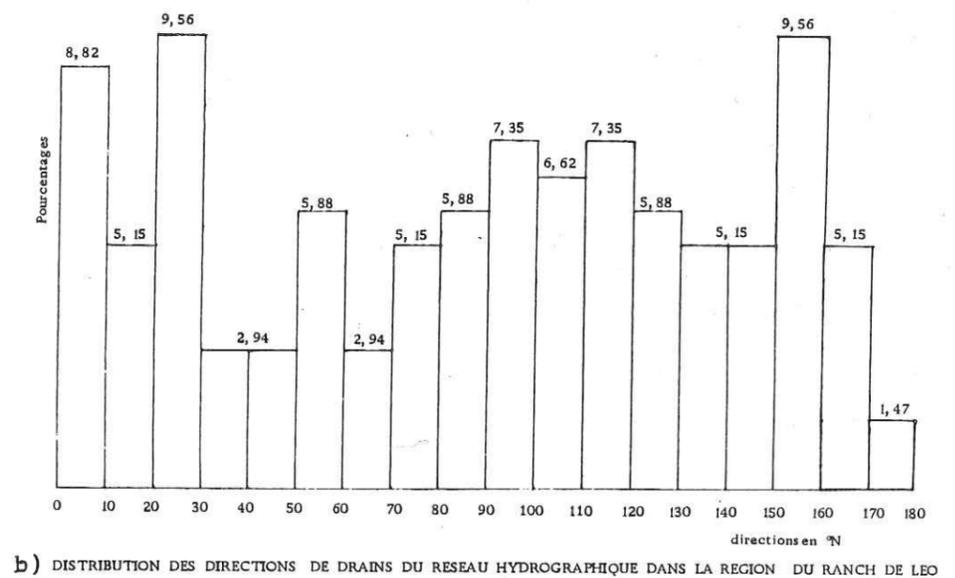
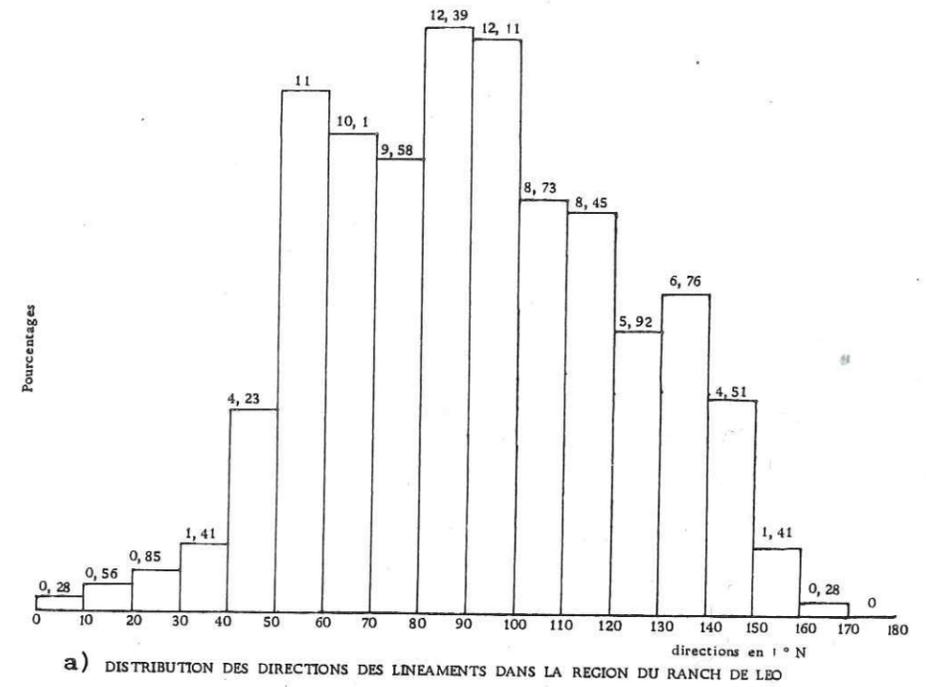


Figure 101

d'un type particulier de bas-fond caractérisé par un recouvrement argileux peu épais et occupé par les termites de la famille des cubitermes et des bosquets touffus (Kango en moré). Les puits sont quelquefois situés à l'intérieur même de ces bosquets, et le plus souvent dans leurs environs immédiats. Nombreux sont ces anciens puits qui, lorsqu'ils n'ont pas été bouchés par leurs creuseurs, continuent d'alimenter certains villages. Plus de cinq puits de ce type sont connus dans les environs du village de Kossouka (Yatenga).

L'implantation empirique de ces puits a obéi à la recherche de points bas où la cuirasse, atteignant son épaisseur maximum, était noyée toute l'année. La cuirasse est en effet la partie la plus productive des horizons supérieurs du profil d'altération. Elle est souvent fissurée et aussi parcourue de petits canaux semblables à ceux rencontrés dans la première couche d'argiles sur laquelle elle repose.

Des débits supérieurs à 15 m³/h ont été atteints dans cet horizon à Ouahigouya comme à Kaya où la nappe de la cuirasse noyée est exploitée pour l'adduction d'eau de ces localités.

Dans de nombreuses régions où cette nappe de la cuirasse noyée que nous qualifierons de nappe superficielle est présente, elle peut être indépendante de la nappe des arènes et de la roche fissurée que nous appellerons nappe profonde, bien que son plancher imperméable soit généralement situé entre 40 et 60 mètres en moyenne dans les axes faillés. L'indépendance des deux nappes s'observe surtout dans les zones à substratum de roches vertes ou de schistes dont les altérites sont très argileuses au point d'annuler toute infiltration per descensum de l'eau à travers elles et vers la nappe sous-jacente.

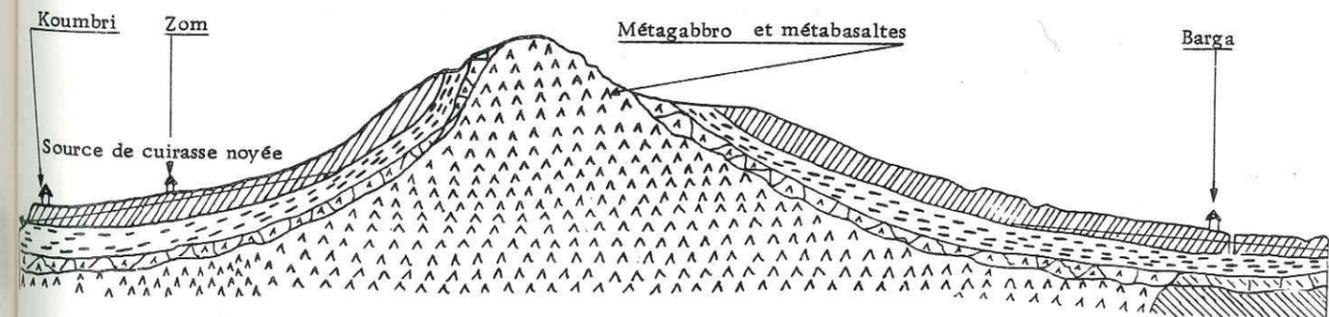
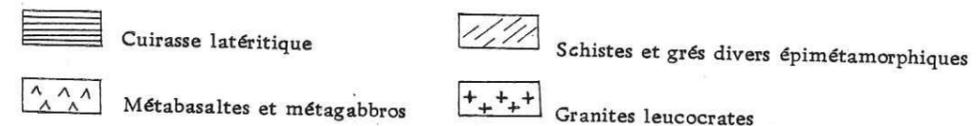
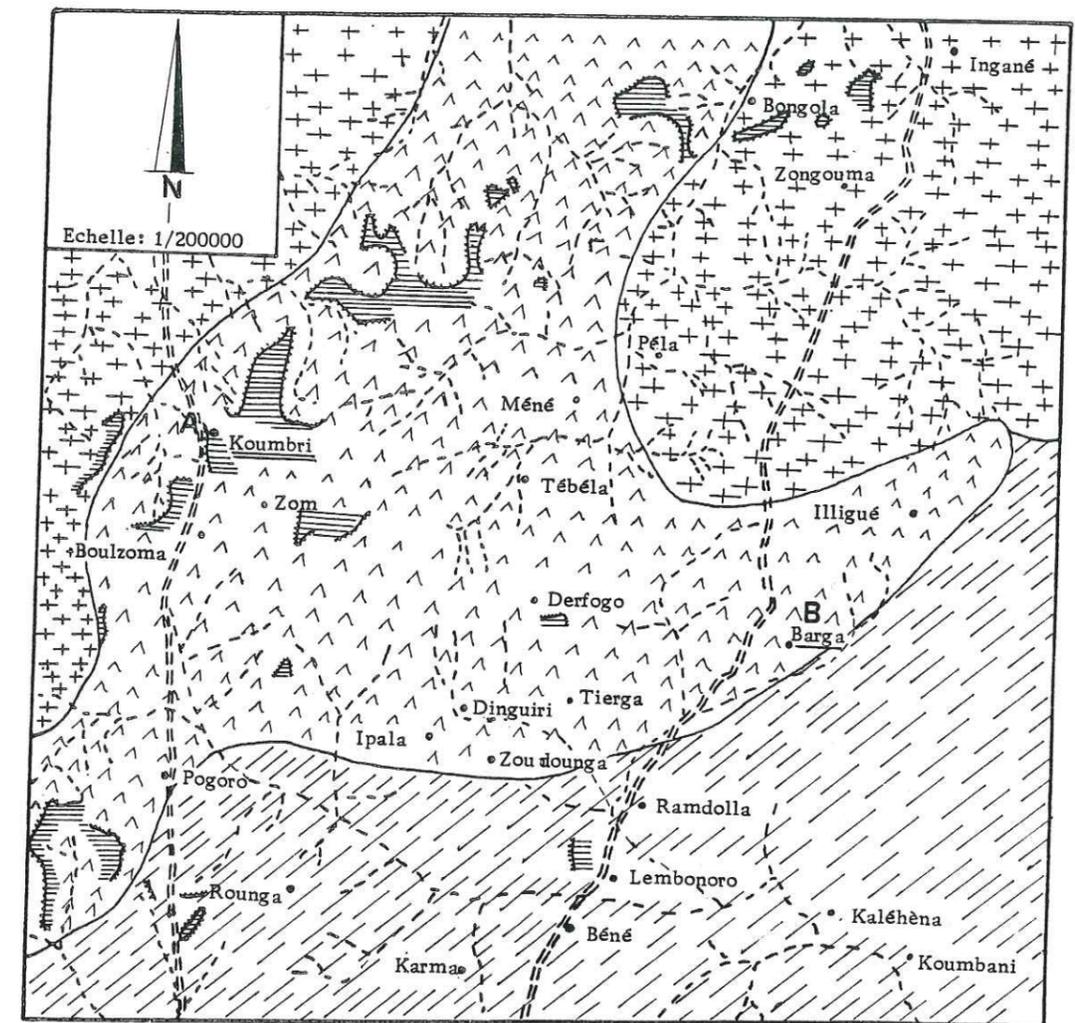
Il convient d'illustrer ce phénomène de nappes étagées ainsi que le mode de gisement de cette nappe superficielle à travers quelques exemples pris parmi les sites que nous avons étudiés et prospectés.

Le site de Koumbri

Le village de Koumbri situé dans le département du Yatenga au Nord-Ouest de Ouahigouya, repose sur un substratum de roches basiques décrites par P.E. GANSORE (1975) comme étant des metabasaltes et des métagabbros recouverts par des intrusions filoniennes de microgranites et de dolérites. Si nous réalisons dans le secteur une coupe schématique O.N.O.-E.S.E. allant du village de Koumbri à celui de Barga, elle nous permet de comprendre la morphologie de la région, morphologie qui explique le mode de gisement des nappes d'eau souterraines.

Le village de Koumbri occupe l'extrémité ouest d'un bowal légèrement ondulé, troué dans sa partie centrale pour laisser affleurer les roches vertes.

La nappe superficielle liée à la cuirasse reçoit une alimentation per descensum à travers le bowal, et c'est la terminaison brutale de ce dernier au Sud-Ouest du village de Koumbri qui permet à la nappe de donner naissance à la source de Koumbri, la seule émergence pérenne du plateau mossi qui apparaît au contact cuirasse-altérites argileuses. PELISSIER (1972) nous décrit une source temporaire, mais du même type dans la région de Yadibokro en Côte d'Ivoire (figure 104) au pied d'une cuirasse démantelée en "haricot".



GEOMORPHOLOGIE ET MODE DE GISEMENT DES EAUX SOUTERRAINES

Exemple du site de Koumbri

Figure 102

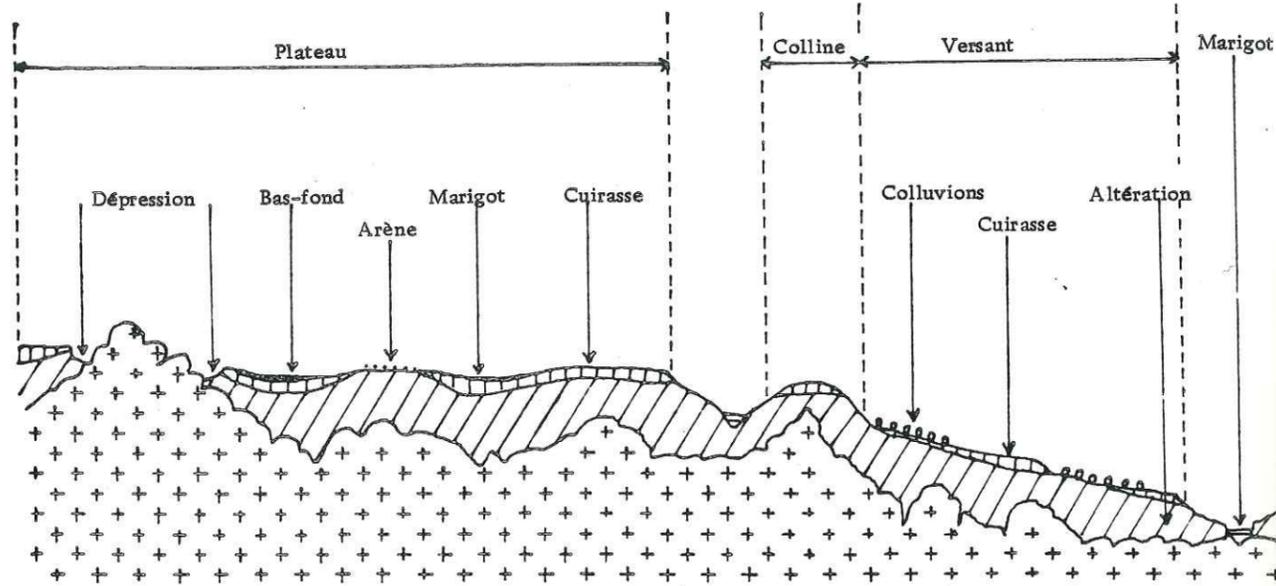


Figure 103 COUPE MORPHOLOGIQUE SCHEMATIQUE, PLATEAU - VERSANT (M. Engalenc 1975)

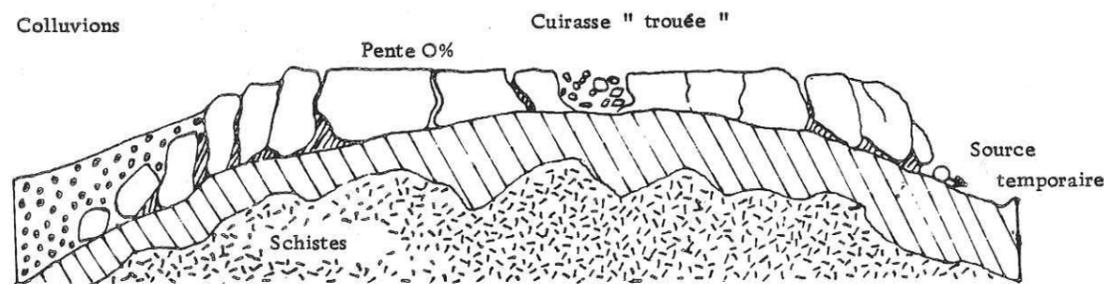


Figure 104

Cuirasse démentelée en "haricot" - Yadibikro Côte-d'Ivoire

d'après Pélissier-Géohydrologique (1974)

Dans le détail, à Koumbri, les eaux de ruissellement qui s'infiltrent pour alimenter la source coulent vers le Sud, alors que les eaux souterraines circulent vers le Nord.

La nappe profonde de la roche fissurée de Koumbri reçoit une alimentation latérale provenant d'infiltrations à travers la zone d'affleurement du Sud-Est du village. C'est cette nappe qu'exploite le forage que nous avons implanté en 1974 (projet Urgence Sahel) après étude photogéologique et prospection géophysique.

Le site de Kossouka

Kossouka qui appartient comme Koumbri au département du Yatenga est situé sur l'axe Ouahigouya-Kongoussi. Le village repose sur un substratum constitué d'un batholite de granite syntectonique à biotite et amphibole intrusif dans des formations schisteuses éburnéennes. Le village est entouré à l'Ouest, au Nord et au Nord-Est par un arc presque ininterrompu de cuirasse d'âge probable plio-villafranchien et formant un plateau légèrement incliné vers le Sud.

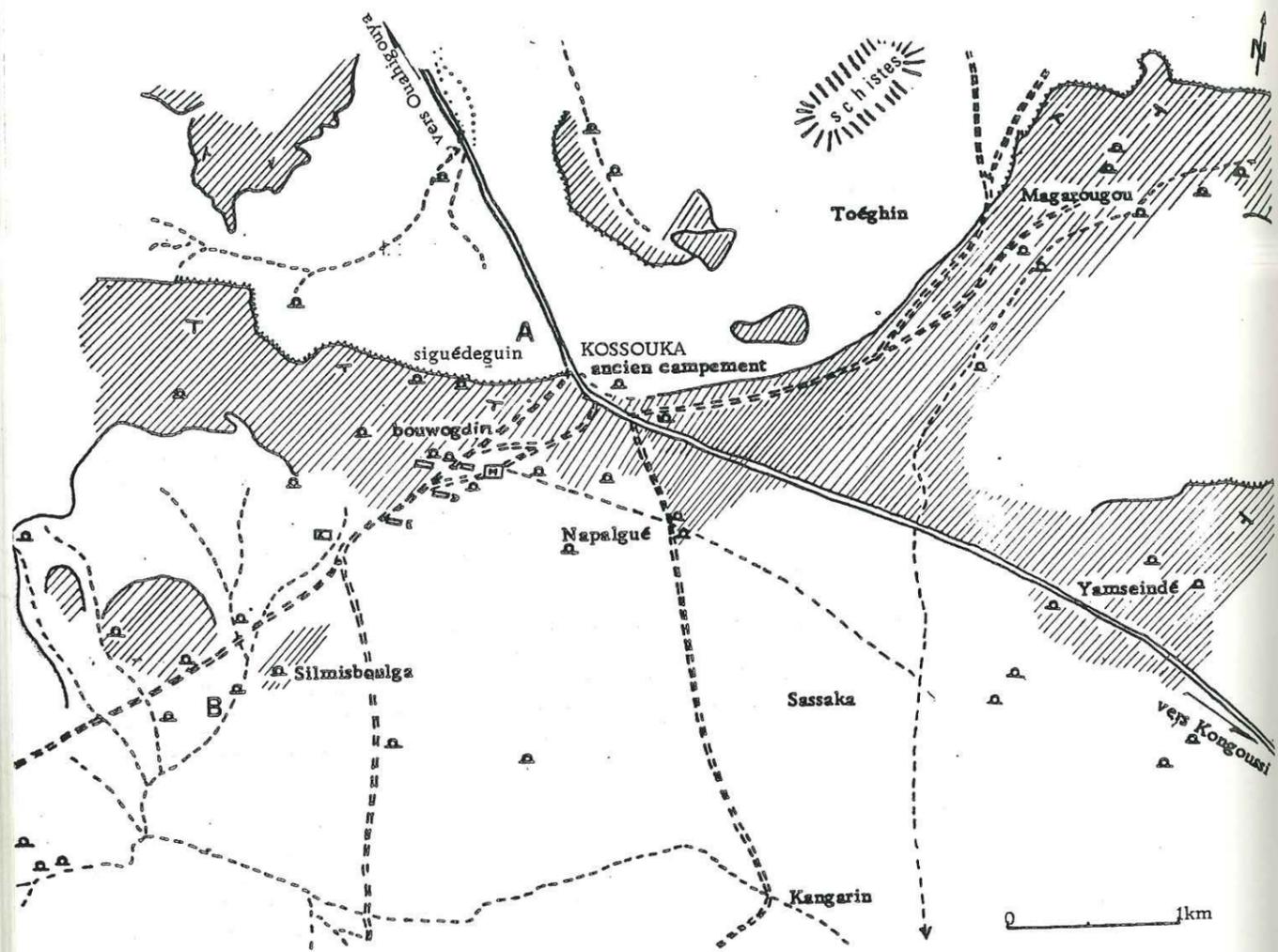
La terminaison sud du plateau est horizontale et vient butter contre un seuil argileux. La présence de ce seuil et l'ondulation propre du plateau piègent tout à la fois les eaux de surface qui donnent lieu à une série de mares qui sont: Yars-Banko, Wassé, Tarkan, Madré en partant du Sud-Ouest vers le Nord-Est, et les eaux d'infiltration qui remontent et noient la base de la cuirasse latéritique. Du point de vue épaisseur de cette dernière, on note que généralement si elle est plus grande sur les schistes et les roches basiques que sur les formations granitiques (BLONT, LE PRUN et PION, 1976), la cuirasse est décapée au niveau des premières formations citées pour ne se conserver que dans la zone de contact schiste - granite. (Fig. 105)

La prospection électrique de cette zone de transition (secteur Dispensaire - Ecole) laisse apparaître un phénomène d'épaississement de la cuirasse au contact schiste - granite et une remontée du bed-rock granitique au niveau de l'école.

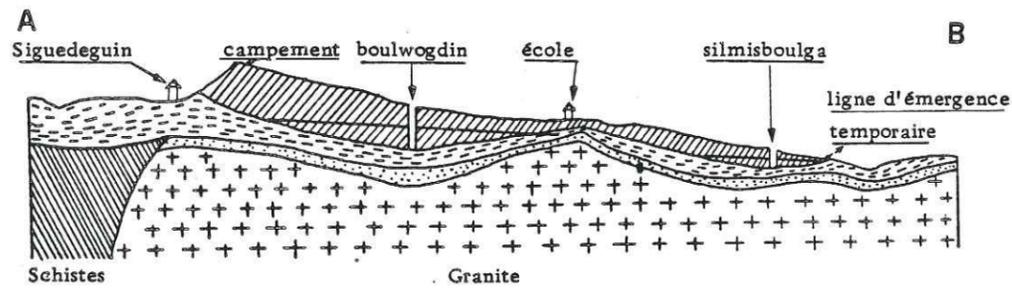
En effet les sondages électriques SE1 et SE2 indiquent une forte épaisseur de cuirasse (19 mètres au SE1) dont le caractère noyé se traduit sur la courbe de sondage électrique SE1 par une descente rapide de la première branche du bateau.

Ces deux sondages (SE1 et SE2) indiquent également l'existence d'une grande épaisseur de l'ensemble des altérites surmontant le bed-rock qui remonte au niveau de l'école (SE3, SE4 et SE5). Le granite sain a été atteint à 17 mètres de profondeur au SE4 et à 32 mètres au SE5.

Les nappes de la cuirasse noyée sont exploitées par des puits traditionnels très anciens dont des puits dogon et des puits modernes. On remarque que les puits productifs et pérennes sont tous situés à proximité et en aval des mares de piégeage des eaux de surface déjà citées. Il s'établit ainsi des couples mares - puits traditionnels suivants: Yars'banko - Iki' Boulga; Wassé - Boulwogdin; Tarkan - Puits O.R.D.; Madré - Handoungou (Magarougou). Au niveau de Wassé - Boulwogdin des débits de 3 m³/h ont été atteints en forage de reconnaissance par l'atelier du BU.VO.G.MI. en 1981.



a) DISPOSITION DES PLATEAUX DE CUIRASSE LATÉRITIQUE DE KOSSOUKA



b) LES NAPPES DE CUIRASSE NOYÉE DE KOSSOUKA ET DE SES ENVIRONS

Figure 105

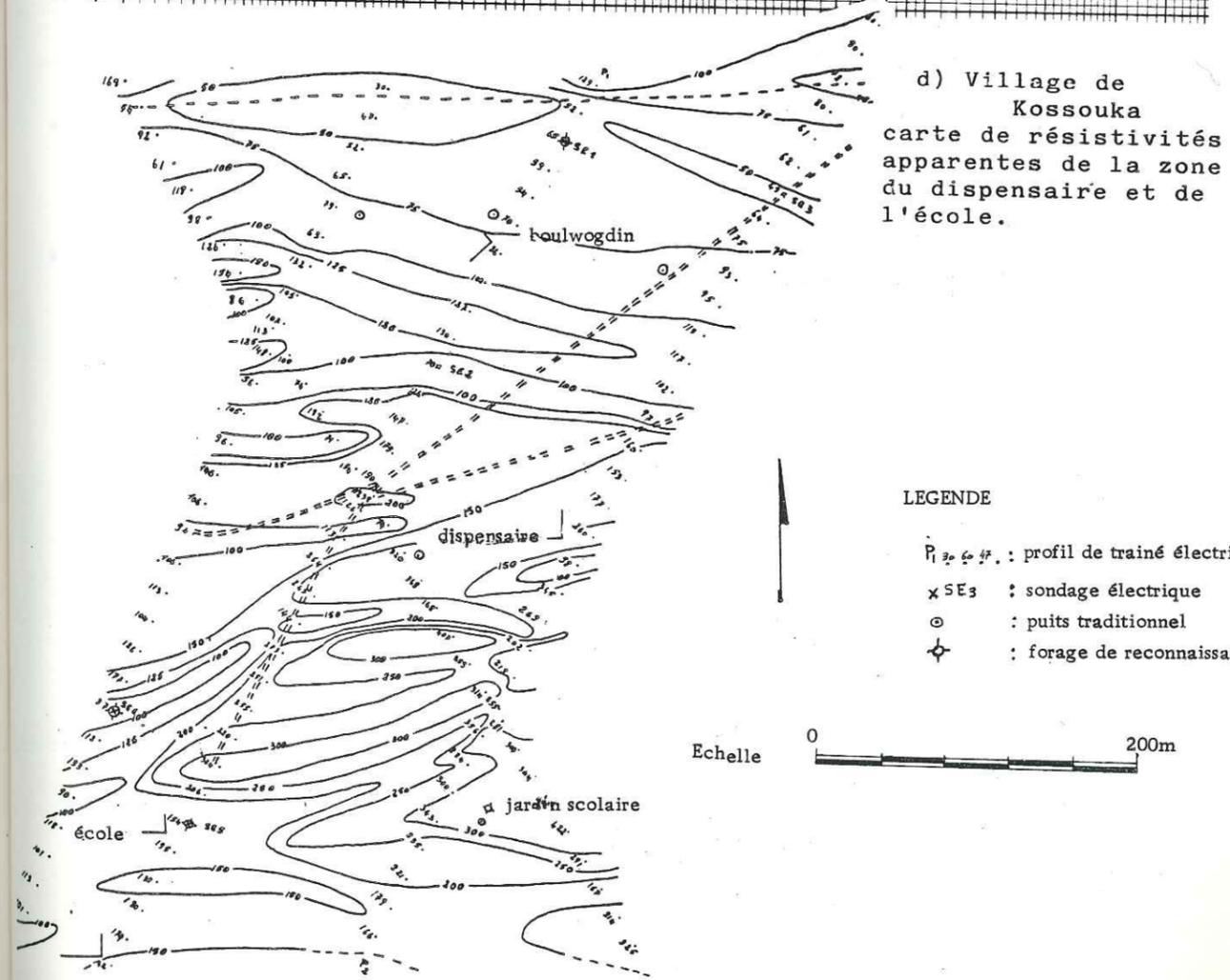
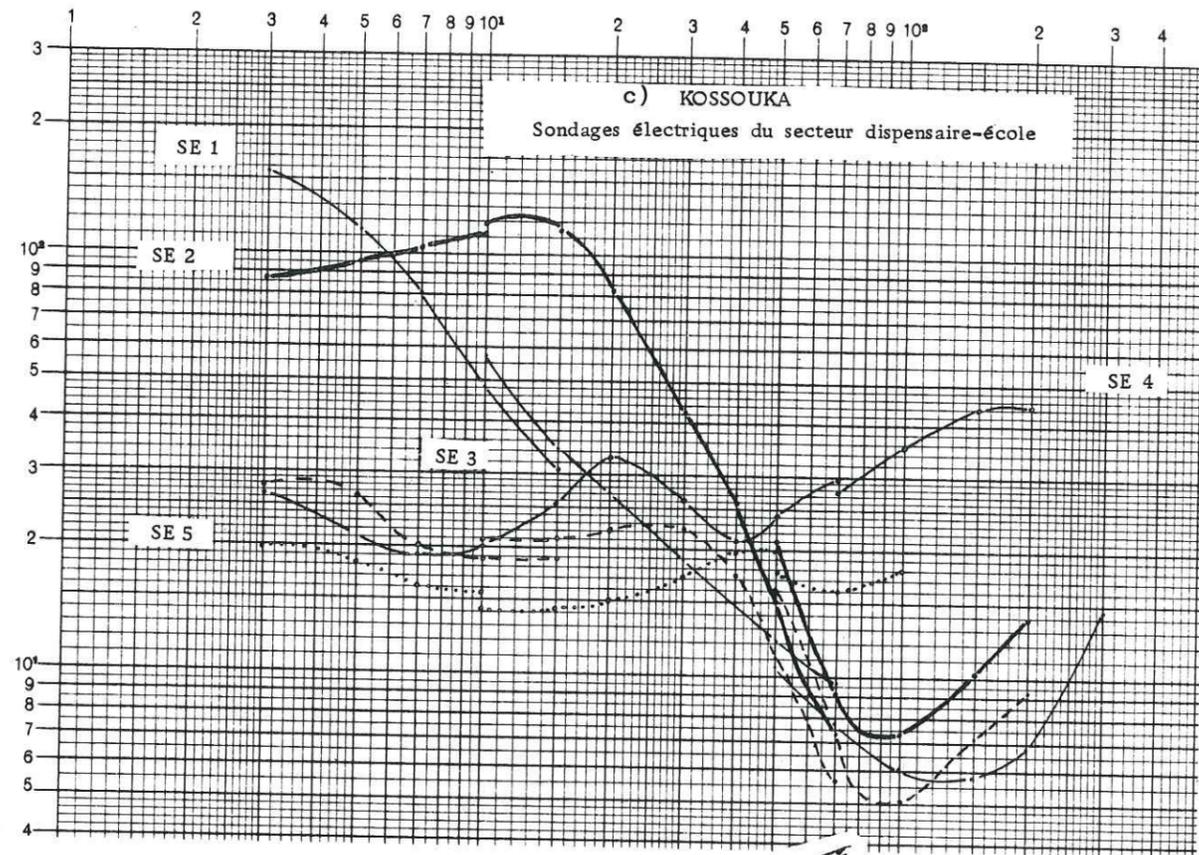
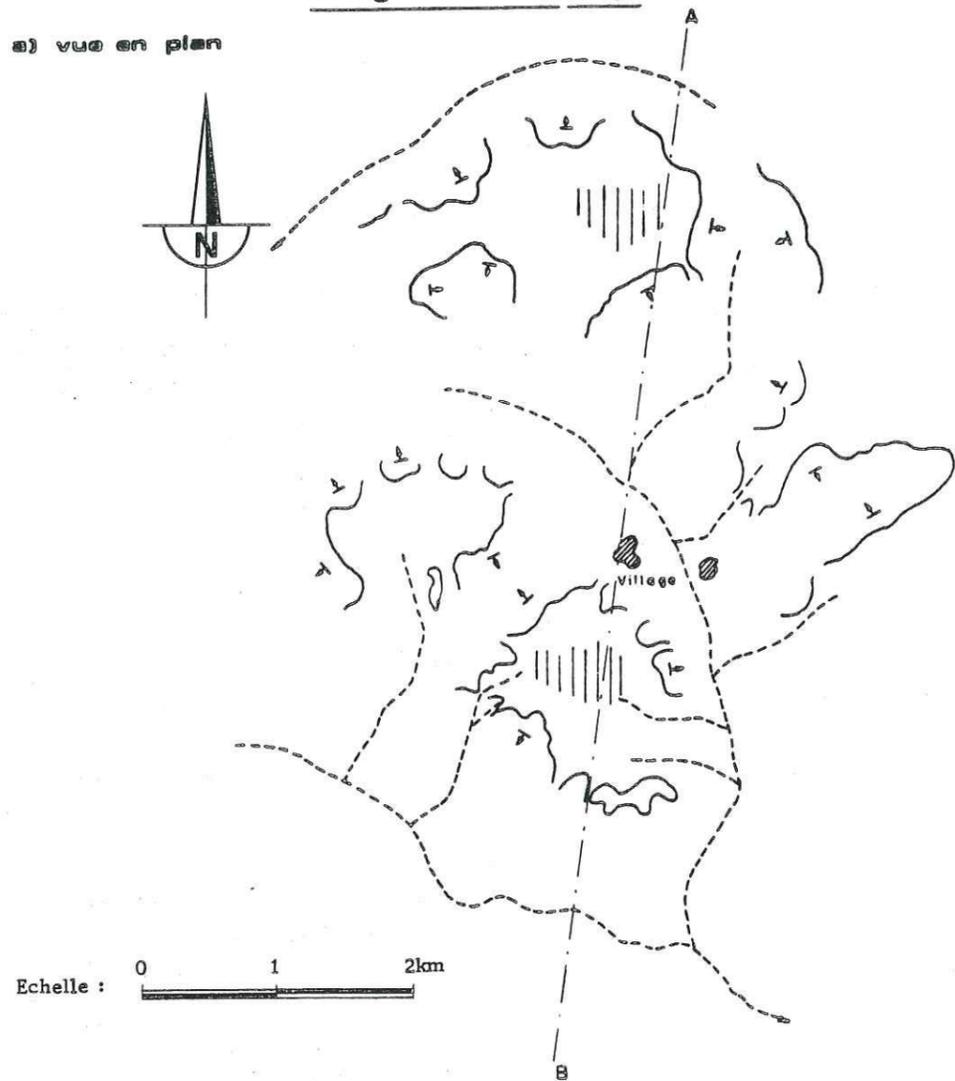


Figure 105 c et d

Le massif schisteux birrimien et les dômes éventrés

Village de Boulounga (BUR.GE.AP., 1975)

a) vue en plan



Echelle : 0 1 2km

b) coupe AB

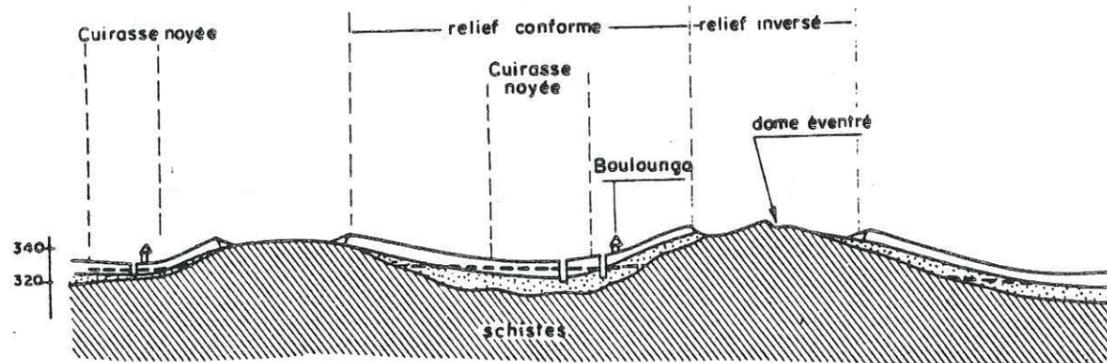


Figure 106

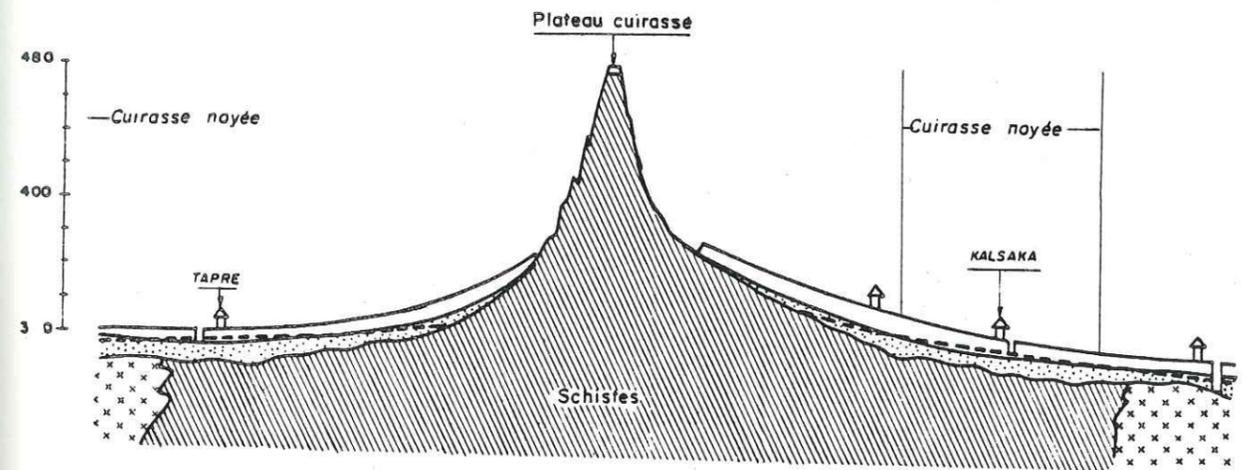
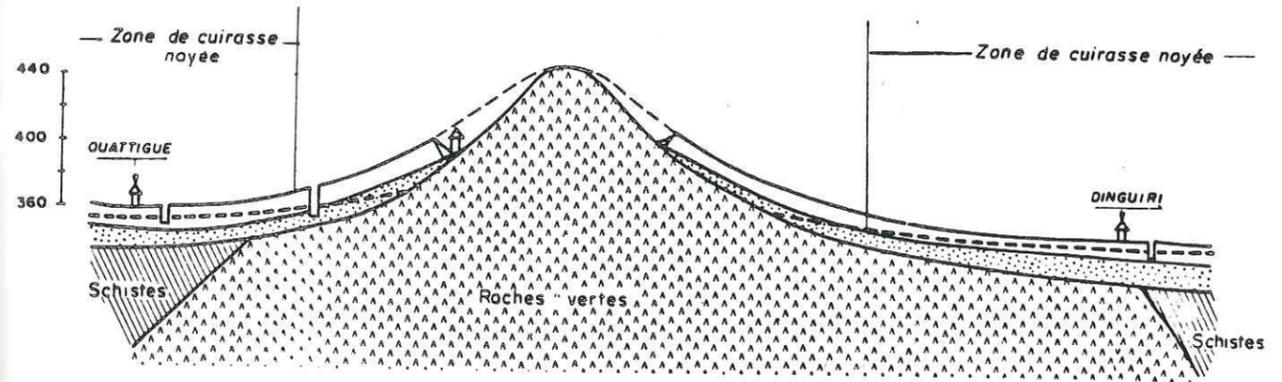


FIG. 107 : GEOMORPHOLOGIE ET NAPPES DE CUIRASSE NOYEE DE OUATTIGUE ET DE KALSAKA (BUR. GE. AP., 1975)

En aval et au Sud de l'école, la cuirasse qui s'installe sur le granite batholitique exclusivement devient peu épaisse (3 à 8 mètres) et plus ou moins discontinue. Néanmoins, elle devient noyée dans le secteur de Silmisboulga, où elle vient butter sur une ligne d'altérites et de colluvions argileuses et peu indurées.

En période de bonne pluviométrie, les eaux infiltrées dans la cuirasse donnent naissance à des émergences le long de la ligne de contact cuirasse - argiles imperméables. Ces émergences sont temporaires et s'arrêtent de couler dès que les précipitations s'amenuisent vers fin septembre.

Une des conséquences de ces circulations d'eau vers la ligne d'émergence ou vers les points bas de la cuirasse est le lessivage puis l'élargissement des fissures de la cuirasse et de l'horizon des argiles à canaux sous-jacentes, au point de donner ainsi lieu à la naissance et au développement de véritables cavités sous ou intralâtéritiques. Ces sortes de karsts ont été rencontrés à Kossouka lors du fonçage du puits "du Chef" et de la réalisation du forage de l'Ecole. Dans ce dernier cas, les pertes de pression d'air puis de boue ont été telles qu'on a dû arrêter la foration.

Les sites de Boulounga, de Kalsaka et de Ouatigué

Ils sont tous situés dans le Yatenga.

La morphologie des environs de Boulounga offre un exemple de nappe de cuirasse noyée pincée entre des dômes éventrés de schistes des sillons éburnéens (Fig.106).

Les sites de Kalsaka et de Ouatigué montrent comme c'était le cas pour Kossouka que c'est préférentiellement dans les zones de transition pétrographique, ici schistes - granites et schistes - roches vertes que les cuirasses noyées sont les plus importantes (Fig.107).

Les émergences des cuirasses de bordure des marigots

Quelquefois, les cuirasses de bordure des marigots, lorsqu'elles surplombent bien ces derniers coulant sur des altérites argileuses, donnent naissance à des émergences temporaires actives quelques heures après les fortes averses des mois de Juillet et d'Août. Une émergence de ce type peut être observée à Léo en rive droite du ravin que barre la digue de la retenue d'eau à l'Ouest de cette ville, et sur le bas-côté sud de la piste Léo - Nadiou.

CONCLUSION

Nous avons traité le problème des nappes superficielles en parlant surtout de celles des cuirasses noyées qui sont les plus productives. Le mode d'alimentation saisonnier de ces nappes, mais surtout la faible profondeur de leur niveau piézométrique les exposent à une reprise évapotranspiratoire importante les amenant à être trop tributaires du régime interannuel des précipitations. Une des conséquences de ces caractéristiques est le dénoiement quasi-généralisé de la base des cuirasses latéritiques au cours de ces dernières années de sécheresse. La nappe rabattue alors par des prélèvements, non compensés par les infiltrations, jusqu'aux argiles bariolées, a vu sa productivité baisser de manière quelquefois catastrophique.

Ainsi, des sites naguère verdoyants comme Kalsaka où l'eau de la cuirasse noyée permettait d'entretenir d'importants vergers connurent des problèmes d'eau. Un peu partout des approfondissements des puits existants ont été entrepris sans pour autant résoudre le problème de la productivité hydraulique des ouvrages, puisque les nouvelles colonnes du captage restaient dans les argiles bariolées ou dans les arènes fluentes.

Le fonçage jusqu'à la roche fissurée dans les zones à altérites épaisses et bouillantes étant techniquement difficile à réaliser et d'un coût élevé, le puits parfait n'est presque jamais réalisé, alors qu'il reste l'unique solution pour assurer aux puits des débits importants et permanents.

Comme on le voit, la seule solution qui permette de s'affranchir plus du rythme des précipitations et de garantir aux ouvrages un niveau élevé de productivité hydraulique consiste en un captage des horizons inférieurs du profil d'altération, c'est à dire arène et roche fissurée qui sont alors du domaine de la nappe profonde.

4.2.2. La nappe des alluvions

Le lit mineur des marigots, du fait des faibles pentes observables au niveau des versants, connaît en certains points un comblement alluvial. Ces alluvions argilo-sableuses lorsqu'elles sont épaisses de 5 à 10 mètres constituent des aquifères d'extension réduite. Les nappes qu'on y rencontre ont parfois fourni des débits appréciables qui ont souvent justifié leur exploitation à l'aide de puisards: trou de petit diamètre (80 cm à 1 mètre) descendant à peine à 10 mètres. Ces ouvrages aux parois non soutenues dans des formations très bouillantes sont chaque fois abandonnés et comblés pendant la saison des pluies.

L'exploitation de la nappe reprend souvent en recreusant un nouveau trou à proximité de ceux comblés par éboulement.

4.2.3. Les nappes profondes

Contrairement aux nappes superficielles, elles doivent leur existence et leur importance au modelé du bedrock lui-même, lié au réseau de fractures dont la densité se révèle être très grande. Or cette morphologie profonde, nous ne la connaissons que de manière souvent indirecte, grâce surtout à la prospection géophysique. En effet, même si les sondages mécaniques atteignent le substratum sain, leur nombre restera toujours inférieur au minimum exigible pour une connaissance fine de l'allure du bedrock.

La mise à la disposition récente des hydrogéologues par le centre de télédétection de Ouagadougou d'images de satellites est venue compléter les documents nécessaires à des études régionales et locales. Mais c'est la prospection géophysique et plus particulièrement la méthode électrique des résistivités, qui grâce aux cartes de résistivités apparentes tirées des profils de traînées rend le mieux compte de l'état déchiqueté et vallonné du substratum et permet par voie de conséquence de comprendre le mode de gisement et d'alimentation des nappes profondes (Fig.108).

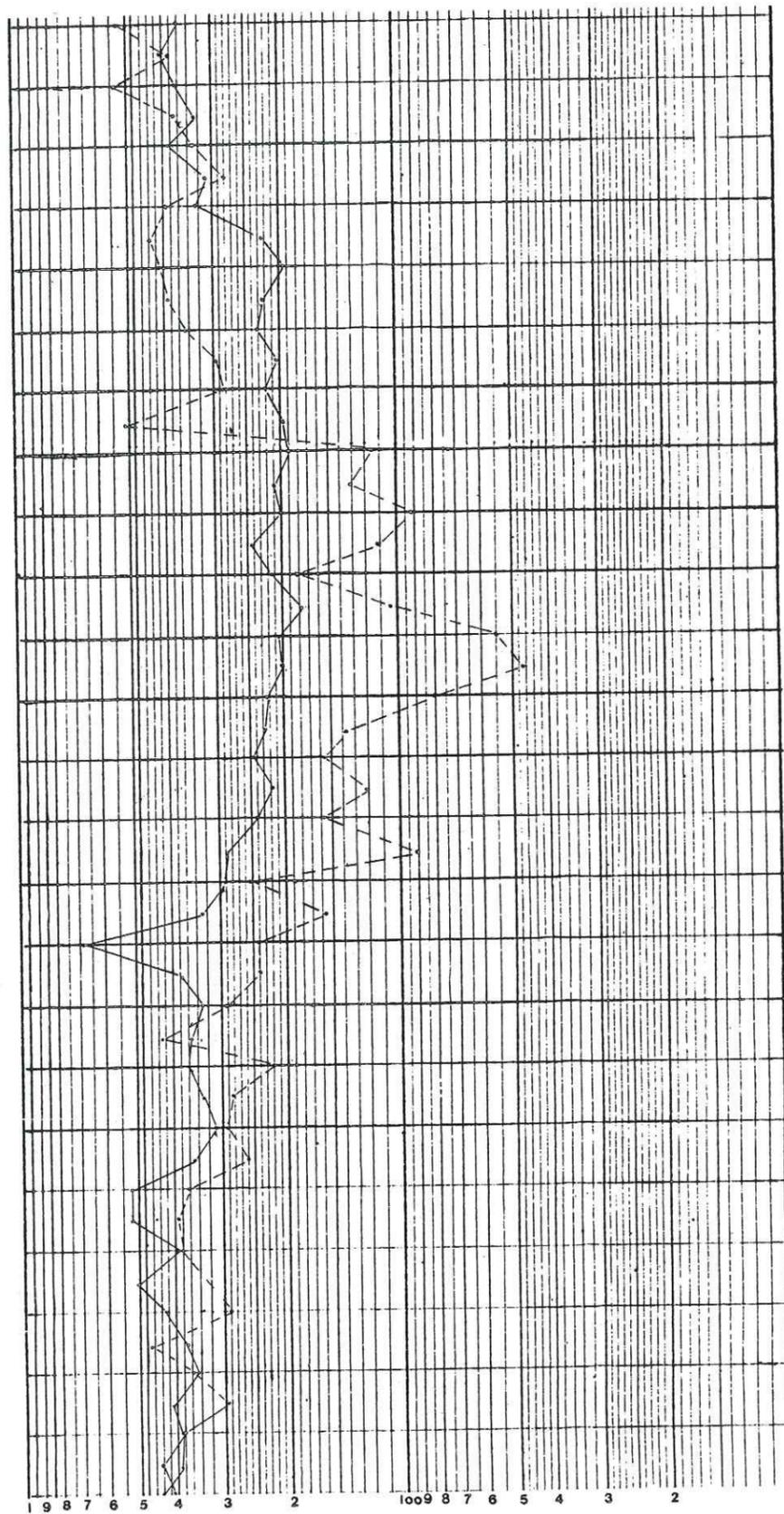


Figure 108 : Ranch de Léo: profils de trainés électriques de la zone 5.

Il suffit de revenir sur les méthodes géophysiques étudiées et de prendre les exemples des zones 4 et 5 du ranch de Léo pour illustrer la morphologie du substratum cristallin de Haute-Volta (Fig. 109 et 110).

Les exemples des profils de trainé électrique P1 et P3 de la zone 5 du ranch de Léo montrent la variation de la profondeur du toit du bed-rock.

Nous avons reporté sur la carte de résistivités apparentes de la zone 4, les linéaments vus sur les photos aériennes et que devrait mettre en évidence la prospection géophysique. On constate, lorsqu'on compare le réseau de linéaments à celui des axes d'anomalies conductrices, qu'il y a une bonne corrélation d'ensemble entre les deux réseaux, mais que dans le détail quelques différences existent. La petite échelle de levé des linéaments (1/50 000) par rapport à celle de la carte de résistivités apparentes (1/4000) est bien sûr à l'origine de ces distorsions. La prospection géophysique sert à confirmer, mais aussi à affiner les données de la photo-interprétation.

L'interprétation hydrogéologique de la carte de résistivités apparentes de la zone 4 du ranch indique que les zones broyées liées aux failles et constituant les nappes ne sont pas continues et jointives. C'est pourquoi au terme nappes beaucoup d'auteurs ont préféré celui de poche d'eau. Ces poches sont séparées les unes des autres par des seuils plus ou moins importants.

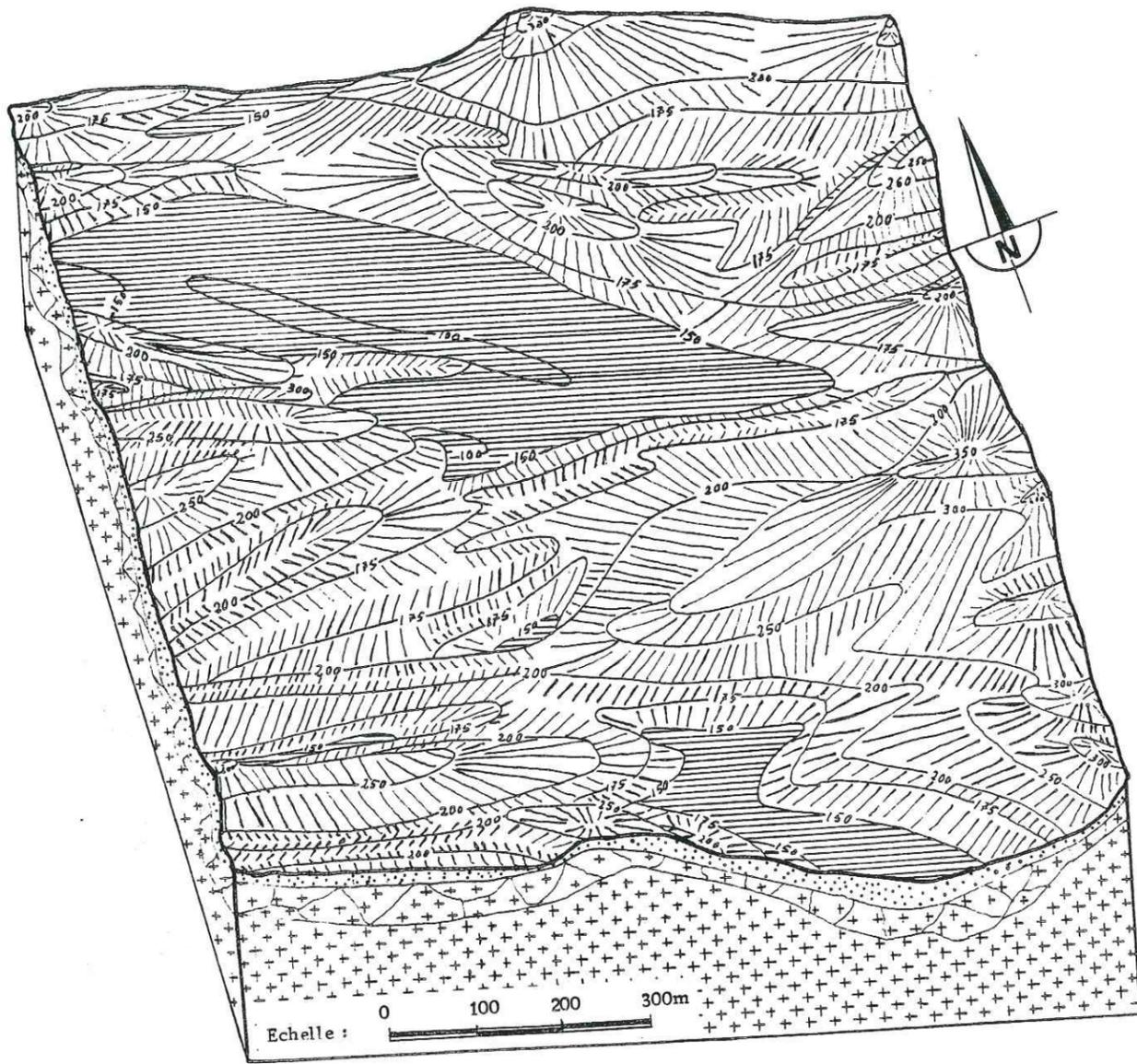
Aux hautes eaux, les seuils sont noyés, et permettent l'intercommunication des poches et leur réalimentation par des circulations d'eau s'effectuant horizontalement, et à travers les arènes et le bed-rock fissuré. Nous pouvons visualiser le relief du bed-rock en assimilant les courbes d'équirésistivités apparentes à des isohypses. Cette représentation en bloc diagramme rend plus compte du caractère vallonné du toit du substratum de la zone 4 qui est bien comparable à celui de la zone 5 déjà étudiée.

Nous avons vu que le suivi de la nappe de la zone 5 du ranch indiquait une absence de tritium dans ses eaux en 1975, puis en 1978. Ceci s'accompagne d'une baisse progressive et constante du niveau piézométrique qui passa de 16 à 20 mètres de profondeur. C'est dire donc que cette nappe, contrairement aux cas généraux observés où les nappes subissent des fluctuations saisonnières de niveau, connaît une alimentation précaire.

Le fait que nous ayons pu mesurer 6 UT tritium en 1980 dans les eaux de cette nappe est en rapport avec la pluviométrie excédentaire qu'a connue Léo en 1979 (1210 mm contre 625 mm en 1978). Ceci indique que l'alimentation de la nappe ne se fait pas par des apports directs per descensum, mais plutôt grâce à des circulations latérales d'eau arrivant surtout à travers la roche fissurée. Nous avons donc ici une parfaite illustration du phénomène de discontinuité des poches d'eau séparées par des seuils comme nous l'avons évoqué pour la zone 4.

Il est aisé de voir que, suite aux prélèvements par évapotranspiration qui surviennent en saison sèche, il y a émergence des seuils à la suite de laquelle chaque poche évolue en fonction de ses caractéristiques hydrogéologiques propres et indépendamment des autres nappes voisines.

Si nous reconsidérons les conditions pluviométriques dans lesquelles la nappe de la zone 5 a reçu des apports par débordement (1200 mm de précipitation), on voit qu'une telle poche se serait asséchée dans les régions septentrionales de la Haute-Volta où les hauteurs annuelles de pluie n'atteignent



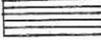
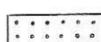
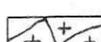
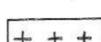
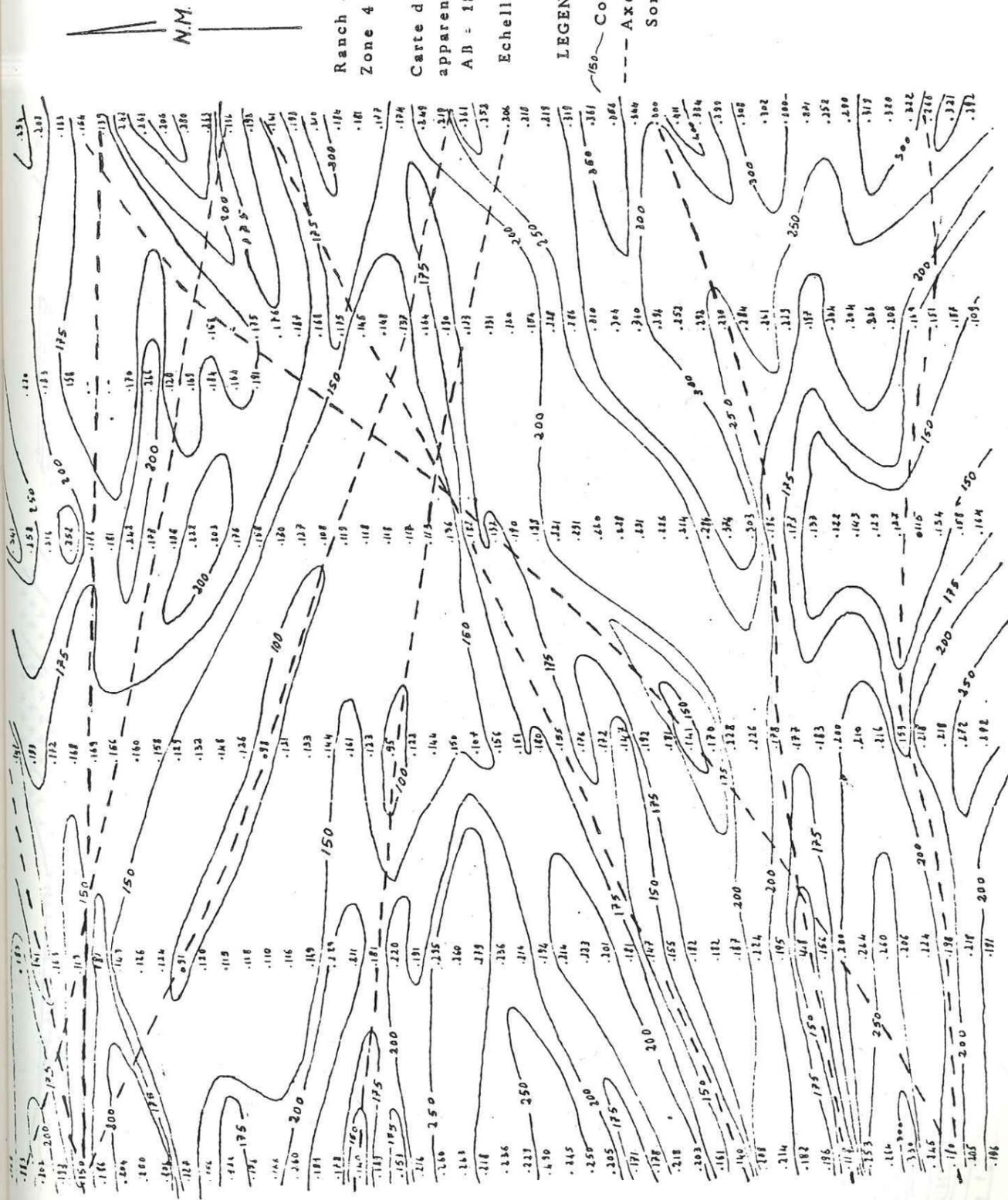
-  Zones broyées aquifères
-  Seuils séparant les sillons aquifères
-  Arène granitique
-  Roche fissurée
-  Substratum sain

FIG. 109 : MORPHOLOGIE DU SUBSTRATUM ET NAPPES ASSOCIEES DU RANCH DE LEO ZONE 4



Ranch de Léo
Zone 4

Carte de résistivités
apparentes
AB = 180m MN = 20m

Echelle 1/5000

LEGENDE

— Courbe d'isoresistivité
--- Axe conducteur
Sondage électrique

RANCH DE LEO ZONE 4

Carte de RESISTIVITE
apparentes simplifiée

Echelle: 1/5000

Substratum subaffleurant

FRactures vues sur photos aériennes et recherchées par prospection géophysique : leur réseau doit être comparé à celui des axes conducteurs de la carte de résistivités apparentes.

Altérites peu épaisses

Altérites épaisses et noyées en toutes saisons



Figure 110b

jamais 1000 mm. Et c'est bien cette situation d'épuisement par non réalimentation de poches isolées qui explique plusieurs échecs que nous avons rencontrés dans les formations cristallines en implantant sur certaines petites fractures repérées sur photos-aériennes et confirmées par la géophysique et qui se sont avérées sèches. Au niveau des grandes fractures (multikilométriques) par contre, la zone altérée qui les accompagne est plus étendue et plus profonde. Deux caractéristiques qui doivent permettre une meilleure intercommunication des nappes liées à cette famille de fractures. La grande longueur est également un facteur qui accroît la possibilité des nappes liées aux mégafactures de se réalimenter en traversant un ou plusieurs bas-fonds au niveau desquels l'inversion de relief crée des zones d'infiltration préférentielles.

L'importance des circulations latérales des eaux en partance des zones d'infiltration se traduit par un phénomène fréquent de semi-captivité de la nappe profonde sous les argiles. Dans de nombreux cas, en effet, après avoir franchi la nappe superficielle (quand elle existe), on traverse des argiles sèches ou humides, mais non saturées avant d'atteindre le toit de la nappe des arènes et de la roche fissurée dont le niveau peut alors remonter de plus de 10 mètres. Ce phénomène de semi-captivité montre bien que la nappe au droit du forage qui l'atteint ne reçoit pas d'alimentation per descensum.

L'eau arrive latéralement et se met en charge sous les argiles. Parmi les très nombreux cas de semi-captivité rencontrés, nous citerons seulement ceux de Pouni et de Léo (Diasso).

Au cours du fonçage d'un sondage de reconnaissance "calweld" que nous avons fait réaliser dans le périmètre de l'I.S.P.O. à Gampéla (village situé à 25 km de Ouagadougou, sur l'axe Ouagadougou-Lomé), nous avons noté que la nappe qui était semi-captive donnait des venues d'eau situées à trois mètres au-dessus de son toit imperméable, et ce à la faveur de filonnets de quartz et de pegmatites emballés dans une matrice argileuse non saturée. Cet exemple de forage réalisé rapidement sans boue, ni air comprimé a permis de bien connaître l'état d'humidité des horizons du profil d'altération au-dessus du toit de la nappe. Il montre bien que ce n'est pas comme on a pu le penser, la pression d'air des marteaux fond-de-trou qui annule les venues d'eau dans les argiles au sommet de la nappe, mais le fait que ces argiles sont non saturées et constituent un toit imperméable pour la nappe.

4.2.3.1. Les facteurs de productivité des nappes profondes

Un fait remarquable, lorsqu'on s'intéresse à l'hydrogéologie des formations cristallines, c'est la variabilité souvent imprévisible de la productivité hydraulique qu'on peut rencontrer dans un secteur géologique donné, voire dans l'axe d'une même fracture affectant le même faciès pétrographique. C'est dire que, quel que soit le faciès, l'anisotropie hydraulique est de règle. Il est néanmoins possible de dégager des facteurs généraux qui guident la productivité des ouvrages. Ce sont:

- L'importance de la fracture; la productivité d'un ouvrage varie en fonction du pouvoir drainant du couloir broyé induit par la fracture. L'important c'est l'ouverture de la fracture qui est elle-même fonction de la longueur de celle-ci, bien que cette règle souffre d'exceptions (ENGALÉNC, 1979), car les fractures longitudinales sont longues, mais fermées, tandis que les fractures transversales dans les roches massives, sont courtes mais largement ouvertes. Il en est de même des diaclases

qui leur sont associées. Selon ENGALENC: " Le débit d'une fracture est fonction du cube de la largeur de la fracture. Pour un massif de porosité donnée, une fracture équivalente de longueur kilométrique peut transiter un débit 400 fois plus élevé que pour un maillage hectométrique, 4×10^4 fois plus que pour une maille décimétrique, et 4×10^6 fois plus que pour un maillage métrique".

- L'association (intersection) de plusieurs fractures kilométriques ou hectométriques doit être un facteur favorable dans la mesure où elle accroît la probabilité d'avoir, parmi les accidents sollicités, des fractures correspondant à des directions selon lesquelles elles sont ouvertes.

- Les filons et les dykes: quel que soit le faciès pétrographique qu'ils traversent, ont un rôle de drainage toujours plus élevé que les fractures non injectées. Leur recherche devient impérative dans les régions occupées par les batholites de granite ou par des granites migmatitiques homogènes, dès lors qu'on y souhaite obtenir des débits supérieurs à 5 m³/h.

- Les faciès pétrographiques; les débits moyens et aussi les débits les plus élevés rencontrés dans les différentes formations du socle cristallin permettent de dégager du point de vue probabilité la hiérarchie suivante:

- filons de quartz et de pegmatites;
- migmatites gneissiques hétérogènes à structure planaire;
- roches basiques intrusives fissurées (dolérites, diorites, amphibolites, volcano-sédimentaires des sillons éburnéens) avec quelquefois le risque de voir le colmatage argileux de leurs altérites en faire chuter la productivité;
- les granites migmatitiques homogènes, les batholites granitiques.

On retient que l'homogénéité granitique est un facteur hydrogéologique défavorable.

4.2.32. Productivité et caractéristiques hydrodynamiques des aquifères: les essais de pompage

Ecoulement de l'eau en milieu fissuré

Plusieurs auteurs, dont C. LOUIS (1968), P. JOUANA, C. RAYNEAU, B. CROSNIER (1970 à 1974), se sont penchés sur les problèmes de l'écoulement de l'eau en milieu fissuré. Toutes les études en soulignent la complexité. Ce n'est que lorsque la géométrie de la fissuration est simple qu'on peut appliquer au milieu une description faisant intervenir des paramètres comme l'épaisseur, l'équidistance, la rugosité des parois.

Nous avons affaire en Haute-Volta à des formations cristallines ayant subi plusieurs sollicitations tectoniques desquelles résulte une fissuration aux directions multiples, à géométrie complexe et à densité variable d'un massif à l'autre. De plus, chaque fissure, même prise isolément, va être plus ou moins rugueuse, plus ou moins ondulée, avec des étranglements et des élargissements qui viennent combler des matériaux à granulométrie variée. Il faut ajouter dans nos régions d'étude, à cet aspect déjà complexe du milieu fissuré, les variations de faciès (passées pegmatitiques et injections de filons de dolérites ou d'amphibolites).

Considérer les milieux fissurés qui nous intéressent comme un matériau homogène, mais anisotrope c'est déjà faire une simplification importante; l'introduction de la notion d'isotropie en est une extrême. La perméabilité dans une même fracture peut varier d'un niveau à un autre, et l'on remarque souvent une fermeture progressive de toutes les fractures avec la profondeur entraînant ainsi une baisse de productivité de haut en bas. Selon C. LOUIS (1975): "les conductibilités hydrauliques à grande échelle diminuent lorsque la profondeur croît. C'est un phénomène que l'on observe sur tous les sites". En Haute-Volta comme sous tous les climats tropicaux, le bed-rock est recouvert presque partout par des altérites. L'épaisseur de la zone décomprimée du bedrock varie en sens inverse de celle des altérites sus-jacentes (fig. 116) puisque ces dernières dérivent de la décomposition d'une partie de la frange décomprimée.

L'écoulement des eaux souterraines vers les ouvrages de captage est lié aux caractéristiques du milieu fissuré. Comme ce dernier, il va donc être diversifié (écoulement de fissure, de matrice, laminaire, turbulent...). On peut le voir en examinant les données des essais de pompage disponibles.

Les essais de pompage

- Les forages villageois: la plupart des forages que nous avons implantés étant destinés à l'alimentation en eau de villages avec pour moyens d'exhaure des pompes manuelles, ils n'ont pas fait l'objet de pompages d'essai. Leur équipement intervient après une estimation du débit au cours de la foration qui permet de décider de l'abandon du sondage de reconnaissance ou de la pose d'un tubage définitif, partiellement crépiné, qui le transforme en forage d'exploitation. L'installation de la pompe fait suite à un développement plus ou moins long à l'air-lift qui nettoie le forage et précise son débit. Ce dernier fourni par cette méthode étant souvent voisin de celui qu'on obtient à partir des vrais pompages d'essai (fig. 112), ceux-ci ne sont pas réalisés en raison des coûts supplémentaires qu'ils impliqueraient.

Au Ghana, c'est le compresseur de l'atelier de forage qui assure, après la réalisation du sondage, le développement de l'ouvrage pendant trois à quatre heures de temps. Là-bas la foration peut même être interrompue avant

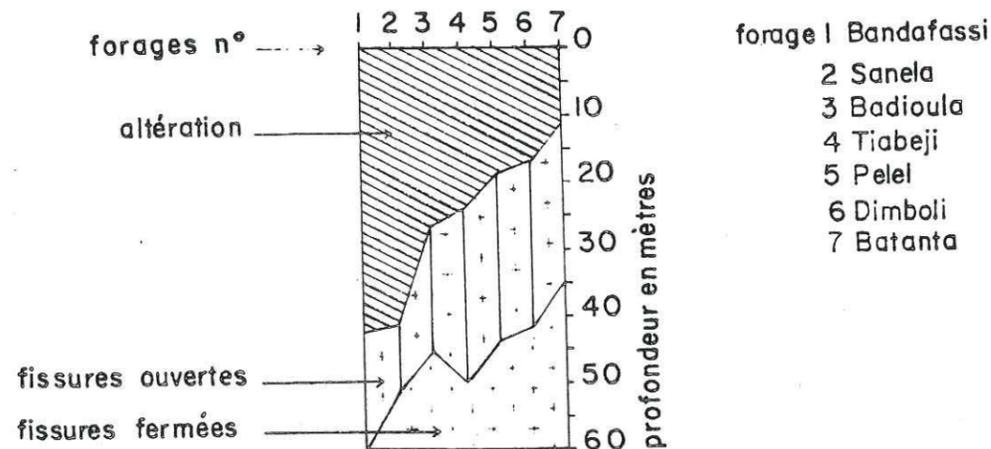
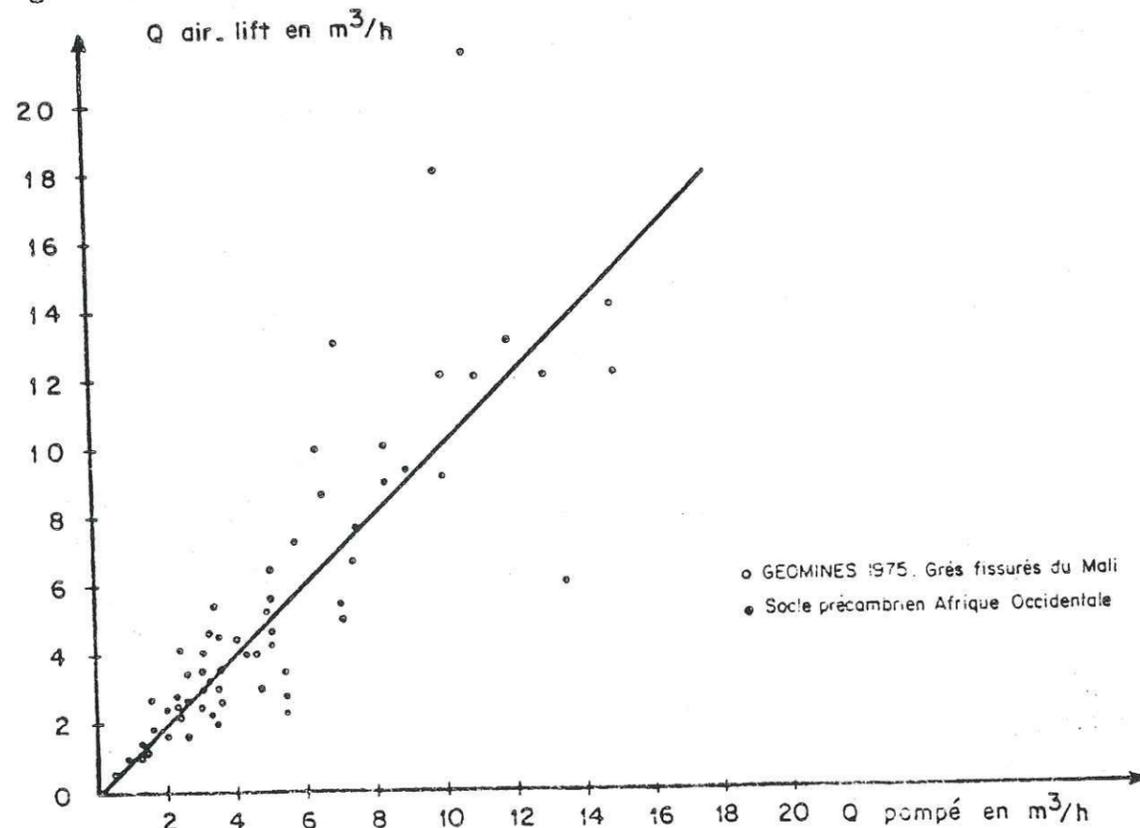


Fig. 111 - l'épaisseur de la zone décomprimée (fissures ouvertes) varie en sens inverse de l'épaisseur de la couverture altérée (d'après les données de "Captage des eaux souterraines dans la zone dite de socle du Sénégal Oriental" Dir. Hydraulique du Sénégal CATEES 1977)

COMPARAISON DES DEBITS ISSUS D'ESSAIS A L'AIR - LIFT ET AVEC UNE POMPE

Figure 112



le substratum fissuré, dès lors qu'on estime que les débits sont largement supérieurs aux capacités d'exhaure de la pompe manuelle à installer.

- Les forages à débits importants: quand les débits demandés aux ouvrages de captage sont élevés (supérieurs à 5 m³/h), et c'est le cas quand ils sont destinés aux adductions d'eau des petites villes ou des marchés à bétail par exemple, on s'assure du niveau exact des débits d'exploitation en effectuant des essais de pompage. Ainsi, nous disposons des essais de pompage, des études hydrogéologiques du ranch d'embouche de Léo (SAVADOGO, 1975) et de ceux des forages de l'adduction d'eau de la ville de Pô ("Adduction d'eau de 9 centres secondaires"). Le C.I.E.H. a réalisé au titre d'une étude sur les eaux souterraines dans les formations cristallines de l'Afrique de l'Ouest deux pompages d'essai sur les sites A.V.V. de Mogtédou et de Zigla en Haute-Volta (C.I.E.H. - ENGALENC-GRILLOT-LACHAUD, 1979). Nous en faisons expressément mention, car c'est jusqu'ici la seule étude où l'on a réalisé dans notre pays l'installation de piézomètres dans le seul but de suivre l'évolution de la nappe des altérites des formations cristallines, afin d'en connaître les caractéristiques hydrodynamiques à l'aide de pompages d'essai.

- Du point de vue interprétation, on a bien souvent eu recours aux courbes de remontée pour calculer la transmissivité T en appliquant la formule de THEIS. C'est ce que nous avons fait en 1975 pour les essais de pompage au ranch de Léo où on ne disposait pas de piézomètres.

L'application de la formule de THEIS et de JACOB suppose qu'on admette les hypothèses et les conditions aux limites suivantes:

- terrain homogène et isotrope;
- nappe horizontale et d'épaisseur constante;
- nappe infinie et non réalimentée;
- la nappe est repos avant l'essai de pompage.

Or à l'analyse des données sur l'aquifère et sa nappe, on voit que plusieurs de ces conditions ne sont pas remplies. Dans les cas que nous étudions:

- le terrain ou plus exactement les couches aquifères ne sont pas homogènes ni isotropes dans la plupart des cas (exemple de la zone 5 du ranch de Léo et du forage de Pô - adduction d'eau);
- la nappe est généralement une poche dont les études géophysiques permettent de préciser les contours. Elle n'est donc pas d'extension infinie.

Au niveau des zones 1, 3, 4 et 6 du ranch de Léo, les résultats des essais de pompage permettent d'obtenir des droites caractéristiques comme graphes $H = f(Q)$ avec:

$$H = \text{rabattement}$$

$$Q = \text{débit en m}^3/\text{h}$$

Il s'agit là de forages à débits faibles ou moyens pour les formations qui les fournissent. Ils exploitent des arènes plus ou moins argileuses dont la conductibilité hydraulique varie peu entre le sommet et la base de l'aquifère capté (Fig. 112).

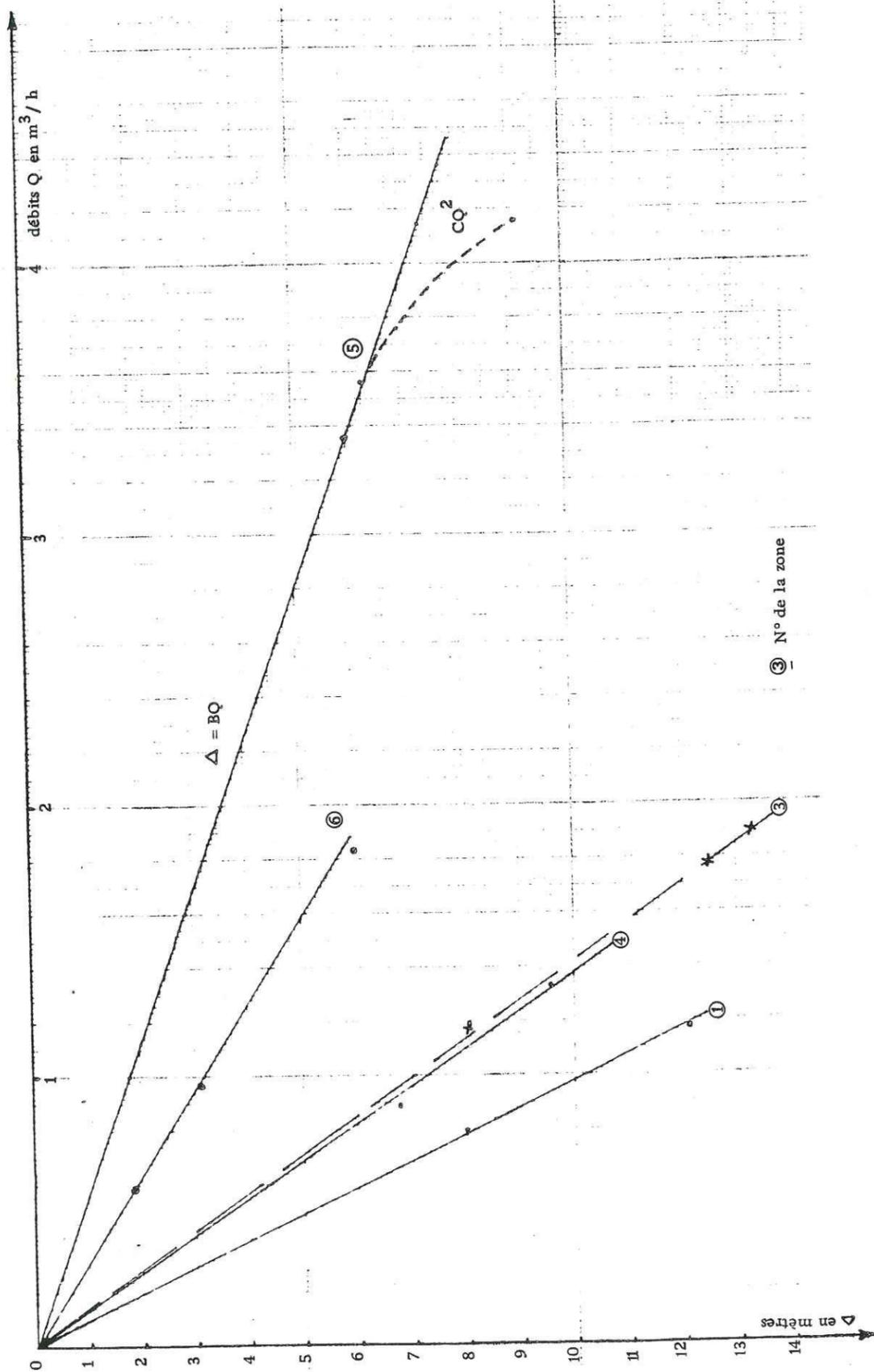
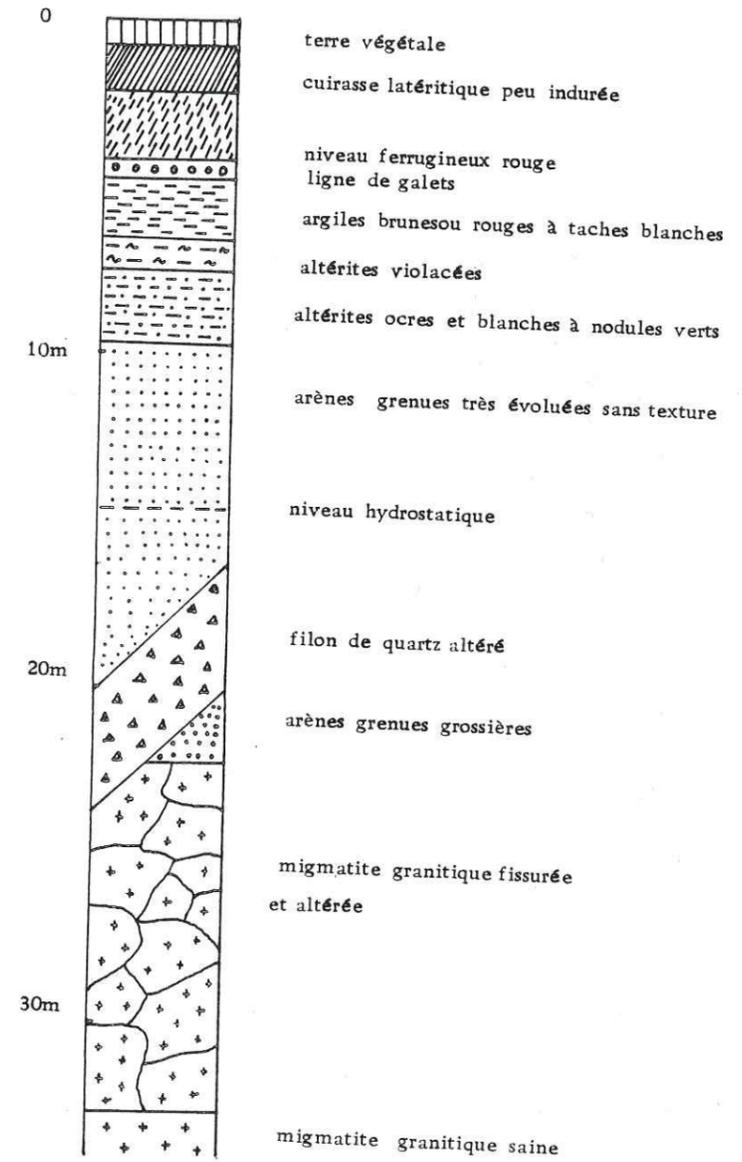


Figure 113 : Ranch de Léo : courbes caractéristiques des essais de pompage.

FIG. 116d : RANCH DE LEO ZONE 5 : COUPE GEOLOGIQUE



On notera que l'atelier employé à l'époque pour leur réalisation ne permettait pas de capter la frange fissurée du bedrock tant qu'elle n'est pas très altérée (zone 5). Les aquifères des zones 1, 3, 4 et 6 présentent donc une certaine homogénéité qui permet d'obtenir des résultats cohérents sur les caractéristiques hydrauliques des ouvrages en appliquant le formule de JACOB:

$$H = BQ + CQ^2 \text{ avec}$$

$$B = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25 T t}{r^2 H}$$

Les courbes $H = f(Q)$, étant des droites pour les quatre premiers forages considérés, on a:

$$C = 0, \text{ d'où aussi } CQ^2 = 0$$

En posant $\frac{H}{Q} = \frac{1}{2\pi T} \log \frac{2,25 T t}{r^2 H}$ et en admettant que $\log \frac{2,25 T t}{r^2 H}$ est voisin de 2π , il vient que $T \neq \frac{Q}{H}$, et il s'en suit

pour les forages des zones 1, 3, 4 et 6 les valeurs suivantes de la transmissivité en posant que $T = \frac{1}{B}$ dans la formule $H = BQ + CQ^2$ (avec $C = 0$):

Zone 1	$T = 0,32$	$\times 10^{-4}$	m^2/s
Zone 3	$T = 0,50$	$\times 10^{-4}$	m^2/s
Zone 4	$T = 0,38$	$\times 10^{-4}$	m^2/s
Zone 6	$T = 0,83$	$\times 10^{-4}$	m^2/s

Nous pouvons également, en nous servant de la courbe de remontée, calculer la transmissivité à partir des graphes $H = f(\log t)$ d'où l'on tire:

$$T = \frac{0,183 Q}{I} \text{ avec } I = \text{pente de la droite de remontée.}$$

On remarque que pour la zone 5 qui est le forage le plus productif du ranch (débit supérieur à 5 m³/h), nous ne pouvons pas utiliser la formule simplifiée précédente. Les débits élevés sont liés à la présence d'un filon de quartz fissuré et altéré dont il est séparé par une mince couche d'arène.

Le graphe $H = f(Q)$ n'est plus une droite puisque le troisième point de coordonnées (Q_3, H_3) s'écarte de la droite que donnent les points des deux premiers essais.

On peut, en posant que $T = 1/B = \frac{Q}{H}$, tirer de la droite correspondant, la transmissivité du premier conducteur hydraulique que constitue le filon de quartz.

$$\text{soit } T_1 = 1,54 \times 10^{-4} \text{ m}^2/s$$

Le troisième point se déduira d'une écriture de la forme:

$$H = B'Q + CQ^2 \text{ avec}$$

$B' \neq B \neq 1/T_1$ si l'on veut avoir

$$C = \frac{H_2/Q_2 - H_1/Q_1}{Q_2 - Q_1} \text{ (BONNET M., 1970)}$$

et

$$T_2 = 1/B' = \frac{Q}{H - CQ^2}$$

Le milieu aquifère est donc ici hétérogène, et ne peut pas être caractérisé par une seule valeur de transmissivité.

Le problème de la détermination des caractéristiques des aquifères les plus productifs qui recèlent toujours dans nos formations de bons niveaux drainants est complexe. En effet, le suivi du déroulement des forations à l'air comprimé montre qu'on a souvent (ce fut entre autre le cas à Zigla, à Mogtêdo et à Pô) affaire à plusieurs venues d'eau brusques correspondant soit à des filons de quartz fissurés, soit à des failles obliques qui viennent gonfler les débits.

Dans certains cas, on peut, en simplifiant, considérer comme étant remplies les conditions que requiert l'application de la formule d'HANTUSH:

- nappe captive;
- frange fissurée du substratum jouant le rôle d'une strate conductrice d'eau privilégiée;
- arènes fluentes ou grenues faisant fonction de couche magasin très capacitive, mais de perméabilité très petite devant celle de la roche fissurée.

C'est cette simplification qu'on a voulu adopter pour essayer de dépouiller les données des essais de pompage de Zigla et de Mogtêdo (ENGALENC C.I.E.H., 1979). Nous retiendrons ce dernier site comme exemple avec son forage d'essai entouré de trois piézomètres.

Reprenons les notations et les écritures de BERKALOFF (1970), pour la formule d'HANTUSH :

- Q = débit du puits en m³/h ;
- t = durée de pompage ;
- R = rayon du puits au niveau de la couche aquifère;
- y = dépression du niveau piézométrique à la distance r , à l'instant t , exprimée en mètres;
- Δy = dépression résiduelle du niveau piézométrique en remontée après l'arrêt des pompes, exprimée en mètres;
- T = transmissivité hydraulique de la couche conductrice d'eau en m²/h;
- S = coefficient d'emménagement de la réserve immédiatement mobilisable dans la couche conductrice d'eau compressible;
- S_m = coefficient d'emménagement total des couches magasin compressibles;
- bm = épaisseur de la couche magasin en mètres;
- K_m = paramètre de perméabilité transversale (verticale) de la couche magasin en m/h;
- σ = $\frac{km}{bm}$ paramètre de drainance ayant l'inverse du temps pour dimension

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} \text{ et } U_m = \frac{r^2 S_m}{4 T t} \text{ paramètres sans dimension dans la formule:}$$

$$W(u, \beta) = \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{u \beta^2}{x(x-u)}} \right] dx$$

intégrale sommairement tabulée

par HONTUSCH, avec:

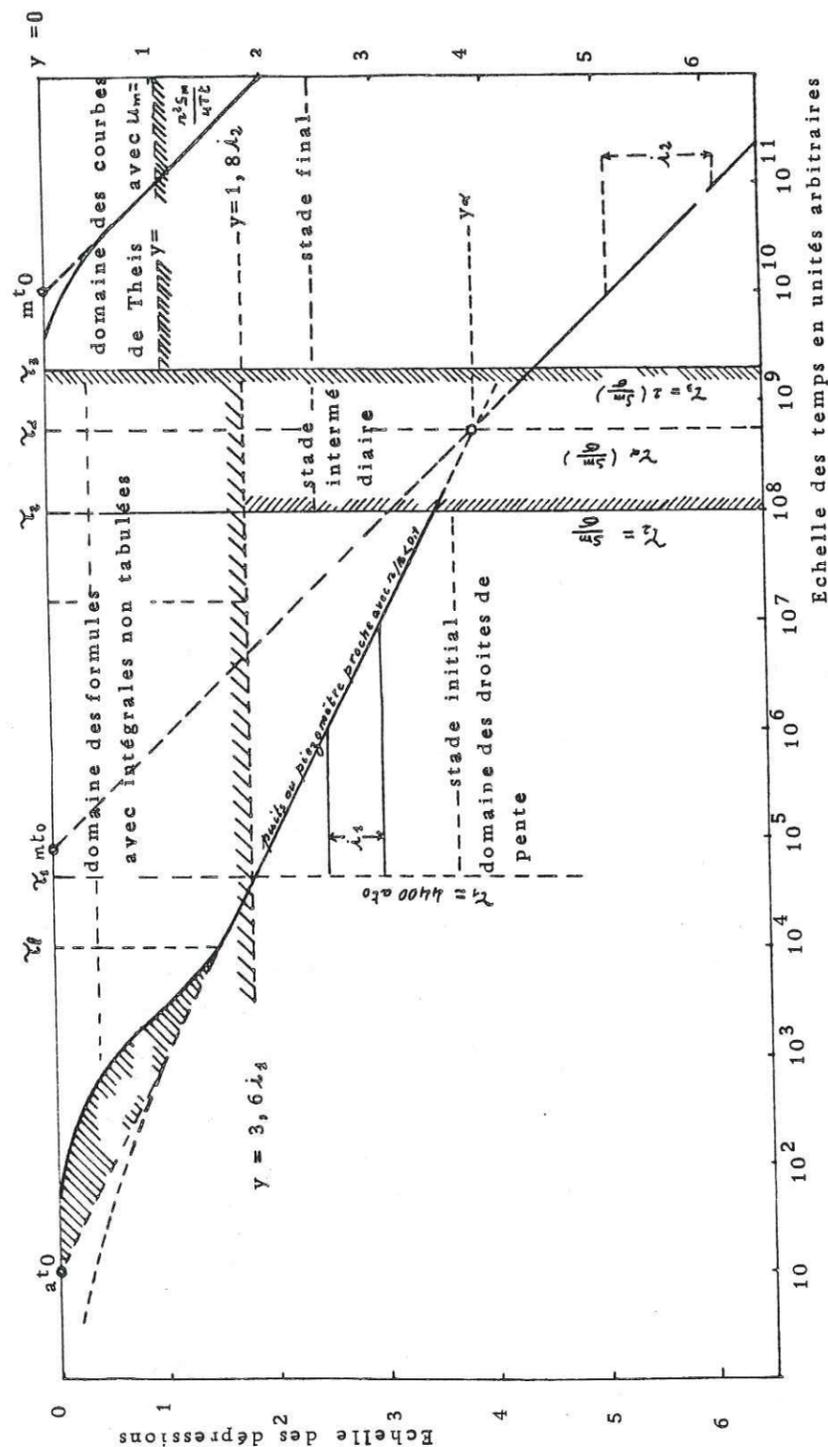


Figure 114 : Graphique des dépressions en fonction du temps. Cas d'une nappe captive avec une strate conductrice d'eau privilégiée (E. Bercaloff, 1970)

$$\beta = \frac{r}{4B} \sqrt{\frac{Sm}{S}} \quad \text{argument sans dimension et}$$

$$B = \sqrt{\frac{Tbm}{Km}} = \sqrt{\frac{T}{6}} \quad \text{paramètre ayant une longueur pour dimension dans les formules d'HANTUSH dit "leakage factor".}$$

Les équations d'HANTUSH pour les deux stades sont:

- Au stade initial de pompage:

$$\text{pour } t \leq \frac{bm Sm}{10 km}$$

$$y = \frac{Q}{\pi^2 T} \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} \operatorname{erfc} \left[\beta \sqrt{\frac{u}{x(x-u)}} \right] dx$$

en fonction de

$$u = \frac{r^2 S}{Tt} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{r}{4} \sqrt{\frac{Sm Km}{S T bm}}$$

si $u\beta^2 \leq 10^5$ et $u \leq 10^4 \beta^2$ alors

$$y = \frac{1}{2} \frac{Q}{4\pi T} \operatorname{Ln} \frac{0,044}{u\beta^2}$$

- Au stade final quand $t \geq \frac{2bm Sm}{km} = \frac{Sm}{km}$ on a

$$y = \frac{Q}{4\pi T} W(u_m) \quad \text{avec} \quad W(u_m) = \int_{u_m}^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx$$

Ces différentes formules sont valables lorsque les courbes expérimentales présentent les formes de celles données par BERKALOFF (fig.)

Lorsqu'on examine les courbes de descente des forages de Mogtéo, on remarque qu'elles ont des allures dissemblables et que ce ne sont pas les ouvrages les plus voisins qui donnent des courbes expérimentales similaires. Suivant l'allure, on peut même distinguer deux couples de courbes : F et P2 puis P1 et P3.

Le premier couple correspond aux forages situés dans l'axe de la fracture.

Seule la courbe F présente une brisure qui peut permettre de la comparer au graphique type d'HANTUSH. Mais ici aussi, l'intervalle réservé au stade dit intermédiaire est inexistant et les pentes respectives des deux droites sont de 1,48 et 1,82, alors qu'elles devraient théoriquement être dans un rapport 1/2.

Sur les courbes de remontée, la similitude entre les graphes F et P2 est conservée, tandis que celle entre P1 et P3 disparaît.

On ne peut dans les conditions présentes parler de caractéristiques d'aquifères. Les paramètres calculables à partir des courbes de remontée ou de descente caractérisent ponctuellement l'ouvrage de captage. Les dissemblances entre les différentes courbes traduisent l'hétérogénéité et l'anisotropie de l'aquifère. C'est ce qui fait dire à M. ENGALENC (1979) à propos des essais de pompage de Mogtéo que:

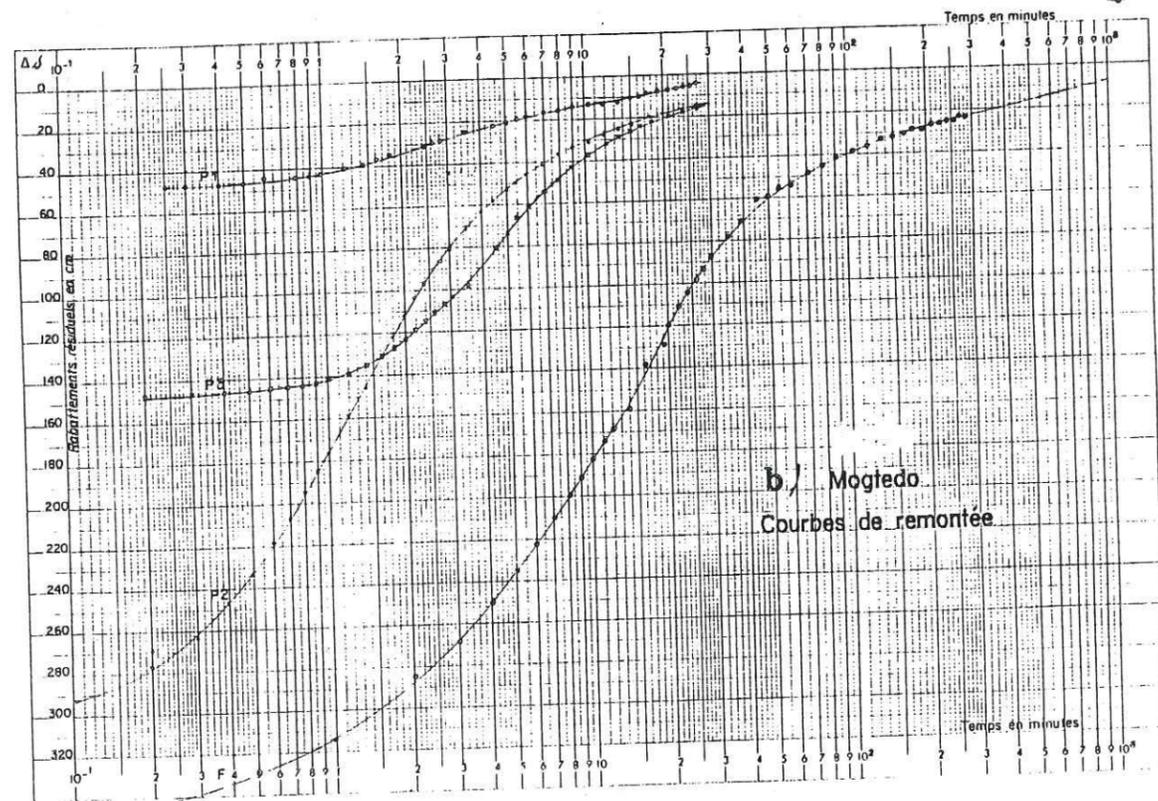
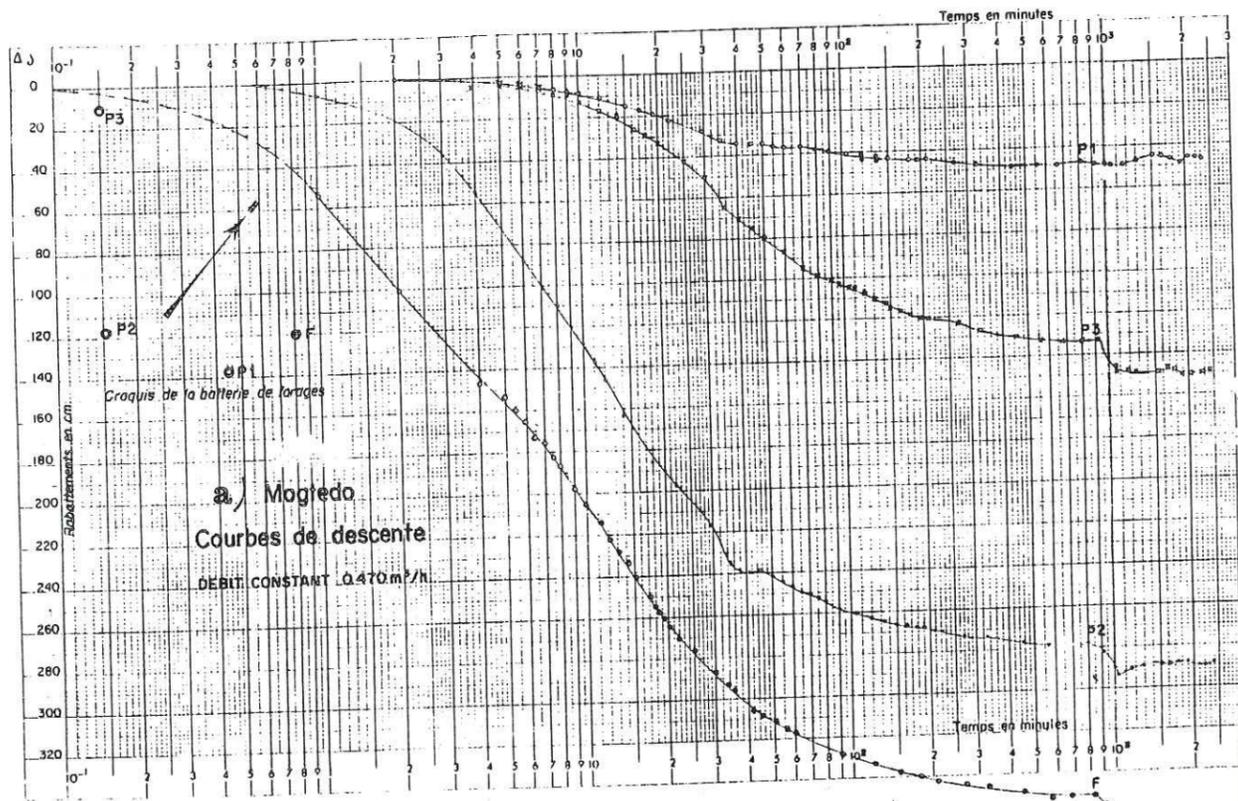


Figure 115 : Essais de pompage de Mogtédó (C.I.E.H.-Engalenc M., 1979)

c) Courbe de rabattement du forage F

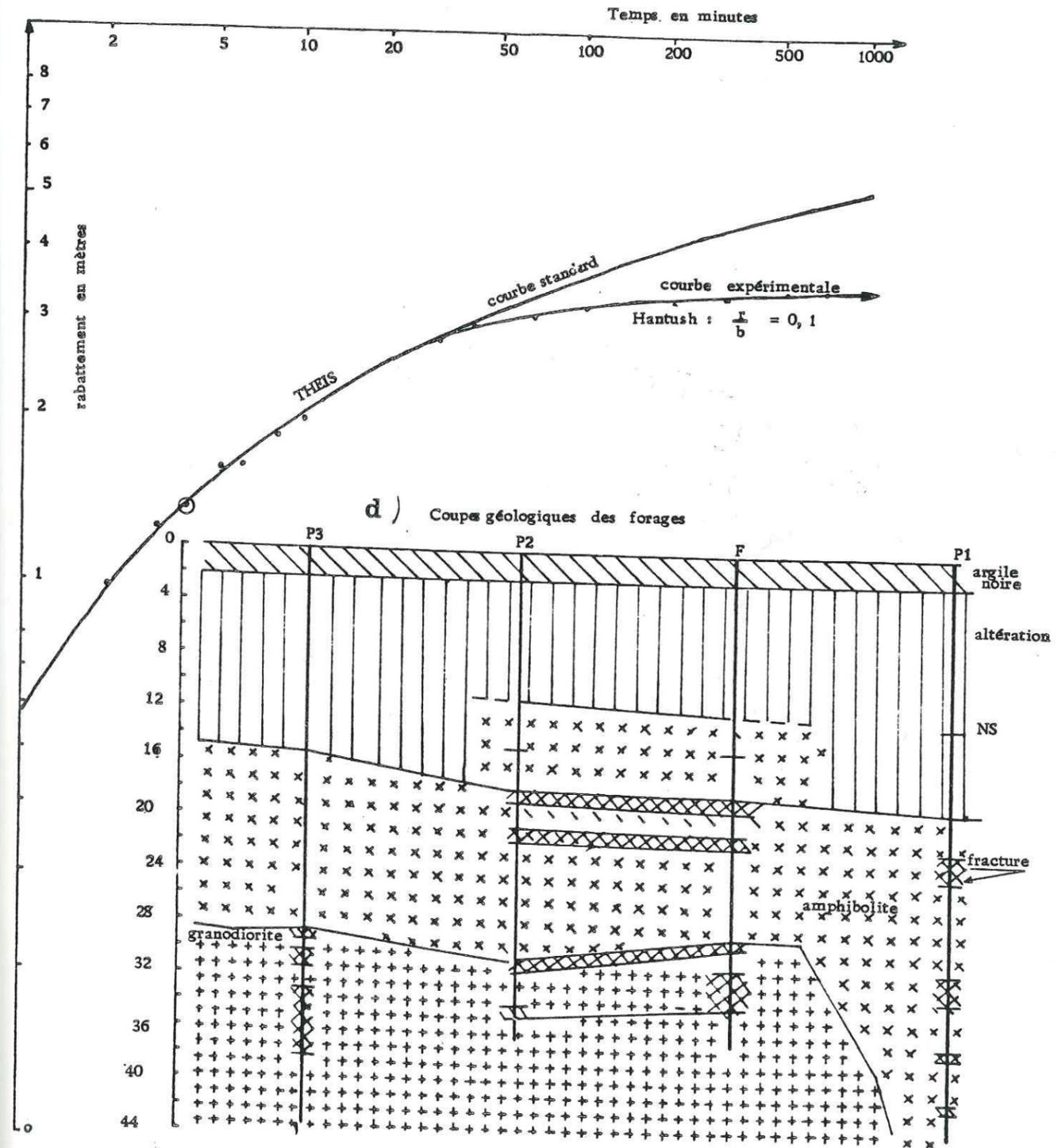


Figure 115 : Essais de pompage de Mogtédó.

"Le modèle hydrodynamique étant un multicouche dont les caractéristiques n'ont pas été étudiées spécifiquement, il n'est pas possible de calculer des caractéristiques d'autant plus que l'hétérogénéité s'accompagne d'une forte anisotropie du milieu fissuré".

L'exemple de Mogtédo, grâce à son dispositif de piézomètres, montre l'anisotropie horizontale du milieu aquifère.

Celui de Pô met en évidence l'existence d'une anisotropie verticale très marquée. En effet, tandis que les courbes de remontée et de descente des essais de Mogtédo sont régulières, à Pô les deux types de courbes présentent chacune un saut net, situé toujours à la même profondeur. On peut expliquer ce phénomène à l'aide de la coupe géologique du forage qui comporte deux niveaux hydrauliquement conducteurs séparés par une couche magasin peu perméable.

Dans le détail, et lorsque l'on veut considérer l'ensemble de l'aquifère, le problème est encore plus complexe. En effet, les essais se sont effectués sur un forage dont la mauvaise conduite des travaux (pose du tubage définitif) avait amené l'équipe de pompage à poser un bouchon de 10 mètres au fond du tubage afin d'éviter des remontées de boue par boulangerie. Ce faisant, on excluait ainsi de l'exploitation une partie des arènes grenues et toute la frange fissurée du bed-rock. C'est dire que la courbe des caractéristiques est incomplète puisqu'on devrait avoir trois couches productives de conductibilités hydrauliques différentes: le filon de quartz, les arènes grenues grossières et la roche fissurée (Fig. 116).

Les arènes argileuses sommitales jouent un rôle de couche magasin pour le filon de quartz et les arènes grenues, bien que bonnes conductrices jouent le même rôle vis-à-vis de la frange fissurée du substratum (fig. 116).

Les forages définitifs de l'adduction d'eau qui ont permis d'atteindre des débits de 15 m³/h au lieu de 8 m³/h, dans le forage d'essai montrent l'apport élevé en débit du captage de la frange fissurée du bed-rock, donc aussi la grande productivité de cette dernière.

La courbe caractéristique des pompages d'essai est une droite brisée qui traduit l'existence au niveau de l'aquifère de deux entités à conductibilités différentes. Il est même prévisible que le captage de la roche fissurée aurait encore modifié l'allure de cette courbe en y faisant apparaître son influence.

On peut à l'aide de la courbe de remontée ou de celle de descente, calculer des caractéristiques T₁, T₂, T₃, déductibles des pentes I₁, I₂ et I₃, des portions droites des courbes et en supposant que pour chaque intervalle, on peut appliquer la formule de THEIS et de JACOB, on obtient ainsi:

$$I_1 = 1,12 \text{ avec } T_1 = 1,8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$I_2 = 0,22 \text{ avec } T_2 = 1,8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$I_3 = 0,36 \text{ avec } T_3 = 1,1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

à partir de la courbe de remontée.

A la couche donnant le saut observable sur les deux types de courbes correspond une transmissivité:

$$T_4 = 6,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

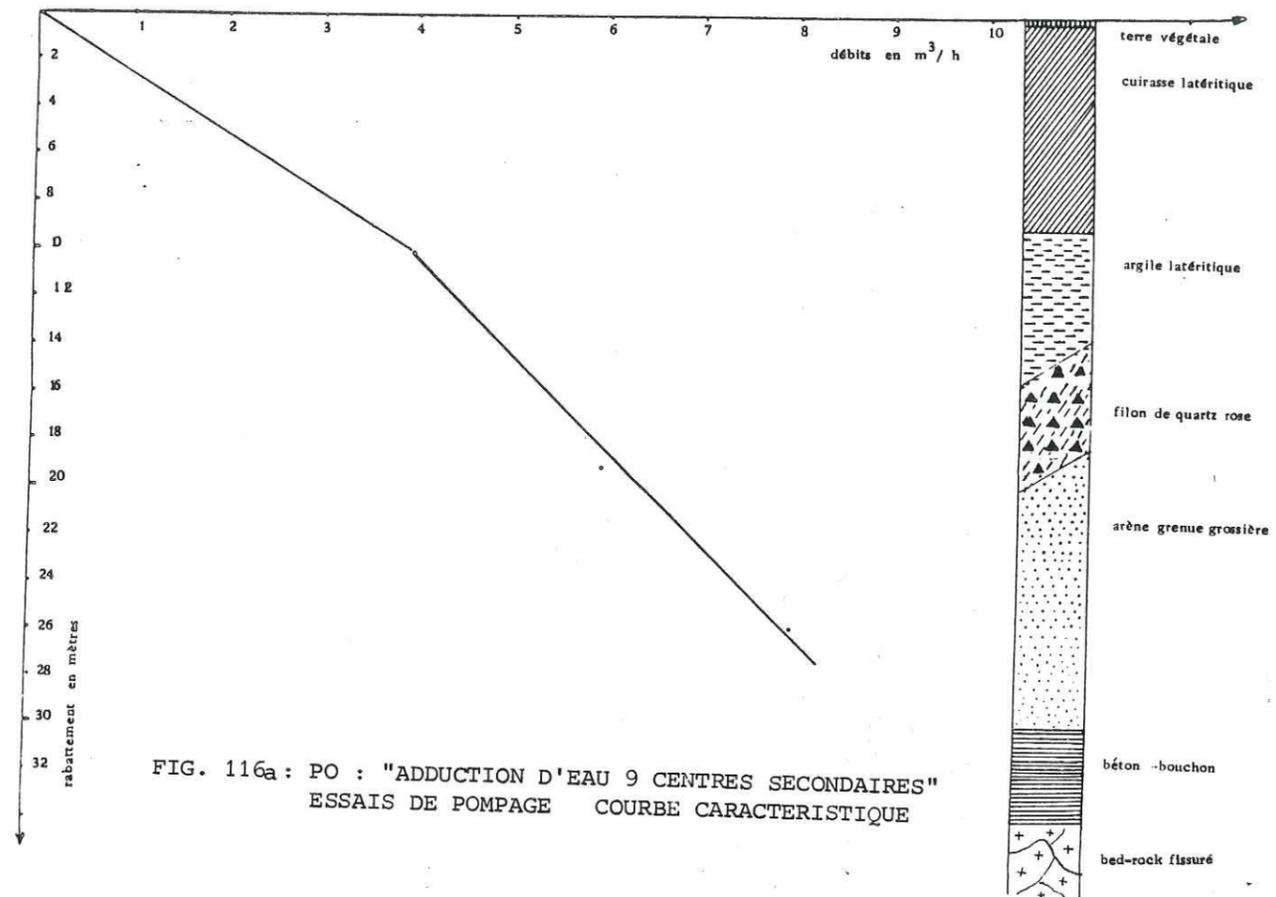


FIG. 116a : PO : "ADDITION D'EAU 9 CENTRES SECONDAIRES"
ESSAIS DE POMPAGE COURBE CARACTERISTIQUE

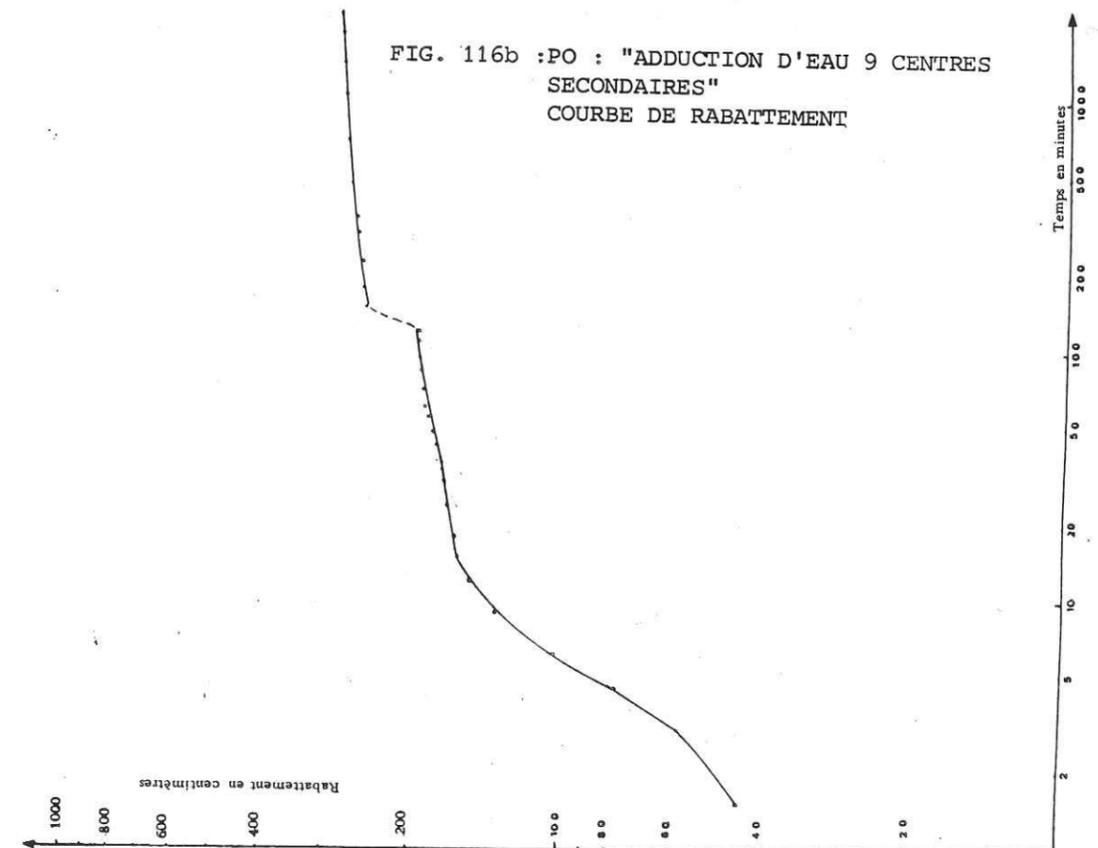


FIG. 116b : PO : "ADDITION D'EAU 9 CENTRES SECONDAIRES"
COURBE DE RABATTEMENT

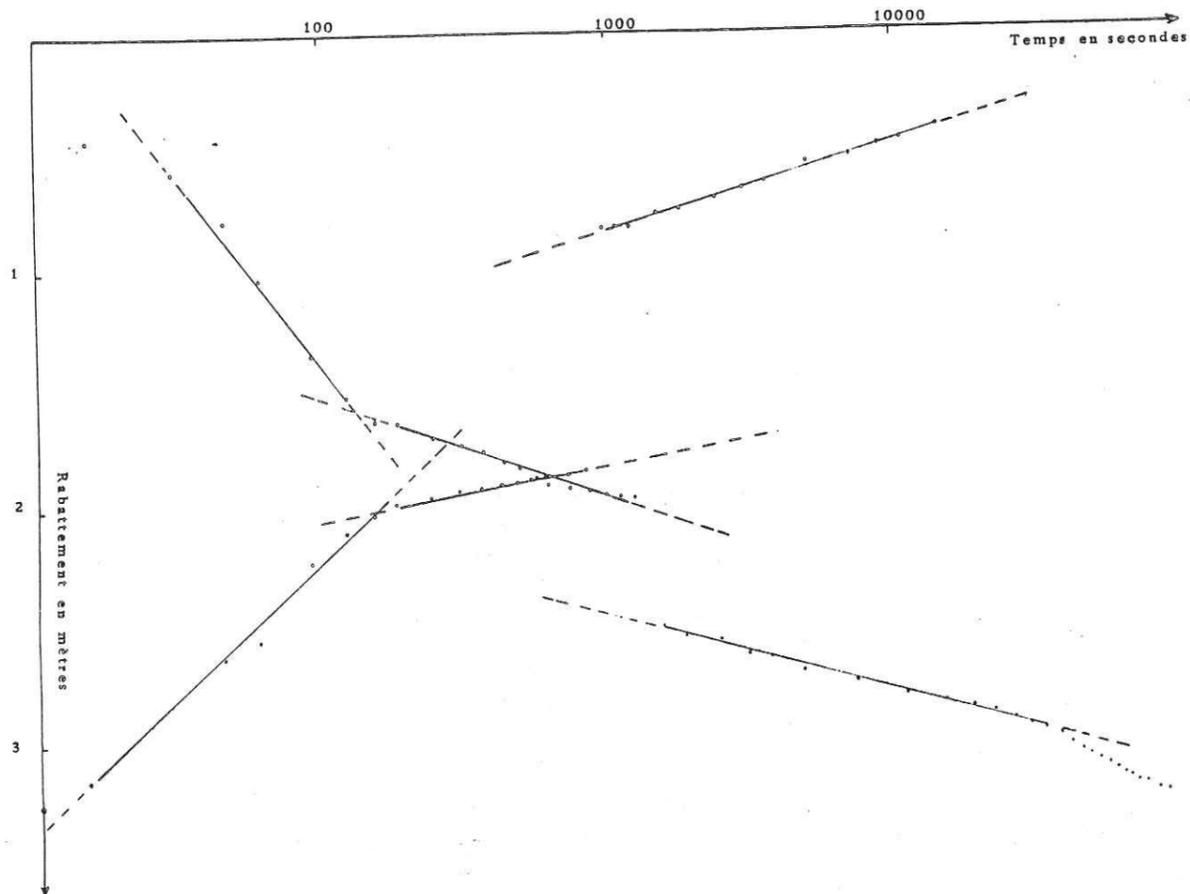


FIG. 116c : PO : "ADDUCTION D'EAU 9 CENTRES SECONDAIRES"
 ESSAI DE POMPAGE : COURBES DE DESCENTE ET DE REMONTEE

HEURES	TEMPS	N.D.	-
6 H 00	0	15,02	3,25
	15"	14,92	3,15
	30"	14,53	2,76
	45"	14,44	2,67
	1'	14,34	2,57
	2'	14,00	2,23
	230	13,87	2,10
	3'	13,80	2,03
	4'	13,76	1,99
	5'	13,73	1,96
7 H 00	6"	13,69	1,92
	7"	13,68	1,91
	8"	13,67	1,90
	9"	13,66	1,89
	10"	13,65	1,88
	12"	13,64	1,87
	14"	13,62	1,85
	16"	12,60	0,83
	18"	12,60	0,83
	20"	12,60	0,83
8 H 00	25"	12,54	0,77
	30"	12,54	0,76
	40"	12,48	0,71
	50"	12,44	0,67
	60"	12,41	0,64
	1 H 30	12,34	0,57
	2 H 00	12,30	0,53
	2 H 30	12,26	0,49
	3 H 00	12,24	0,47
	3 H 00	12,18	0,41

PO P. 7 (S.E.3)
 Observation de la remontée
 7/05/78

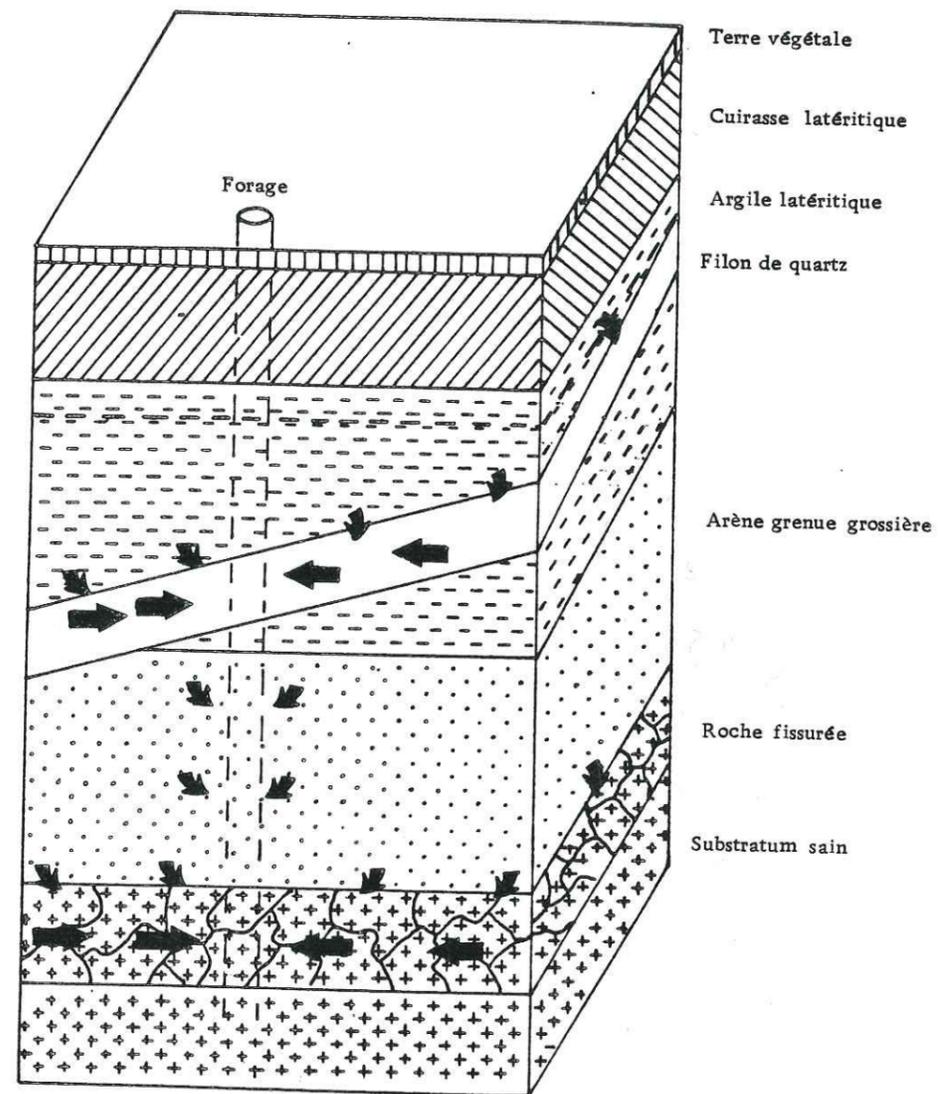


FIG. 116e : PO : SCHEMA DE CIRCULATION DES EAUX VERS LE FORAGE

Un exemple remarquable de variation spatiale de productibilité hydraulique accompagnant l'hétérogénéité pétrographique dans les formations du socle cristallin

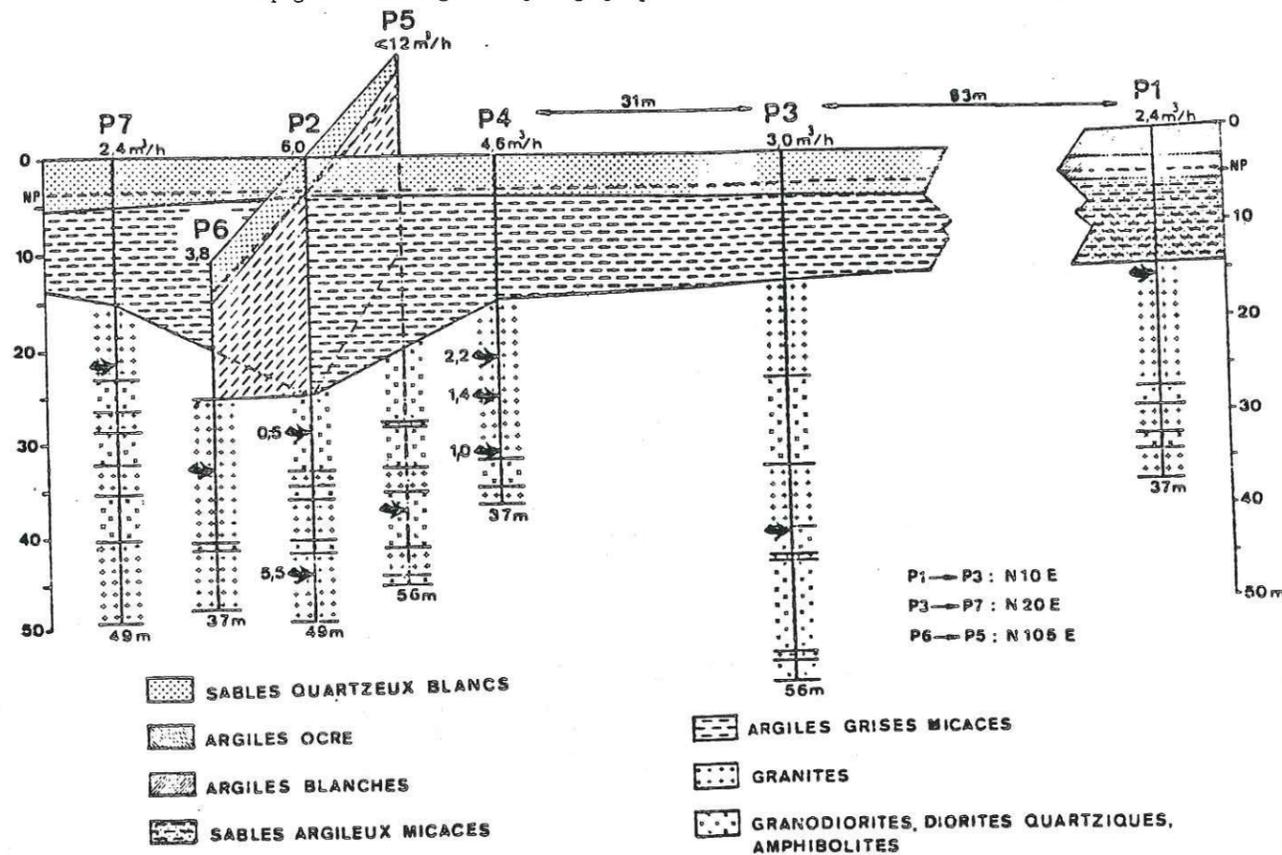


Figure 117 : Coupe des forages. Station expérimentale de l'E.N.S.I.P. de Yamoussokro d'après J.P. Faillat et P. Lebon, 1983.

Nous ne pouvons pas pousser plus loin l'interprétation des données des essais de P6 en l'absence d'observations piézométriques autour du forage.

Si les résultats obtenus à Zigla et à Mogtêdo n'ont pas été bons dans la mesure où l'on a seulement pu conclure à l'hétérogénéité et à l'anisotropie du milieu aquifère, sans pouvoir en dégager les caractéristiques propres, l'évolution des nappes observée dans certaines villes comme Pô, Ouahigouya, fada-N' Gourma montre la nécessité d'une étude approfondie du comportement de celles-ci avant leur exploitation intensive:

- A Pô, les débits d'exploitation estimés à 13 m³/h sont tombés à 9 m³/h en avril 1983 (période où la demande d'eau est la plus forte de l'année) à la suite certainement d'un dénoisement du filon de quartz, qui est le premier niveau drain de la nappe. On voit bien qu'une meilleure connaissance de la géométrie de la nappe par des sondages de reconnaissance qui auraient servi aussi ultérieurement de piézomètres lors des essais aurait permis de prévoir le dénoisement aux basses eaux du filon;

- A Fada-N'Gourma, on enregistre une baisse inquiétante du niveau piézométrique du forage d'exploitation faisant craindre un épuisement par surexploitation et insuffisance de réalimentation;

- A Ouahigouya, la ville connaît en fin de saison sèche une pénurie d'eau consécutive au dénoisement de la cuirasse qu'exploitent les puits de l'O.N.E. au niveau du jardin municipal.

Il est intéressant de signaler la méthode mise au point par R. DEGALLIER (1983) et visant à évoluer la capacité de la nappe à résister à un épuisement au moyen de deux paramètres: la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement qu'on obtient en interprétant les réactions de la nappe à des pompages.

La méthode est applicable aux aquifères où les écoulements sont supposés régis par des lois linéaires dans un domaine défini par un seul jeu de paramètres hydrodynamiques. L'auteur pense que cette double hypothèse est justifiée dans les roches fissurées, voire même souvent dans les aquifères karstiques.

Elle peut traiter les cas suivants:

- non captivité et anisotropie de la nappe;
- présence d'une limite étanche ou d'alimentation;
- influence simultanée de plusieurs puits de pompage à régimes d'exploitation différents et variables;
- ignorance du niveau de la nappe en l'absence de tout pompage;
- pompage dans des puits de grand diamètre pénétrant partiellement l'aquifère.

La méthode consiste à comparer les mesures à abaques construites en tenant compte des constitutions réelles d'exécution des pompages. Il faut pour cela choisir une fonction qui convienne à la nature de l'aquifère et à ses limites ainsi qu'aux caractéristiques du ou des puits et des piézomètres. On fait ensuite la somme des effets individuels de chaque palier de débit, de chaque puits de pompage et de chaque image de chacun des puits de pompage par rapport à des limites essentielles.

Ce qui est symbolisé par l'expression suivante:

$$S_n T = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^K (Q_{j,i} - Q_{j,i-1}) \times F(t_n - t_{i-1})$$

avec S_n = rabattement total à l'instant t_n

m = nombre de puits de pompage, doublé si l'on tient compte d'une limite à flux nul ou à potentiel constant;

K = nombre de paliers de débit du puits J ;

Q_i = débit correspondant à chacun des K paliers, dont la succession épouse la courbe expérimentale des débits et dont on a noté la valeur Q_i à l'instant de la fin t_i ou du début du palier suivant Q_{i+1} ;

T = la transmissivité supposée constante dans l'ensemble du domaine affecté par le pompage. Ce qui est une condition fortement restrictive, mais qu'il est difficile de surmonter sans recourir à des modèles beaucoup plus complexes.

C'est précisément cette dernière condition sur la constance de la transmissivité qui n'est pas remplie dans nos aquifères où l'anisotropie horizontale se double d'une anisotropie verticale très accusée. Nous ne pouvons donc pas employer la méthode proposée ici par DEGALLIER pour traiter les données de nos essais de pompage.

GRINGARTEN (1972 et 1982) propose des formules de calcul des caractéristiques du milieu fissuré en considérant le cas d'une faille horizontale ou verticale. Le premier cas nous ramène à la méthode d'HANTRICH traitant d'une couche conductrice comprise entre deux couches moins perméables. Dans le deuxième cas, seuls les perméabilités moyennes peuvent être calculer sans piézomètre et en connaissant la géométrie du conducteur, ce qui est loin d'être notre.

Conclusions

L'évocation des divers cas que nous avons analysés pose le problème de la connaissance des caractéristiques propres des nappes des altérites, ainsi que celle de leur évolution spécifique avant leur mise en exploitation intensive. Elle montre la nécessité de la réalisation de vrais essais de pompage. L'interprétation de ces derniers reste cependant un problème non encore résolu.

En effet, comme nous l'avons vu, les modèles classiques existants ne sont pas applicables de façon brute. Tout au plus permettent-ils, lorsque l'on peut comparer les données des essais de pompage à celles de la prospection électrique par la méthode des résistivités, de parler de caractéristiques équivalentes pour chaque ensemble aquifère hétérogène donné. Une approche du problème par le biais de modèles mathématiques ne manquerait peut-être pas d'intérêt.

Au stade actuel, les essais réalisés permettent seulement une classification des différentes formations cristallines en fonction des chances qu'on a d'y obtenir des débits élevés. Il reste que, vu l'hétérogénéité et l'anisotropie du milieu, chaque site constitue un cas particulier, et que les données que l'on y recueille ne peuvent être transposables même sur des sites voisins (fig. exemple de Yamoussokro en Côte d'Ivoire).

4.2.3.3. Circulation des eaux souterraines, mode de réalimentation des nappes

Il devient plus aisé de comprendre comment les eaux s'infiltrent et rejoignent les nappes en analysant les différents facteurs étudiés: mode de gisement étagé des nappes, semi-captivité, état d'humidité des horizons du profil d'altération, les fluctuations saisonnières des niveaux hydrostatiques et enfin la chimie des eaux.

Le mode de gisement

Dans les régions couvertes de cuirasse latéritique et surtout lorsque celle-ci repose sur des roches basiques ou des schistes à altérites argileuses la nappe de la cuirasse est séparée de la nappe de la roche fissurée.

Il y a une mise en charge de l'eau sous les argiles: l'eau peut même être sous pression sur substratum granitique si les altérites sont suffisamment épaisses et imperméables. De nombreux forages réalisés dans les différentes formations du socle en Haute-Volta comme dans les régions voisines mettent en évidence la semi-captivité des nappes profondes:

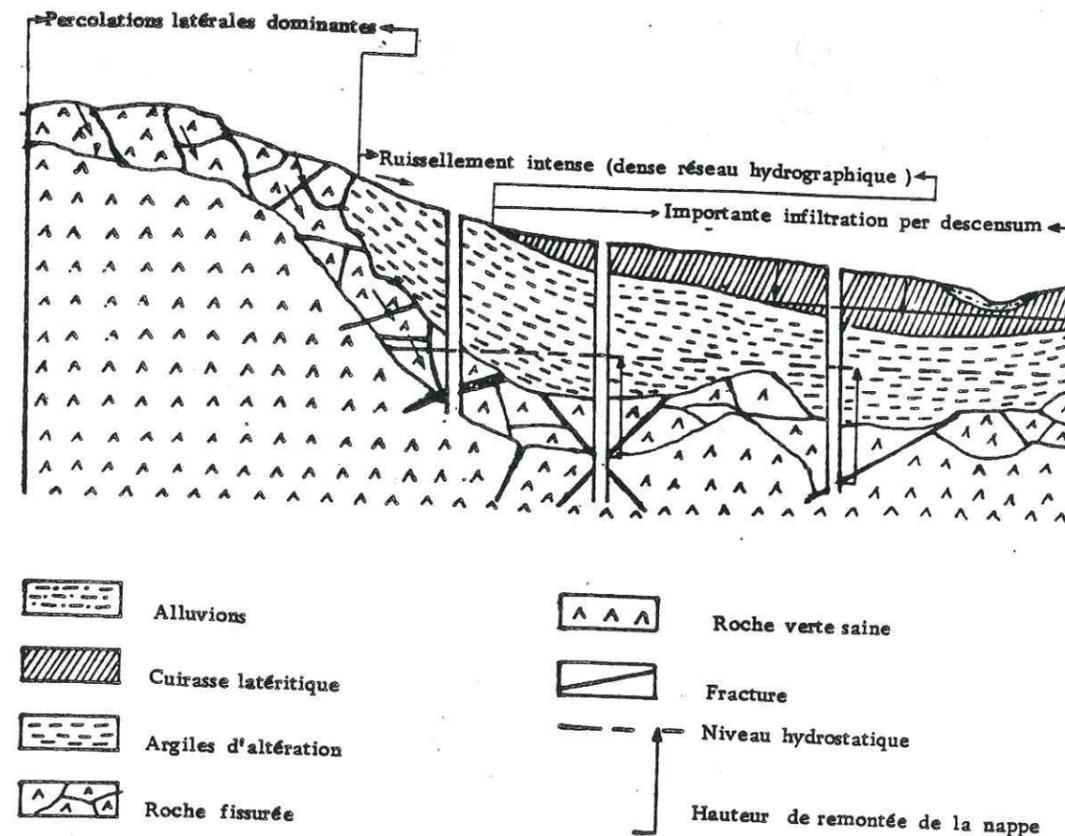


Figure 118 : Circulation et mise en charge des eaux d'infiltration

- A Pouni on a observé une remonté de 34 mètres après avoir rencontré les venues d'eau à 50 mètres. Il est intéressant de noter que sur ce site deux forages arrêtés à 45 mètres, sans avoir atteint la frange fissurée du substratum pour l'exploitation de laquelle la géophysique recommandait une profondeur forée de 55, avaient été jugés secs et furent abandonnés.

- La Comtec (1968) et l'A.V.V. (1976-1977) mentionnent en Haute-Volta (plateau mossi - Sud du bassin versant de la Volta Blanche) des remontées variant de 0 à 20 mètres.

- Dans les formations éburnéennes de la Boucle du cacao en Côte d'Ivoire, on a enregistré une remontée de 31 mètres à Kouandiko.

- Pour Zinder au Niger, KRUGER fait cas d'une mise en pression dans les fissures variant entre 2 et 19 mètres dans les granito-gneiss.

Etat d'humidité du profil d'altération

Comme on l'a remarqué à Gampéla, la remontée se fait dans des argiles non saturées.

La fluctuation saisonnière des niveaux statiques

La remontée des niveaux piézométriques se fait plus rapidement en bordure des marigots, et dans les bas-fonds qu'au niveau des plateaux. Et ce indépendamment de l'épaisseur des altérites qui, si elle était plus importante dans les plateaux, aurait justifié ce retard, si et seulement si la remontée ne s'opérait qu'après comblement du déficit d'humidité (LELONG 1966).

Les bilans hydrogéologiques que nous avons établis (SAVADOGO, 1975) prouvent que le comblement du déficit n'a pas toujours lieu avant la remontée. La nappe remonte donc sous l'effet de poussée d'un front hydraulique, sorte de "piston flow" qui part des marigots en circulant à travers les arènes et la roche fissurée.

La chimie des eaux

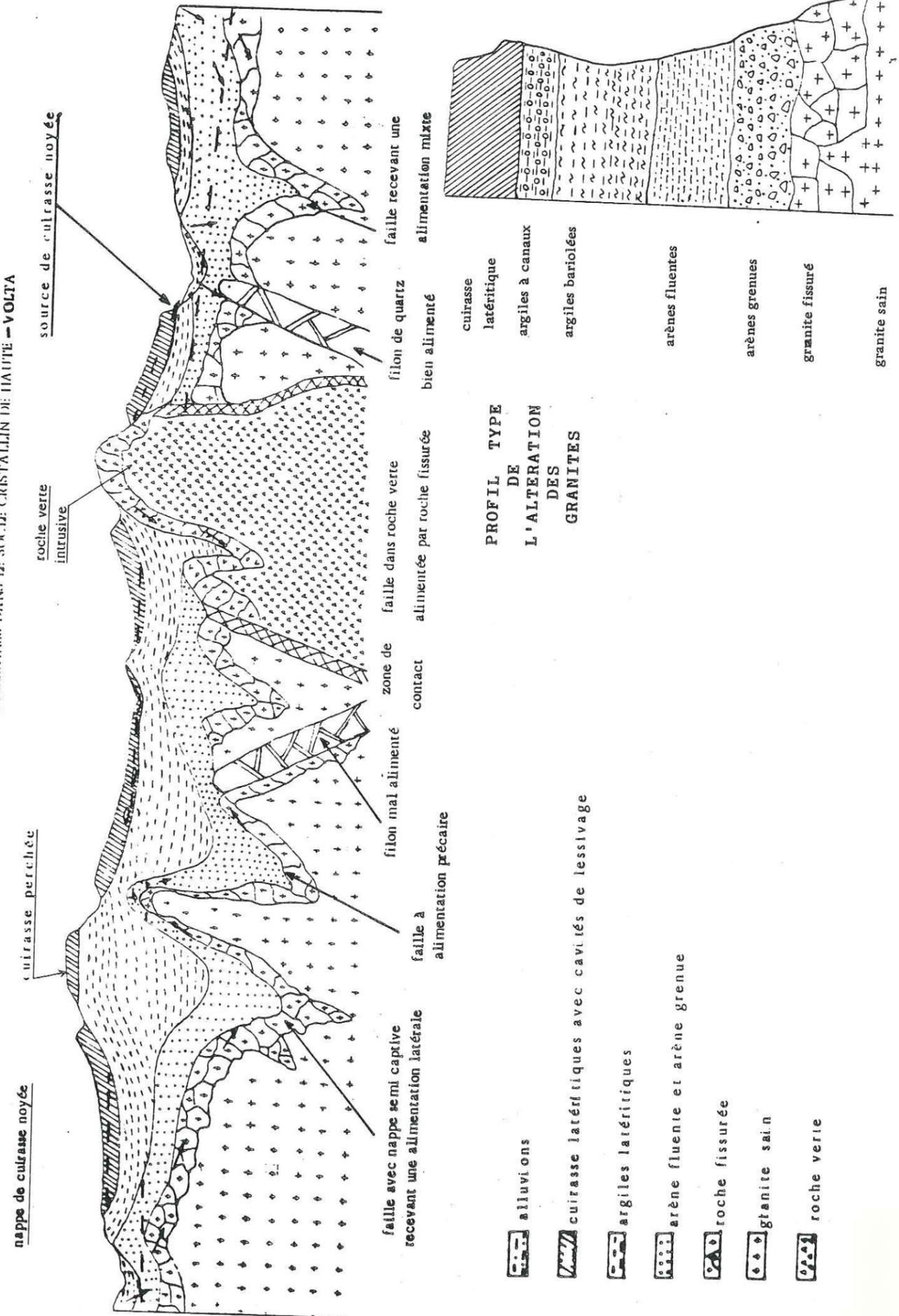
L'analyse que nous avons faite de la variation des teneurs en tritium dans les eaux de la zone 5 du ranch de Léo confirme l'existence du phénomène que nous venons de décrire ci-dessus.

Les différences de concentration totale en ions dissous indiquaient des eaux à percolation rapide dans des horizons superficiels, fortement lessivés déjà et pauvres en substances solubles ou échangeables, et des eaux plus minéralisées ayant transité par les horizons inférieurs du profil. Cette minéralisation était d'autant plus élevée que les circulations étaient lentes et difficiles. Choses qui ont lieu dans les formations basiques, les schistes et les gneiss.

CONCLUSION

Le schéma qui intègre le mieux toutes ces observations est celui de nappes quelquefois étagées ou communicantes avec des circulations de réalimentation per descensum ou latérales ou mixtes. (Figure).

Figure 19 : MODE DE GISEMENT DES EAUX SOUTERRAINES DANS LE SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE-VOLTA



V . CONCLUSIONS GENERALES

V - CONCLUSIONS GENERALES

Les études géologiques et hydrogéologiques des formations cristallines de Haute-Volta n'en sont qu'à leur début. Des régions entières n'ont encore été levées qu'au 1/500 000. Les travaux en cours du BU.VOG.MI. permettront très bientôt l'édition des cartes au 1/200 000 de quelques degrés carrés.

Les études que nous venons de mener participent à une meilleure connaissance de la partie sud du môle granito-migmatitique de Ouagadougou occupée par le bassin versant de Sissili. Elles démontrent, s'il en était encore besoin, l'intérêt que revêt la connaissance de la pétrographie régionale et locale dans la recherche de solutions aux problèmes hydrogéologiques. Les conclusions de nos études peuvent donc porter sur deux points: la géologie et l'hydrogéologie.

- La géologie

Nous avons montré que le bassin de la Sissili est occupé essentiellement par des migmatites gneissiques ou granitiques, recoupées par des batholites de granites roses et gris, ainsi que des roches basiques (amphibolites, granodioritiques et dolérites).

Le chimisme et la minéralogie des migmatites et des granites sont

Le chimisme et la minéralogie des migmatites et des granites sont voisins et correspondent à ceux des granites communs calco-alcalins.

Du point de vue génétique, les granites rencontrés correspondent soit à des granites d'anatexie, soit à des batholites intrusifs, soit encore à des injections magmatiques calco-alcalines remobilisant partiellement, pendant une phase tectonique, les migmatites catazonales.

La multitude des phases tectoniques associées au métamorphisme rend difficile l'identification de la part exacte des différents phénomènes qui peuvent avoir été successifs ou contemporains.

Il est intéressant de noter au niveau du bassin versant de la Sissili, l'association remarquable entre les granites roses souvent orientés et les intrusions basiques. A leur propos DUCCELLIER (1963) écrit:

"Les granites de type Boudoukou ont des compositions très variables. ARNOULD qui leur attribue une origine magmatique remarque leur nette et fréquente association avec les anciennes laves basiques devenues des roches vertes".

Les datations isotopiques obtenues sur minéraux (amphiboles et muscovite) constituent un apport géochronologique très important pour la connaissance des mûles intersillons. Ces âges qui sont les premiers de cet ordre de grandeur rencontrés dans le domaine Baoulé-Mossi permettent de situer la quasi totalité des formations occupant le bassin versant de la Sissili dans le libérien. Seul l'âge des granites gris postérieurs reste à préciser, mais déjà on peut dire que l'essentiel de la mise en place de ces formations s'est faite au cours du cycle orogénique libérien, même si elles ont été affectées par des intrusions éburnéennes ou même plus récentes comme celles des dolérites panafricaines.

Il est également possible que les phénomènes de remobilisation qui affectent les laves basiques transformées ici en amphibolites aient touché les migmatites qui s'en trouveraient alors rajeunies. On y trouverait alors des âges libériens de 3 300 Ma environ si les effets de l'orogénèse éburnéenne n'y ont pas été intenses.

L'histoire géologique du bassin versant de la Sissili se déroule essentiellement au Libérien avec: un métamorphisme de degré catazonal responsable de la mise en place des migmatites, suivi d'émissions de laves basiques transformées vers 3370 Ma en amphibolites qui seront éjectées de même que les migmatites de granites roses. L'ensemble est ensuite recoupé par les granites gris et enfin par les dolérites panafricaines vers 670Ma.

- L'hydrogéologie

L'analyse tectonique que nous avons réalisée dans une optique hydrogéologique nous a permis de dégager par les directions de fractures celles selon lesquelles les failles sont ouvertes (N 90°- N 100°, N 120° - 130°, N 160°) et sont à même de jouer un rôle de drain hydraulique.

L'application de la méthode préconisée par F.O. FRANCISS au réseau de mégafractures du bassin versant de la Sissili permet de mettre en évidence les relations existant entre les branches du réseau hydrographique et les axes de perméabilités induites. L'ordonnance de ces axes de perméabilités et du réseau de mégafractures plaide en faveur de l'existence de circulations organisées des eaux souterraines qui autoriseraient alors l'évacuation des produits lessivés des profils d'altération et que l'on ne retrouve pas dans les paysages voisins.

Mais les perméabilités induites calculées, si elles sont organisées, restent très faibles (10^{-9} à 10^{-8} m/s). Ceci implique que les mégafractures, en dehors des zones broyées qui les accompagnent, ne modifient que très peu la perméabilité des formations encaissantes. Lorsque ces dernières sont constituées d'altérites argilo-sableuses, elles jouent alors par rapport à la faille drainante un rôle surtout capacitif.

Du point de vue de l'hydrogéologie, l'analyse des débits exploitables en fonction de la composition pétrographique des formations et de leur fracturation conduit à la conclusion que, pour avoir une productivité hydraulique élevée, c'est autant la largeur et la longueur de la mégafracture que la fracturation en petit, qui l'accompagne dans le massif, qui est un facteur important.

Il est donc possible d'établir une hiérarchie dans la productivité des formations en présence qui correspond à peu de chose près à l'importance de la fissuration en petit des roches. Cette hiérarchie est la suivante:

- . filons de pegmatites et de quartz;
- . migmatites gneissiques ocellées à débit planaire;
- . roches basiques;
- . granites migmatitiques homogènes et granites intrusifs.

On retient que l'homogénéisation granitique est un facteur hydrogéologique défavorable.

Le mode de gisement des eaux souterraines est souvent étagé avec une nappe superficielle dont l'existence est commandée par la morphologie externe et une nappe profonde liée au modelé du substratum et dépendant des mégafractures qui le parcourent.

La nappe superficielle est trop tributaire des variations pluviométriques interannuelles pour des exploitations importantes et prolongées, le captage de la nappe profonde est indispensable.

Les essais de pompage montrent que la caractéristique fondamentale des aquifères des altérites et de la roche fissurée est l'hétérogénéité qui souvent se double d'une anisotropie rendant non utilisables les méthodes classiques d'interprétation des données des essais de débit.

L'interprétation des essais de pompage demande donc la mise en oeuvre de nouvelles méthodes ou l'adaptation de celles existantes.

Mais si l'hétérogénéité complique singulièrement cet aspect du problème, n'est-elle pas un facteur indissociable de nos milieux les plus productifs; qu'elle soit liée à la zone broyée d'une faille, à l'injection d'un filon fissuré et drainant, ou encore à la zone de contact entre deux formations pétrographiquement différentes? On pourrait même dire que toute la recherche hydrogéologique dans les formations cristallines du socle est axée sur le repérage de ces zones d'hétérogénéité. Le problème consiste donc à dégager et à quantifier les paramètres liés aux hétérogénéités.

La localisation des poches d'eau liées aux mégafractures est quelquefois difficile. Elle nécessite la prise en compte des environnements biologiques et la mise en oeuvre de nombreux types de prospection géophysique.

Nous avons pu expérimenter avec un relatif succès la méthode électrique des résistivités. Les effets des mégafractures sur les profils de traîné mais surtout sur les courbes de sondages électriques ordinaires et pluridirectionnels ont été pour la première fois exposés dans notre région.

Les expérimentations sur l'électromagnétisme sont également concluantes. Mais l'impossibilité de donner une interprétation qualitative et quantitative précise aux anomalies décelées par cette méthode, fait que son emploi doit être accompagné de sondages électriques.

Les analyses chimiques et isotopiques des eaux issues des formations cristallines de Haute-Volta montrent que le chimisme des eaux est en rapport avec celui des formations qu'elles lessivent dès lors que la durée de leur séjour et la distance de percolation permettent leur minéralisation. Cependant cette dernière reste toujours faible, mais elle permet de comprendre le mode de circulation des eaux de réalimentation des nappes. Nous avons trouvé dans ce mode de circulation (difficultés de circulation de l'eau dans les altérites argileuses) une explication des surconcentrations en chlorures des eaux issues des roches basiques.

Les teneurs en oxygène 18 et en tritium permettent d'apprécier les variations de l'évapotranspiration entre les régions du Sud (bassin de la Sissili) et celles de l'Oudalan au Nord du pays.

Les teneurs en tritium indiquent qu'il existe, même dans les régions du Nord où les précipitations sont inférieures à 500 mm/an, une recharge saisonnière des nappes.

Les variations interannuelles des concentrations en tritium des eaux constatées viennent corroborer le mode de gisement des eaux souterraines en poches séparées par des seuils.

De ce qui précède, nous pensons que l'image qui correspond le mieux au mode de gisement et de circulation des eaux souterraines dans les formations du socle cristallin de Haute-Volta est celle que donne la distribution des eaux de surface dans l'Oudalan, caractérisée par la présence de nombreuses

mares de stockage, mais dont les débordements en période pluvieuse se traduisent par un ruissellement organisé mais temporaire.

L'alimentation en eau des agglomérations nécessitera dans nos régions cristallines l'exploitation des zones drainantes les plus productives. Comme les mégafractures d'importance régionale auxquelles elles peuvent être liées ne traversent pas nécessairement les agglomérations, il importera de s'affranchir des contraintes imposées par la localisation des villes pour aller tester les mégafractures aux endroits où elles recoupent les faciès les plus productifs. Cette solution permettra de préciser les limites supérieures encore inconnues de productivité hydraulique des zones les plus favorables.

Nous souhaitons pour terminer, avoir montré par notre étude l'importance des liaisons entre tous les aspects de la géologie et de l'hydrogéologie dans une région qui n'a pas encore fait l'objet d'études systématiques et contribué ainsi à la mise au point d'une méthodologie des recherches d'eau en Afrique de l'Ouest tout en apportant notre contribution à la connaissance de la géologie de notre pays et à l'amélioration des conditions de vie des hommes et des femmes qui l'habitent.

LISTE DES FIGURES

	<u>Pages</u>
FIG. 1 : Carte physique de Haute-Volta.....	14
FIG. 2 : Schéma du déplacement annuel du "front intertropical" et des manifestations pluvio-orageuses qui s'y attachent.....	15
FIG. 3 : Moyennes des précipitations mensuelles.....	18
FIG. 4 : Isohyètes moyennes (mm) - Périodes 1961-1970 et 1971-1980.....	19
FIG. 5 : Structure d'ensemble de l'Afrique.....	23
FIG. 6 : Schéma d'ensemble du bouclier éburnéen (libéro-ivoirien).....	24
FIG. 7 : Esquisse géologique de la Haute-Volta.....	28
FIG. 8 : Complexes fondamentaux du mégacycle éburnéen. Segments tectogéniques (au sud du 15° parallèle). Organisation structurale du géosynclinal éburnéen.....	37
FIG. 9 : Rosaces de distribution des directions linéamentaires par degré carré.....	40
FIG. 10 : Distribution des directions linéamentaires par degré carré...	42
FIG. 11 : Courbe de tarage de la Sissili A Nebou.....	54
FIG. 12 : Relation entre les hauteurs d'eau et le débit à la station de Nébou.....	56
FIG. 13 : Fluctuations des niveaux piézométriques observées dans le bassin versant de la Sissili en 1974.....	58
FIG. 14 : Le bassin versant du Gorouol dans l'Oudalan.....	64
FIG. 15 : Carte géologique du bassin versant de la Sissili.....	66
FIG. 16 : Coupe schématique montrant les différentes formations géologiques du bassin de la Sissili.....	68
FIG. 17 : Diagramme AL/3 - K / AL/3 - Na de H. DE LA ROCHE.....	75
FIG. 18 : Diagramme pour l'étude des roches ignées.....	77
FIG. 19 : Les roches du bassin versant de la Sissili dans les diagrammes $F = f(F)$ et $F = f(B)$ de H. DE LA ROCHE.....	78
FIG. 20 : Les roches du bassin versant de la Sissili dans les diagrammes de Streckeisen.....	79
FIG. 21 : Les roches du bassin versant de la Sissili dans les diagrammes AFM.....	80
FIG. 22 : Classification des roches plutoniques.....	83
FIG. 23 : Diagramme $B = f(F)$ de DE LA ROCHE H.....	92
FIG. 24 : Répartition des unités birrimiennes.....	101
FIG. 25 : Carte de fracturation du bassin versant de la Sissili.....	108
FIG. 26 : Extrait de la carte d'interprétation de l'étude magnétique aéroportée de la région de Guiglo (d'après DOMZALSKL, 1969), montrant le style tectonique cassant.....	109
FIG. 27a: Carte de fracturation des environs de Pô.....	110
FIG. 27b: Environs de Pô : comparaison entre linéaments levés au 1/200000 et au 1/50000.....	112
FIG. 28 : Distribution des directions de linéaments, de fractures à l'affleurement, de foliation et de filons de quartz.....	114
FIG. 29 : Distribution des directions de linéaments, de fractures à l'affleurement, de foliation et de filons de quartz.....	115
FIG. 30 : Extrait de la carte géologique du degré carré de Pô (L.F. Bonard, 1967) montrant le lambeau de Guiaro et le décrochement dextre affectant les dolérites et les amphibolites.....	115
FIG. 31 : Structures planaires d'une zone de cisaillement.....	117
FIG. 32 : Blocs diagrammes des stations de mesure de la fissuration.....	120
FIG. 33 : Direction des fractures et des foliations liées aux trois phases tectoniques, jeux possibles des différentes failles.....	121
FIG. 34 : Carte de directions de foliation.....	123
FIG. 35 : Identification qualitative de la fracturation.....	124

	<u>Pages</u>
FIG. 36 : Carte de perméabilités induites du bassin versant de la Sissili.....	131
FIG. 37 : Environs de Pô : carte de perméabilités induites	133
FIG. 38 : Distribution des perméabilités induites dans les environs de Pô.....	134
FIG. 39 : Ranch d'Embouche de Léo, carte de perméabilités induites...	136
FIG. 40 : N'existe pas	
FIG. 41 : Extraits de la carte géologique du bassin versant de la Sissili montrant les variations de densité du réseau hydrographique en fonction des faciès pétrographiques.....	139
FIG. 42 : Variation de la densité du réseau hydrographique avec les faciès pétrographiques.....	140
FIG. 43 : Exemples de types de réseaux hydrographiques en Cote-d'Ivoire (Bourguet L. 1980) où apparaît également la variation de la densité du réseau en fonction des faciès pétrographiques	143
FIG. 44 : Site de Kossouka : exemple de sondages électriques indiquant des altérites dont l'épaisseur totale excède les 120 m.....	146
FIG. 45 : Diagrammes d'analyse d'eau de surface et issues de roches basiques.....	163
FIG. 46 : Les eaux du bassin versant de la Sissili, diagramme d'analyse d'eau	164
FIG. 47 : Diagramme logarithmique des analyses d'eau.....	167
FIG. 48 : Diagramme de potabilité des différents types d'eau.....	168
FIG. 49 : Interprétation des résultats par l'aire d'alimentation des forages - bloc de Mogtédou Bomboré - A.V.V. 1977 - fractures d'après Bérard P.....	171
FIG. 50 : Relation entre conductivité et teneur en chlorures.....	173
FIG. 51 : Corrélations entre les teneurs en chlorures et les concentrations des ions NO_3^- , Mg^{++} , NH_4^+ - NO_2^-	179
FIG. 52 : Carte géologique des environs de Foubé modifiée d'après les données de la chimie des eaux, des résultats des forages récents et des affleurements rencontrés.....	186
FIG. 53 : Village de Foubé : géologie et circulation des eaux.....	186
FIG. 54 : Relation entre la hauteur pluviométrique et le déficit d'écoulement annuels (mm).....	189
FIG. 55 : Les variations des teneurs en tritium dans les eaux de précipitations à Bamako et à Sao-Tomé.....	192
FIG. 56 : Teneurs en tritium (corrigés pour la décroissance jusqu'en 1978) dans les eaux de pluie provenant de Bamako et de Sao Tomé.....	194
FIG. 57 : Carte de résistivités apparentes et bloc diagramme montrant le relief de la zone 5 du Ranch de Léo.....	196
FIG. 58 : Concentration totale en ions par rapport aux teneurs en oxygène 18.....	199
FIG. 59 : Variations des teneurs moyennes mensuelles pondérées en oxygène 18 de Bamako.....	200
FIG. 60 : Composition isotopique des eaux de surface et souterraines	202
FIG. 61 : Variations dans le temps des précipitations, de l'humidité relative et des teneurs en oxygène 18 de l'eau des mares dans l'Oudalan.....	204
FIG. 62 : Etude géophysique de Manéga.....	208
FIG. 63 : Sondage électrique indiquant une cuirasse remaniée par une termiitière située sur une fracture dont on note l'effet de la frange fissurée sur la courbe.....	217
FIG. 64 : Carte des failles relevées par géologie, par imagerie Landsat et par aéromagnétisme.....	222
FIG. 65 : Analyse fréquentielle des directions de failles relevées par géologie, imagerie Landsat et par aéromagnétisme.....	223

	<u>Pages</u>
FIG. 66 : Profils gravimétriques de Tou à Ouahigouya, Séguénéga, Sabsé Mané, Korsimogho, Bani à Bâne, Tibo, Djibo, Gassaliki, Gorgadji et Dori.....	226
FIG. 67 : Prospection électromagnétique. Schémas de principe et profils obtenus avec bobines horizontales.....	228
FIG. 68a: Comparaison entre profils électromagnétiques et les résistivités apparentes.....	230
FIG. 68b: Comparaison entre profils de résistivités et profils électromagnétiques.....	231
FIG. 68c: Profils électromagnétiques et électriques et ouvrages de captage sur substratum éburnéen.....	232
FIG. 68d: Profils électriques et électromagnétiques des sites de Boussé et de Toma (d'après F. DIRKS et alliés 1982).....	234
FIG. 69 : Influence de la frange fissurée sur la branche remontante des courbes.....	235
FIG. 70 : Allure des courbes des sondages électriques en fonction de la nature et de l'épaisseur des terrains.....	237
FIG. 71 : Remontée trainante : exemple de Daramandougou.....	238
FIG. 72 : Influence des failles sur l'allure des sondages électriques..	239
FIG. 73 : Influence des fractures sur l'allure des sondages électriques	240
FIG. 74 : Géologie et distribution des lignes de courant.....	241
FIG. 75 : Exemples de structure donnant une courbe de sondage à branche montante en escalier.....	242
FIG. 76: Bloc de Mogtédou Bomboré - Corrélations prospection géophysique sondages de reconnaissance.....	243
FIG. 77 : Influence des fractures obliques sur les courbes de sondages électriques.....	244
FIG. 78 : Pô- Marché à Bétail : carte de résistivités apparentes.....	245
FIG. 79 : Pô - Hopital : carte de résistivités apparentes.....	246
FIG. 80 : Influence des fractures sur les sondages électriques.....	248
FIG. 81 : Influence des fractures sur les sondages électriques.....	249
FIG. 82 : Influence des fractures sur les sondages électriques.....	250
FIG. 83a: Trainés électriques sur migmatites et roches vertes.....	251
FIG. 83b: Profils de trainés électriques sur différents faciès pétrographiques.....	253
FIG. 84 : Ranch de Léo zoné 1 : carte de résistivités apparentes.....	254
FIG. 85 : Ranch de Léo zone 1 : linéament de photos aériennes et carte de résistivités apparentes.....	255
FIG. 86 : Dakayé : carte de résistivités apparentes.....	256
FIG. 87 : Evolution de l'altération et points d'implantation favorables des forages d'eau.....	258
FIG. 88 : Ouagadougou : carte de résistivités apparentes.....	259
FIG. 89 : Léo - Diasso : carte de résistivités apparentes.....	261
FIG. 90a: Sondages électriques pluridirectionnels.....	262
FIG. 90b: Influence des fractures sur les sondages électriques.....	263
FIG. 90c: Sondages électriques pluridirectionnels.....	264
FIG. 91 : Le dispositif carré.....	265
FIG. 92 : Diagrammes des résistivités apparentes obtenues avec le dispositif carré.....	266
FIG. 93 : Mogtédou : valeur des résistivités apparentes des rectangles 1 et 2.....	267
FIG. 94 : Type de puits recommandé pour le captage des eaux souterraines dans les formations du socle cristallin de Haute-Volta.....	272
FIG. 95 : Campagnes d'études hydrogéologiques et de prospections géophysiques menées au sein de l'H.E.R. de 1974 à 1981.....	278
FIG. 96 : Schéma donnant la disposition des différentes cuirasses dans la région de Kongoussi.....	282

	<u>Pages</u>
FIG. 97 : Profil géomorphologique du plateau de Mandingue (Mali).....	283
FIG. 98 : Influence des fractures sur la géométrie des marigots et bas-fond en tête de talweg-fractures et marigots.....	284
FIG. 99 : Côte-d'Ivoire, région de Dimbokro : relation entre la structure et le réseau hydrographique sur substratum granitique et schisteux.....	286
FIG.100 : Répartition des directions des alignements (de plus de 2 km) visibles sur photographies aériennes dans les zones granitiques et birrimiennes.....	286
FIG.101 : Distribution des directions des linéaments dans la région du Ranch de Léo et distribution des directions de drains du réseau hydrographique dans la région du Ranch de Léo.....	287
FIG.102 : Géomorphologie et mode de gisement des eaux souterraines....	289
FIG.103 : Coupe morphologique schématique, Plateau-versant.....	290
FIG.104 : Cuirasse démantelée en haricot.....	290
FIG.105 : Disposition des plateaux de cuirasse latéritique et les nappes de cuirasse noyée de Kossouka et de ses environs.....	292
FIG.105 : Kossouka : sondages électriques du secteur dispensaire-école c et d	
Carte de résistivités apparentes de la zone du dispensaire-école.....	293
FIG.106 : Village de Boulounga : le massif schisteux birrimien et les dômes éventrés.....	294
FIG.107 : Géomorphologie et nappes de cuirasse noyée de Ouattigou et de Kalsaka.....	295
FIG.108 : Ranch de Léo : profils de trainé électrique de la zone 5....	298
FIG.109 : Morphologie du substratum et nappes associées de Ranch de Léo zone 4.....	300
FIG.110a: Ranch de Léo zone4 : carte de résistivités apparentes.....	301
FIG.110b: Ranch de Léo zone4 : carte de résistivités apparentes simplifiées.....	302
FIG.111 : Corrélacion entre épaisseur d'altération et profondeur des zones décomprimées.....	306
FIG.112 : Comparaison des débits issus d'essais à l'air-lift et avec une pompe.....	306
FIG.113 : Ranch de Léo : courbes caractéristiques des essais de pompage	308
FIG.114 : Graphique des dépressions en fonction du temps. Cas d'une nappe captive avec une strate conductrice d'eau privilégiée....	312
FIG.115 : Essais de pompage de Mogtédo	
a. Courbes de descente ;	314
b. Courbes de remontée ;	314
c. Courbe de rabattement du forage F ;	315
d. Coupes géologiques des forages.....	315
FIG.116 : Pô : "Adduction d'eau 9 centres secondaires"	
Courbes d'essais de pompage.....	317
FIG.117 : Coupe des forages. Station expérimentale de l'ENSTP de Yamoussokro.....	320
FIG.118 : Circulation et mise en charge des eaux d'infiltration.....	323
FIG.119 : Mode de gisement des eaux souterraines dans le socle cristallin de Haute-Volta.....	325

LISTE DES TABLEAUX

	<u>pages</u>
Tab.1 Moyenne des précipitations-période 1971-1980	17
Tab.2 Moyenne des températures min/max.....	20
Tab.3 Moyenne des températures sous-abri (1971-1980).....	21
Tab.4 Répartition régionale des directions linéamentaires.....	38
Tab.5 Distribution des pics de fréquence.....	39
Tab.6 Distribution des pics fréquentiels de directions linéamentaires par degré carré ou par région.....	41
Tab.7 Moyenne des températures sous-abri (1971-1980).....	50
Tab.8 Moyenne de l'humidité relative sous-abri (1971-1980).....	51
Tab.9 Evaporation mesurée à Léo et à Koudougou en mm.....	51
Tab.10 Moyenne pluviométrique-période 1971-1980 et 1961-1970).....	52
Tab.11 Hauteurs d'eau journalières-station de Kounou (Sissili-1980).....	53
Tab.12 Barème d'étalonnage - Station de Nébou (Sissili) 1974	55
Tab.13 Jaugeages d'étalonnage réalisés au pont de Nébou en 1974.....	57
Tab.14 Débits mensuels à Nébou (Sissili-période 1974-1982).....	57
Tab.15 Evapotranspiration et Infiltration directe, estimation (1974)....	58
Tab.16 Débits moyens journaliers (m3/s)-Station Koriziena (Gorouol) (1974 et 1976).....	63
Tab.17a Migmatites et granites migmatitiques(% d'oxydes et de nb milliatomes).....	81
Tab.17b Composition virtuelle des migmatites	81
Tab.17c Migmatites - Paramètres de H. De La Roche.....	82
Tab.17d Migmatites - Paramètres CIPW et S.I. et A.F.M.....	82
Tab.18 Migmatites - Paramètres de H. De La Roche	83
Tab.18a Granites et aplites intrusifs.....	87
Tab.18b Granites et aplites-Paramètres de H. De La Roche.....	88
Tab.18c Granites et aplites-Paramètres de H. De La Roche	88
Tab.18d Granites et aplites-Paramètres CIPW et S.I. et A.F.M.....	88
Tab.18e Granites et aplites(Paramètres CIPW et S.I. et A.F.M.....	89
Tab.19 Granites Bondoukou. Composition en milliatomes et composition virtuelle.....	90
Tab.19b Migmatites, granites Baoulés, gneiss et migmatites. Composition en milliatomes et composition virtuelle.....	91
Tab.20a Roches basiques. Composition chimique en % d'oxydes et en milliatomes.....	95
Tab.20b Roches basiques. Composition virtuelle	96
Tab.20c Roches basiques. Paramètres de H. De La Roche.....	96
Tab.20d Roches basiques. Paramètres C.I.P.W. Lacroix et S.I. A.F.M.....	96
Tab.21a Faciès intermédiaires. Composition chimique en % oxydes et milliatomes.....	97

	<u>PAGES</u>
Tab.21b	Faciès intermédiaires. Paramètres H. de la Roche..... 98
Tab.21c	Composition virtuelle..... 98
Tab.21d	Faciès intermédiaires. Composition virtuelle et paramètres CIPW Lacroix et S.I. , A.F.M..... 98
Tab.22	Résultats obtenus 102
Tab.23	Radiodatations, . Partie occidentale et centrale de la dorsale Réguibat, ainsi qu'au Libéria 104
Tab.24	Bassin versant de la Sissili. Perméabilités induites..... 129
Tab.25	Environs de Pô. Perméabilités induites.....132
Tab.26	Ranch d'embouche de Léo. Perméabilités induites.....135
Tab.27	Fréquences des débits élevés rencontrés dans les différentes for- mations cristallines de Haute-Volta.....149
Tab.28	Eaux des formations du socle cristallin de Haute-Volta.....152
Tab.29	Caracteristiques moyennes des eaux du socle cristallin de Haute- Volta.....156
Tab.30	Caracteristiques moyennes des eaux du bassin versant de la Sissili.156
Tab.31	Eaux du bassin versant de la Sissili (milliequivalent).....157
Tab.32	Eaux issues de l'ensemble des formations cristallines de Haute-Volta.....158
Tab.33	Eaux du bassin versant de la Sissili.....158
Tab.34	Quelques eaux du Nord, du Centre-Nord et du Sahel (mèq.).....159
Tab.35	Eaux de roches basiques (mèq.).....160
Tab.36	Eaux de surface (mèq.).....161
Tab.37	Eaux carbonatées magnésiennes et chlorurées des roches basiques...161
Tab.38	Eaux de surface et de pluie.....161
Tab.39	Caracteristiques moyennes des eaux de pluie et de surface.....162
Tab.40	Tableau de variation des teneurs en ions chlore dans les eaux de pluie d'Accra (Akitti T.,1980).....175
Tab.41	Caracteristiques hydrochimiques des pricipaux types d'eau de Cote d'Ivoire. J.P. Faillat (P.I.C.G.,1981).....180
Tab.42	Composition chimique moyenne des roches et de la cuirasses.....182
Tab.43	Concentrations des eaux (Cl,NH ₄ ,NO ₂ ,NO ₃ ,NO ₂ +NO ₃) par localités....184
Tab.44	Teneur en tritium dans les précipitations à Bamako.....193
Tab.45	Precipitations tombées à Léo de 1976 à 1980193
Tab.46	Variations des niveaux piézométriques et des teneurs en ³ H dans la zone 5 du ranch de Léo.....195
Tab.47	Variations des teneurs en tritium et en oxygène 18 (Moghtedo et Zigla).....195
Tab.48	Teneurs en tritium et en O ¹⁸ des eaux souterraines depuis 1975 en Haute-Volta.....197
Tab.49	Variations des teneurs en tritium et en oxygène 18. (essai de pompage à Zigla - 1978).....192

Tab.50	Concentrations en O ¹⁸ des eaux de mares et de forages dans l'Oudalan (Hydrogé, 1970).....201
Tab.51	Sahel de Haute-Volta, repartition de 182 puits et forages en fonction de leur debit et de leur distance D, à une faille aeromagnetique (d'après J.L. Astier - F.A.O. 1981).....224
Tab.52	Profondeur d'investigation en fonction de la resistivite.....229
Tab.53	Tableau de correlation entre les cuirasses lateritiques de l'Afrique Occidentale (Sénégal-Gambie, Mali, Haute-Volta).....281

BIBLIOGRAPHIE

- AKITTI T.T. (1980).- Etude géochimique et isotopique de quelques aquifères au Ghana: Gneiss de la plaine d'Accra, Calcaire de la plaine du Sud-Est de la Volta, granites de la Haute Région.
Thèse Ingénieur-Docteur, Paris XI, 1980.
- ARNOULD M. (1961).- Etude géologique des migmatites et des granites précambriens du Nord-Est de la Côte d'Ivoire et de la Haute-Volta méridionale.
B.R.G.M. (Mémoire n°3).
- ASTIER J.C. (1977).- Géophysique appliquée à l'hydrogéologie.
Masson et Cie, Paris.
- ASTIER J.C. (1981).- Evaluation et révision des études géophysiques au sahel de Haute-Volta en vue de l'implantation de forages d'eau.
F.A.O. - Division de mise en valeur des terres et des eaux.
- ASTIER J.C., SAVADOGO N.A., OUEDRAOGO N. (1983).- Intérêt hydrogéologique des cartes aéromagnétiques dans les régions cristallines et métamorphiques.
Bulletin B.R.G.M., n°1, 1983.
- BAHR J.M. (1980-1981).- Les ressources en eau souterraines au Mali (Afr. Oc.) - Quatre études régionales.
Bulletin B.R.G.M., n°4, 1980-1981.
- BAKALOWIEZ (1979).- Contribution de la géochimie à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification.
Thèse ès-sciences, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- BARD J.P. (1974).- Les grands accidents des cratons ouest-africain en Côte d'Ivoire: les décrochements post-éburnéens ?
C.R.A.S.
- BARD J.P. et LEMOINE S. (1974).- Relations entre tectonique, métamorphisme et mise en place des granitoïdes à deux micas : dans le craton ouest africain de Côte d'Ivoire.
C.R.A.S. Paris.
- BENKHELIL J. (1979).- Relations entre la structure et le réseau hydrographique sur substratum granitique et schisteux. (Région de Dimbokro Côte d'Ivoire).
- BENTZ A. (1963).- Quelques considérations sur les formules utilisées pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle.
Bull. Institut Agronomique et des Stations de Recherches de Gembloux, T. XXXI, n°2.
- BERGER J., CAMERLO J., FAHY J.C., HAUBERT M. (1980).- Etude des ressources en eaux souterraines dans une région du socle cristallin: la "Boucle du cacao", Côte d'Ivoire.
- BERKALOFF E. (1970).- Interprétation des pompages d'essai. Cas des nappes captives avec une strate conductrice d'eau privilégiée
Bulletin B.R.G.M., n°1.
- BERNARDI A. et MOUTON J. (1980).- Les recherches d'eau dans le socle africain Apport de la géophysique.
Bulletin B.R.G.M., n°4.
- BESSELES B. (1977).- Géologie du Craton ouest africain.
Mémoire B.R.G.M., n°88
- BLACK (1967).- Sur l'ordonnance des chaînes métamorphiques en Afrique Occidentale.
Chronique minière et Recherche minière. Paris.
- BLES J.L., FEUGA B. (1981).- La fracturation des roches
B.R.G.M. - Manuels et méthodes, 1981.
- BONHOMME M. (1961).- Ages absolus dans le massif granitique de Bouna en Haute-Volta et dans le granite de Windéré en Côte d'Ivoire.
C.R.A.S., 1961.
- BONHOMME M. (1962).- Contribution à l'étude géochronologique de la plateforme de l'Ouest africain.
Thèse ès-sciences, Clermond-Ferrand.
- BONNET M. (1970).- Critique de la notion d'essais de puits.
Bulletin B.R.G.M., n°1.
- BOURGEOIS M. (1980).- Cartes de planification des ressources en eau de la Côte d'Ivoire, du Ghana, du Togo, du Bénin et du Cameroun.
Bulletin B.R.G.M., n°4.
- BOURGUET L., CAMERLO I., FAHY I.C., VAILEUX Y. (1981).- Méthodologie de la recherche hydrogéologique en zone du socle cristallin.
B.R.G.M. (Bulletin n°4)
- CAMPERON R., CELLES J.C., LEPAGE A., LEBRUN J.C. (1982).- Essai de cartographie automatisée dans un secteur sahélien, influence des facteurs pédologiques et phyto-sociologiques.
B.R.G.M. (Bulletin n°4)
- CASTANY G. (1967).- Traité pratique des eaux souterraines.
Masson et Cie - Paris
- CASTANY G. (1966).- Prospection d'exploitation des eaux souterraines.
Masson et Cie - Paris
- CASTANY G. et MARGAT (1981).- Dictionnaire français d'hydrogéologie.
Edition B.R.G.M., 1981.
- CONSTANTINIDIS D., SARROT REYNAULD J. (1978).- Comparaison des méthodes de détermination du coefficient d'emmagasinement des nappes aquifères.
C.R. du 103e Congrès National des Sociétés Savantes Nancy 1978.

- DE JONG S.J., DIRKS F.J.H., KIKIETA A. (1980).- Expérimentation des méthodes électromagnétiques appliquées à la recherche des eaux souterraines en terrain de socle cristallin en Haute-Volta.
Bulletin de Liaison du C.I.E.H., 1980.
- DELAQUAISE B., FOURNEAUX J.C., LEGUY et SARROT-REYNAULD J. (1979).- Nature et mode de circulation des eaux rencontrées dans les roches fissurées par les galeries récentes dans les Alpes Françaises.
C.R. du 104e Congrès National des Sociétés Savantes, Bordeaux 1979.
- DIRKS F., GEIRMAERT W., GROEN M. (1983).- Electromagnetic profiling in the investigation of small scale groundwater flow systems
C.R. Réunion A.I.E.H.
- DUCELLIER J. (1963).- Contribution à l'étude des formations cristallines et métamorphiques du Centre et du Nord de la Haute-Volta.
Mémoire B.R.G.M., n°10.
- ENGALENC M., SAVADOGO N.A. (1975).- Rôle de la fracturation dans la recherche des eaux souterraines dans les granites de l'Afrique occidentale.
Bulletin de liaison du C.I.E.H., n°20.
- ENGALENC M. (1978-1979).- Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest.
Volume 1 et 2.
- ENGALENC M. (1978).- Modalités de la recherche d'eau dans les roches cristallines fracturées de l'Afrique de l'Ouest.
Journées techniques du C.I.E.H., Togo, 1978.
- FAHY J.C. (1980-1981).- Exploitation et entretien des points d'eau villageois en Côte d'Ivoire.
Bulletin B.R.G.M., n°4, 1980-1981.
- FAILLAT J.P. (1981).- Description statistique et interprétation d'une série d'analyses hydrochimiques d'eaux des terrains éruptifs et métamorphiques de la Côte d'Ivoire.
5ème Réunion, P.I.C.G., Accra, 1981.-
- FAILLAT J.P., LEBLOND (1983).- Premiers résultats des essais sur une station de pompage expérimentale en Côte d'Ivoire.
- FOURNEAUX J.C., SARROT-REYNAULD J. (1977).- Déficit d'écoulement et évapotranspiration dans les Alpes du Nord.
102e Congrès National des Sociétés Savantes, Limoges.
- FRANCISS F.O. (1970).- Contribution à l'étude du mouvement d'eau à travers les milieux fissurés.
Thèse Docteur Ingénieur, Grenoble I.
- FRANÇOIS J.R. (1980).- Contribution à l'étude de la structure profonde des magasins fissurés.
Thèse 3ème cycle, Montpellier 1980.
- FURON R. (1969).- Géologie de l'Afrique.
Edition Payot-Paris.

- GAMSONRE E.P. (1975).- Contribution à l'étude géologique des formations précambriennes de la région de Ouahigouya (Haute-Volta).
Thèse Doctorat ès-sciences, Université de Besançon.
- GEORGES B. (1968).- Rôle de l'analyse du modelé latéritique dans la prospection des nappes d'eau souterraine en Afrique Occidentale.
Bulletin B.R.G.M., n°2.
- GRILLOT J.C. (1979).- Un exemple d'analyse quantitative à l'échelle régionale des champs de fractures et de leur interprétation tectonique.
- GRILLOT J.C. (1979).- Structure des systèmes aquifères en milieu fissuré
Contribution méthodologique à cette connaissance.
Thèse Doctorat ès-science Montpellier, 212 p.
- GRINGARTEN A.C. (1980).- A methode of analysing pump test data from fractured aquifers.
Int. Association of Engineering Géology, 1980.
- GRINGARTEN A.C. (1982).- Flow-test evaluation of fractured reservoirs.
Geological Society of America, Special paper 189.
- GUERIN R., AGALEDES P. (1977).- Relations entre la tectonique cassante et la géométrie des écoulements dans un massif de roches grenues. Les anorthites de Morin (Québec).
- H.E.R. (1976-1977).- Alimentation en eau de 9 centres secondaires. Compte-rendu d'exécution des travaux 1976-1977.
- HYDROGEO-ROMA (PNUD) (1971).- Recherches hydrogéologiques dans le Nord de la Haute-Volta.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - VIENNA.- Statistical treatment of environmental isotope data in precipitation.
- JAMIER D. (1975).- Etude de la fissuration, de l'hydrogéologie et de la géochimie des eaux profondes dans les massifs du Mont-Blanc et de l'Arpille.
Thèse Doctorat ès-sciences - Neuchâtel.
- LEFEVRE M.J. (1982).- Recherche minière par la méthode de traitement d'images.
Bulletin Société Géologique de France
- LEGUY C. (1979).- Application des mesures isotopiques des teneurs en tritium à l'étude des circulations et des mélanges des eaux souterraines dans différents milieux poreux.
Thèse 3ème cycle - Grenoble I.
- LELONG F. (1966).- Régime des nappes phréatiques contenues dans les formations d'altérations tropicales. Conséquences pour la pédogenèse.
Sciences de la Terre, tome XI, n°2.
- LE PRUN J.C. (1979).- Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique Occidentale sèche. Genèse, transformation, dégradation.
- LE PRUN J.C., ROY-NOEL J. (1976).- Minéralogie des argiles et répartition des nids épigés de deux espèces du genre Macrotermes au Sénégal Occidental (Presqu'Ile du Cap Vert).
Journal International pour l'Etude des Arthropodes sociaux, T. 23, n°4.

- MABILLOT A. (1980).- Le forage d'eau. Guide pratique
Fitres-Crépines JOHNSON S.A.
- MARTY R. (1967).- Calcul en écoulement linéaire du comportement de la pression d'une nappe soumise ou non au phénomène de drainance.
Bulletin B.R.G.M., n°12.
- MATHIEZ et HUST (1966).- Prospection géophysique et recherche d'eau souterraines. Exemples d'application en Afrique Occidentale.
Mémoire C.I.E.H.
- OUADRAOGO O.F. (1974).- Note sur les travaux de recherches géologiques effectuées sur le degré carré de Boulsa.
Rapport inédit.
- PIOM J.C. (1979).- Altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale sèche. Etude de quelques toposéquences en Haute-Volta.
Thèse de Doctorat ès sciences Université Louis Pasteur de Strasbourg.
- RAGUIN E. (1976).- Géologie du granite.
Masson - Paris.
- RAPP M. (1971).- Cycle de la matière organique et des éléments minéraux dans quelques écosystèmes méditerranéens.
R.C.P. du C.N.R.S., n°40, p. 183-185.
- RAZACK M. (1980).- Contribution à l'étude de la structure des aquifères en roches fissurées. Numérotation et analyse quantitative de la fracturation relevée sur clichés aériens.
Bulletin B.R.G.M., n°13.
- ROCHA M., FRANCISS F. (1977).- Determination of permeability in anisotropic rock-masses from integral samples.
Rocks mechanics 9, 67-93.
- ROQUES M. (1951) - Observations nouvelles sur le Précambrien de l'Afrique Occidentale française et du Togo.
- SAGATZKY J. (1950).- Notice explicative sur la feuille de Tonkodogo Ouest.
- SARROT-REYNAULD S. et SARROT-REYNAULD J. (1977).- Alimentation des nappes et mélanges des eaux souterraines: origine des eaux souterraines dans la plaine de Bourg-d'Oisans (Vallée de la Romanche - Isère).
C.R. 102° Congrès National des Sociétés Savantes-Limoges.
- SARROT REYNAULD S. et SARROT REYNAULD J. (1981).- Circulation des eaux dans les roches fissurées. Hydrogéologie du massif des Grandes Rousses (Alpes Françaises).
C.R. 106e Congrès National des Sociétés Savantes-Perpignan
- SAVADOGO N.A. (1975).- Hydrogéologie du bassin versant de la Haute-Sissili (Haute-Volta).
Thèse 3e cycle-Université Grenoble I.
- SAVADOGO N.A. (1978).- La géophysique appliquée à la recherche d'eau dans les formations cristallines de Haute-Volta.
Bulletin de liaison du C.I.E.H. n°35, 1978.

- SAVADOGO N.A. (1983).- Hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta. Fracturation, perméabilités induites, productibilité hydraulique des formations géologiques du bassin versant de la Sissili.
108e Congrès National des Sociétés Savantes Grenoble.
- SAVADOGO N.A. et SARROT REYNAULD J. (1983).- Utilisation des nouvelles données isotopiques et chimiques pour la connaissance du mode d'alimentation des nappes du socle cristallin de Haute Volta.
108e Congrès National des Sociétés Savantes - Grenoble,
- SCHOELLER H. (1981).- Relation entre la concentration en chlore des eaux souterraines et les échanges avec les terrains qui les renferment.
C.R.A.S., t. 232, page 1432-1234
- SCHOELLER H. (1963).- Classification géochimique des eaux.
Publication n°64, A.I.H.S. Berkeley.
- SCHOELLER H. (1962). - Les eaux souterraines.
Masson et Cie - Paris.
- SEDDOH F. (1969).- Sur l'altération des granites à biotite du massif de Luzy (Morvan méridional).
Bulletin Société Géologique de France.
- SEDDOH F. (1969).- Sur l'évolution des biotites et la formation d'intergrades de 14 Å (vermiculite, chlorite) dans les arènes granitiques de Tazilly (Morvan méridional).
C.R.A.S. 1969.
- SEDDOH F., PEDRO G. (1970).- Sur le comportement des feldspaths potassiques au sein du milieu superficiel: origine de leur altérabilité dans les zones de contact entre granites porphyroïdes et leucogranites du massif de Luzy (Morvan).
Bulletin Société Géologique de France.
- SEGUIN M.K. (1971).- La géophysique et les propriétés physiques des roches.
Les Presses de l'Université Laval-Québec.
- TAGINI (1971).- Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire - Essai géotectonique régional.
Thèse ès-sciences, Université de Lausanne, 1971.
- TARDY Y. (1969).- Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique.
Mémoire du Service de la Carte Géologique d'Alsace-Lorraine, n° 31.
- TEGGEY M. (1979).- Utilisation de la géochimie majeure pour la cartographie des terrains cristallins.
Documents B.R.G.M., n°12.
- UNESCO (1971).- Tectonique de l'Afrique
- YACE I. (1976).- Le volcanisme éburnéen dans les parties centrale et méridionale de la chaîne précambrienne de Fettekro en C.d'Ivoire.
Thèse Doctorat-Sciences Université Nationale de C d'Ivoire.

LISTE DES SIGLES UTILISES

A.I.E.A.	Agence Internationale de l'Energie Atomique
A.V.V.	Aménagement des Vallées des Volta (Autorité)
B.R.G.M.	Bureau de Recherche Géologique et Minière (France)
BU.VOG.MI	Bureau Voltaïque de la Géologie et des Mines
C.G.G.	Compagnie Générale de Géophysique (France)
C.I.E.H.	Comité Interétat d'Etudes Hydrauliques
F.R.D.	Fond de Développement Rural
H.E.R.	Hydraulique et Equipement Rural (Direction)
I.S.P.	Institut Supérieur Polytechnique
I.W.A.C.O.	International Water Consult
O.R.D.	Organisme Régional de Développement
U.F.C.	Union Fraternelle des Croyants

TABLE DES MATIERES

	PAGES
Introduction.....	9
1-APERCU SUR LA GEOGRAPHIE ET LA GEOLOGIE DU SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE VOLTA.....	11
1.1-Aperçu géographique du socle.....	13
1.1.1. Situation géographique.....	13
1.1.2. Le relief.....	13
1.1.3. Hydrographie.....	13
1.1.4. Climatologie	14
1.1.4.1. Les sous-zones climatiques.....	14
1.1.4.2. Mécanisme de l'alternance saisonnière.....	15
1.2-Aperçu sur la géologie du socle cristallin de Haute Volta.....	23
1.2.1. Introduction.....	23
1.2.2. Les formations granito-migmatitiques.....	24
1.2.2.1. Les formations gneissiques diversifiées.....	24
1.2.2.2. Les leptynites et migmatites leptyniques.....	25
1.2.2.3. Migmatites à biotite, migmatites à biotite-amphibole..	25
1.2.2.4. Migmatites et granites indifférenciés.....	25
1.2.3. Les formations volcano-sédimentaires épi-à mésométamorphi- ques des sillons	26
1.2.3.1. Le groupe métavolcanique et volcano-sédimentaire basal	26
1.2.3.1.1. Laves et pyroclastes.....	26
1.2.3.1.2. Les métasédiments associés.....	27
1.2.3.1.3. Intrusions subvolcaniques de diorites ou micro- diorites quartziques.....	27
1.2.3.2. Le groupe métasédimentaire terminal	29
1.2.4. Les roches plutoniques	29
1.2.4.1. Les formations basiques	29
1.2.4.2. Les plutonites communes aux noyaux migmatitiques et aux sillons	29
1.2.4.2.1. Le complexe granodioritique à tonalitique	30
1.2.4.2.2. Les granites syn- à tardi tectoniques.....	31
1.2.4.2.3. Le complexe alcalin ou à tendance alcaline	32
1.2.5. Stratigraphie et évolution géographique du socle cristallin	33
1.2.5.1. Les formations libériennes de Haute-Volta.....	33
1.2.5.2. Les formations éburnéennes.....	34
1.2.6. Aperçu tectonique du socle	35
1.2.6.1. L'orogénèse libérienne	35
1.2.6.2. L'orogénèse éburnéenne.....	36
1.2.6.3. Analyse fréquentielle des directions linéamentaires....	36
1.2.6.4. Mobilité relative des compartiments du bedrock fissuré	44
2- ETUDE REGIONALE DU BASSIN VERSANT DE LA SISSILI	47
2.1-Aperçu sur la géographie du bassin versant de la Sissili.....	49
2.1.1. Introduction.....	49
2.1.2. Le relief	49
2.1.3. Le réseau hydrographique	49
2.1.4. La végétation, la faune	50
2.1.5. Le climat	50
2.1.5.1. La température	50
2.1.5.2. L'humidité et l'évaporation.....	51

	<u>Pages</u>
2.1.5.3. Les vents.....	51
2.1.5.4. Les précipitations.....	52
2.1.5.5. Le ruissellement	52
2.1.5.6. Le déficit d'écoulement	59
2.1.5.7. L'évapotranspiration.....	59
2.1.6. Déficit d'écoulement dans le bassin versant du Goroual de l'Oudalan.....	62
2.1.6.1. Situation géographique.....	62
2.1.6.2. Précipitations	62
2.1.6.3. Le déficit d'écoulement	62
2.2- Géologie du Bassin versant de la Sissili.....	65
2.2.1. Les travaux antérieurs	65
2.2.2. Les travaux réalisés	65
2.2.3. Géologie du bassin versant de la Sissili	65
2.2.3.1. Les migmatites.....	67
2.2.3.2. Les granites	69
2.2.3.3. Les roches basiques	71
2.2.3.4. Les filons de pegmatites, de quartz et d'aprites.	73
2.2.3.5. Les enclaves	73
2.2.3.6. Indices de minéralisation.....	74
2.2.4. Etude géochimique	74
2.2.4.1. Etude géochimique	74
2.2.4.1.1. Présentation et traitement des analyses.....	74
2.2.4.1.2. Les migmatites.....	76
2.2.4.1.3. Les granites et les aprites	85
2.2.4.1.4. Les roches basiques et les faciès intermédiaires.....	94
2.2.4.2. Essai radiochronologique.....	100
2.2.5. Etude tectonique du bassin versant de la Sissili.....	107
2.2.5.1. Méthodes d'étude	111
2.2.5.2. Fracturation et perméabilité	125
2.2.5.2.1. Le champ de perméabilité	126
2.2.5.2.2. Principe de la méthode	126
2.2.5.2.3. Mode opératoire	128
2.2.5.2.4. Présentation et analyse des résultats.....	128
2.2.5.2.5. Relation entre direction des axes de perméabilité induite maximale et le dessin du réseau hydrographique	128
2.2.5.2.6. Perméabilités induites et échelle de levé des linéaments	137
2.2.5.2.7. Portée de l'effet d'induction des fractures....	137
2.2.5.2.8. Relation entre les variations spatiales des perméabilités induites et la composition pétrographique	138
2.2.5.3. Géologie et densité du réseau hydrographique....	138
2.2.5.4. Comparaison avec des résultats obtenus dans les régions voisines	141
2.2.6. Comportement hydrogéologique des diverses formations du bassin versant de la Sissili	144
2.2.6.1. Pétrographie, fracturation et productibilité hydraulique	144
2.2.6.1.1. Les faciès pétrographiques du bassin versant de la Sissili et leur état de fissuration en petit....	144
2.2.6.1.2. Conclusions.....	148
2.2.7. Etude géochimique et isotopique des eaux	150
2.2.7.1. Introduction	150
2.2.7.2. Caractéristiques moyennes des eaux du socle cristallin de Haute-Volta	150
2.2.7.3. Chimie des eaux du bassin versant de la Sissili et du Nord	156

	<u>Pages</u>
2.2.7.3.1. Caractéristiques générales et classification.....	156
2.2.7.3.2. Origine des substances dissoutes.....	166
2.2.7.3.2.1. Géochimie des altérations.....	166
2.2.7.3.2.2. Origine des substances dissoutes.....	170
2.2.7.3.2.3. Apport de la chimie des eaux à la connaissance de la nature du substratum et du mode d'alimentation des nappes	183
2.2.7.3.2.4. Conclusions.....	187
2.2.7.4. Etude isotopique des eaux	189
2.2.7.4.1. Introduction	189
2.2.7.4.2. Rappel de principes	189
2.2.7.4.3. Analyses des résultats.....	193
2.2.7.4.4. Conclusion	203
3-METHODES D'ETUDE ET D'EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES DANS LES FORMATIONS DU SOCLE CRISTALLIN	205
3.1- Localisation des ressources en eaux souterraines	
l'étude des indices biologiques	207
3.1.1. Introduction.....	207
3.1.2. Les termites.....	209
3.1.3. Les végétaux hygrophyles	212
3.1.4. Comparaison avec d'autres études menées dans les régions voisines	217
3.2- Géophysiques appliquée à l'hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta	219
3.2.1. La prospection géophysique: une nécessité pour une implantation correcte des ouvrages de captage d'eau dans les régions cristallines	219
3.2.2. Bref historique des travaux de géophysique appliquée à la recherche d'eau en Haute-Volta.....	220
3.2.3. Les méthodes géophysiques mises en oeuvre dans les formations du socle en Haute-Volta.....	220
3.2.3.1. Aéromagnétisme et hydrogéologie.....	221
3.2.3.2. La prospection électromagnétique à la recherche d'eau dans les formations du socle cristallin de Haute-Volta.....	227
3.2.3.2.1. Principe et appareils utilisés.....	227
3.2.3.2.2. Variations des débits avec l'importance des couloirs d'anomalie.....	232
3.2.3.3. Prospection électrique et hydrogéologie du socle cristallin.....	235
3.2.3.3.1. Les sondages électriques.....	236
3.2.3.3.2. Le trainé électrique.....	249
3.2.3.3.3. Les sondages pluridirectionnels.....	260
3.2.3.3.4. Les méthodes du rectangle et du dispositif carré.....	265
3.3- Les ouvrages de captage d'eau dans les formations du socle cristallin de Haute-Volta.....	269

4-HYDROGEOLOGIE DU SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE-VOLTA.....	275
4.1- Les travaux réalisés.....	277
4.2. Mode de gisement des eaux souterraines	279
4.2.1. Géomorphologie et nappes superficielles	280
4.2.2. La nappe des alluvions	297
4.2.3. Les nappes profondes	297
4.2.3.1. Les facteurs de productivité des nappes profondes	303
4.2.3.2. Productivité et caractéristiques hydro-	
dynamiques des aquifères: les essais de pompage.....	305
4.2.3.3. Circulation des eaux souterraines, mode de	
réalimentation des nappes.....	323
5 - CONCLUSIONS GENERALES	327
Liste des Figures	333
Liste des tableaux.....	337
Bibliographie.....	340
Liste des sigles utilisés.....	346



Titre de l'ouvrage :

**GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE
DU SOCLE CRISTALLIN DE HAUTE-VOLTA
Etude régionale du bassin versant de la Sissili**

Nom de l'auteur : Alain Nindaoua SAVADOGO

Etablissement : Université Scientifique et Médicale de Grenoble

RESUME

Les formations cristallines de Haute-Volta sont stériles à l'état sain, et les régions qu'elles occupent n'ont pour réservoirs aquifères que les couches d'altérites, les filons de quartz et la frange fissurée du substratum.

— *L'étude régionale* du bassin versant de la Sissili et celle de nombreux autres secteurs des régions du socle permettent d'aborder les problèmes de mode de gisement, de réalimentation, de la prospection et de l'exploitation des eaux souterraines des formations cristallines.

— *Le bassin versant de la Sissili* est occupé par des migmatites recoupées par des amphibolites, des granites et des dolérites. Migmatites et granites ont un chimisme voisin de celui des granites calco-alcalins communs. Les âges isotopiques supérieurs à 3000 Ma, obtenus au K/Ar sur les minéraux, indiquent que les migmatites, les amphibolites et les granites orientés appartiennent au Libérien. Les dolérites sont panafricaines.

— *Les données des images des satellites, des photos aériennes et de terrain* permettent d'identifier les mégastructures ouvertes et drainantes. Celles-ci induisent des perméabilités faibles en dehors de leurs zones broyées. Elles s'accompagnent de poches d'eau plus ou moins étendues, séparées par des seuils.

— *La réalimentation des nappes superficielles et profondes* s'effectue par infiltration à partir de zones préférentielles et circulation à travers les altérites et la roche fissurée.

— *Les eaux se minéralisent* en fonction de leur distance de percolation et de la nature des formations traversées.

— *Les concentrations* en chlorure augmentent avec les difficultés de circulation. Les teneurs en tritium montrent que les précipitations rechargent les nappes même dans les régions nord recevant moins de 500 mm d'eau par an.

— *La localisation des zones broyées* se fait par prospection électrique et électromagnétique. L'influence des fractures sur les courbes de sondages électriques est étudiée.

— *La productivité hydraulique des ouvrages de captage* est liée aux facteurs d'hétérogénéité (fissuration en petit, filon de quartz et composition pétrographique) des roches.

MOTS-CLES

Haute-Volta ; Socle cristallin ; Age isotopique ; Fracturation ; Perméabilité induite ; Eaux souterraines ; Chimie isotopique ; Prospection électrique ; Productivité hydraulique.