

**BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (B.G.R.)**  
**(Office Fédéral des Géosciences et des Ressources Minérales)**  
**Hannover**

LIBRARY, INTERNATIONAL REFERENCE  
CENTRE FOR COMMUNITY WATER SUPPLY  
AND SANITATION (I.C.S.)  
P.O. Box 93150, 2300 AD The Hague  
Tel. (070) 814911 ext. 141/142

RN: 6062 / ish 2180

LO: 824 AFW 85

**COOPERATION TECHNIQUE**

**Projet N° 82.2060.0**

**EVALUATION HYDROGEOLOGIQUE DES PROJETS  
D'HYDRAULIQUE EN TERRAINS CRISTALLINS  
DU BOUCLIER OUEST AFRICAIN**

par :

**C. DILUCA**

Chef du Département Hydrogéologie  
et Hydraulique Villageoise du

Comité Interafricain  
d'Etudes Hydrauliques

B.P. 369 — OUAGADOUGOU  
Burkina Faso

**W. MULLER**

Hydrogéologue du

Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und  
Rohstoffe

Postfach 51.01.53  
D 3000 Hannover 51  
R.F.A.

Etude financée par :

**LE MINISTRE DE LA COOPERATION ECONOMIQUE  
DE LA REPUBLIQUE FEDERALE D'ALLEMAGNE (R.F.A.)**

**Février 1985**

824 AFW 85-  
2180

S O M M A I R E

	<u>Pages</u>
<u>AVERTISSEMENT</u>	
<u>RESUME</u>	
<u>I/ LES CONDITIONS NATURELLES</u>	1
I.1 CLIMAT ET VEGETATION	1
I.1.1. La répartition des précipitations	4
I.1.2. Les températures	4
I.1.3. L'évapotranspiration potentielle	6
I.2 HYDROGRAPHIE	6
I.3 LE CONTEXTE GEOLOGIQUE	8
I.3.1. Les roches éruptives acides	8
I.3.2. Les roches métamorphiques	8
I.3.3. Les roches intrusives basiques	11
I.4 LA TECTONIQUE	11
I.4.1. La tectonogénèse	11
I.4.2. Les directions de fracturation	13
I.5 LES ENSEMBLES HYDROGEOLOGIQUES	15
I.5.1. L'ensemble granito-gneissique	15
I.5.2. L'ensemble schisteux	18
<u>II/ TYPOLOGIE ET COUT DES OUVRAGES DE CAPTAGE</u>	18
II.1 TYPOLOGIE DES OUVRAGES	18
II.2 COUT DES OUVRAGES	21
II.2.1. Le forage villageois	21
II.2.2. Le puits moderne	21
II.2.3. Le puits réalisé à l'aide de matériel mécanisé	21
<u>III/ METHODE D'IMPLANTATION D'OUVRAGES</u>	24
III.1 PHOTO-INTERPRETATION ET TELEDETECTION	24
III.1.1. Photointerprétation	24
III.1.2. La télédétection	27

III.1.3. Corrélation entre photographies aériennes et imageries satellites.	28
III.1.4. Les directions de linéaments favorables	30
III.2 LA GEOPHYSIQUE	30
III.2.1. Rappel des techniques	30
III.2.2. Bilan de la contribution des méthodes géophysiques dans les programmes de forages.	33
III.3 LES TAUX DE REUSSITE ENREGISTRES SUR LES PROGRAMMES DE FORAGES.	37
III.3.1. Remarques préliminaires	37
III.3.2. Résultats des programmes	37
IV/ LES CONNAISSANCES SUR LES CAPACITES HYDRAULIQUES DU SOCLE.	42
IV.1 RAPPEL DU FONCTIONNEMENT DU SYSTEME AQUIFERE	42
IV.2 LES POTENTIALITES DE LA COUVERTURE D'ALTERATION	43
IV.2.1. Les résultats acquis	43
IV.2.2. Stratégie d'exploitation	45
IV.3 CAPACITE DU SOCLE FISSURE	46
IV.4 RELATION ENTRE AQUIFERES. UTILITE DES ESSAIS DE POMPAGE DE LONGUE DUREE.	48
IV.5 EXTENSION DES AQUIFERES DE FISSURE. REPRESENTATIVITE DES CARTES PIEZOMETRIQUES.	52
IV.6 RECHARGE DES AQUIFERES	52
IV.6.1. Estimation de la recharge par la méthodes des bilans hydrologiques.	52
IV.6.2. L'analyse des fluctuations des niveaux piézométriques	56
IV.6.3. L'utilisation des méthodes de datations isotopiques	62
IV.7 HYDROCHIMIE DU SOCLE	67
IV.7.1. Les faciès chimiques	67
IV.7.2. Stratification chimique. Mécanisme d'alimentation	67
<u>V/ ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES DE FORAGES</u>	72
V.1 RECUEIL DES DONNEES DE BASE	72
V.2 DONNEES TECHNIQUES RETENUES POUR L'ANALYSE STATISTIQUE	72
V.3 LES PRINCIPES DE L'ANALYSE STATISTIQUE	74
V.3.1. Les fréquences	74
V.3.2. Les corrélations	76

V.4 RESULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE	76
V.4.1. Les profondeurs moyennes d'ouvrages	76
V.4.2. Répartition des niveaux statiques	83
V.4.3. Répartition des débits spécifiques	84
V.4.4. Les épaisseurs d'altération et épaisseurs mouillées des altérations.	84
V.4.5. Corrélation entre paramètres de forage	89
VI/ PROPOSITIONS D'ACTIONS COMPLEMENTAIRES	97
VI.1 MISE EN PLACE D'UN RESEAU PIEZOMETRIQUE	97
VI.1.1. Mise en place du réseau	97
VI.1.2. Suivi du réseau.	98
VI.2 NORMALISATION DES PROCEDURES D'ESSAI DE DEBIT	98
VI.3 DEFINITION DE CRITERES HYDRAULIQUES DU MILIEU CRISTALLIN	100
VI.4 ANALYSE STATISTIQUE TYPE	101
VI.4.1. Etude de la répartition géographique des variables	101
VI.4.2. Analyse globale de la probabilité de succès	102
VI.5 MISE AU POINT D'UN CANEVAS-TYPE DE SYNTHESE DE DONNEES FOURNIES PAR LES PROGRAMMES DE FORAGE	103
BIBLIOGRAPHIE SECTORIELLE	105
A N N E X E S	109

---

LISTE DES TABLEAUX

	<u>Pages</u>
<u>Tableau 1</u> : Superficie couverte dans chaque Etat par les zones de socle cristallin.	3
<u>Tableau 2</u> : Résumé lithostratigraphique des séries précambriennes.	12
<u>Tableau 3</u> : Principales directions de fracturation du bouclier Ouest Africain.	14
<u>Tableau 4</u> : Légende de la carte hydrogéologique.	17
<u>Tableau 5</u> : Choix des types d'ouvrages, mode de réalisation en zone de socle cristallin du bouclier Ouest Africain.	23
<u>Tableau 6</u> : Pourcentage de succès en fonction de critères morphotectoniques d'implantation.	26
<u>Tableau 7</u> : Application des méthodes géophysiques en zone de socle cristallin.	32
<u>Tableau 8</u> : Comparaison des taux de réussite obtenus avec et sans géophysique préalable.	34
<u>Tableau 9</u> : Résultats de projets de forage.	38
<u>Tableau 10</u> : Procédures d'essai de débit entrepris dans le cadre du programme de forages réalisés dans le bouclier Ouest Africain.	47
<u>Tableau 11</u> : Effets perturbateurs. Résultats d'essais de pompage réalisés dans le cadre du projet ORD Sahel au BURKINA.	49
<u>Tableau 12</u> : Résultats d'essais de pompage de longue durée effectués en zone de socle cristallin.	50
<u>Tableau 13</u> : Temps de vidange d'une colonne d'eau en fonction du débit d'exhaure.	51
<u>Tableau 14</u> : Fluctuation de niveau des nappes en zone de socle cristallin du bouclier Ouest Africain.	57
<u>Tableau 15</u> : Analyse de fluctuations de niveau. Piézomètre du CIEH.	61
<u>Tableau 16</u> : Caractéristiques des isotopes et principales méthodes de géochimie isotopique utilisées en hydrogéologie.	63
<u>Tableau 17</u> : Résultats de mesures de datation isotopique sur les ouvrages effectués en zone du bouclier Ouest Africain.	66
<u>Tableau 18</u> : Répartition des ouvrages recensés pour l'analyse statistique.	71
<u>Tableau 19 à 25</u> : Statistique de valeurs moyennes des paramètres de forages par pays en fonction des formations géologiques.	77 à 80
<u>Tableau 26</u> : Résultats généraux de l'analyse statistique.	81

<u>Tableau 27</u>	: Graphiques de fréquences.	90 à 93
<u>Tableau 27.a</u>	: Zone granito-gneissique : NIGER, BURKINA, MALI.	
<u>Tableau 27.b</u>	: Zone granito-gneissique : COTE-D'IVOIRE, GHANA-SUD.	
<u>Tableau 27.c</u>	: Zone schisteuse : NIGER, BURKINA, MALI.	
<u>Tableau 27.d</u>	: Zone schisteuse : COTE-D'IVOIRE, GHANA-SUD.	
<u>Tableau 28</u>	: Analyse statistique : Etude de corrélations par pays.	94
<u>Tableau 29</u>	: Résultats du traitement statistique - Ghana Sud. Valeurs moyennes de paramètres et corrélations.	95
<u>Tableau 30</u>	: Résultats du traitement statistique - Ghana Nord. Valeurs moyennes de paramètres et corrélations.	96
<u>Tableau 31</u>	: Proposition de réseaux piézométriques en zone de socle cristallin.	99

LISTE DES FIGURES

Figure 1	: Carte schématique des grands ensembles géologiques.	2
Figure 2.a	: Carte de l'évapotranspiration potentielle annuelle (ETP).	5
Figure 2.b	: Carte de pluies moyennes et des températures moyennes annuelles.	5
Figure 3	: Esquisse géologique de l'Afrique de l'Ouest.	9
Figure 4	: Carte hydrogéologique de l'Afrique de l'Ouest.	16
Figure 5.a	: Forage villageois dans le socle cristallin.	19
Figure 5.b	: Forage AEP avec motopompe dans le socle cristallin.	19
Figure 5.c	: Forage villageois captant le socle et les altérations.	20
Figure 6	: Influence des critères morphologiques sur les taux d'échec d'ouvrages.	25
Figure 7	: Corrélations entre Images Landsat et photographies aériennes.	29
Figure 8	: Influence de la direction des linéaments sur les taux d'échec de forages.	31
Figure 9.a	: Relation résistivité apparente et débit des forages.	36
Figure 9.b	: Relation profondeur du socle sain et débit des forages.	36
Figure 10	: Carte de répartition des projets de forage. Taux de réussite - Epaisseur d'altération.	39
Figure 11	: Corrélation entre l'épaisseur d'altération et le taux de réussite des programmes de forage.	40
Figure 12	: Estimation de la recharge des aquifères. Simulation des fluctuations de la nappe du socle cristallin.	54
Figure 13	: Fluctuations piézométriques. Piézomètre du CIEH. BURKINA FASO.	58
Figure 14	: Fluctuations de niveau de la nappe. Projet HELVETAS - MALI.	59
Figure 15	: Influence de la profondeur du niveau statique sur le tarissement de la nappe.	60
Figure 16	: Données isotopiques en zone de socle cristallin.	64
Figure 17	: Résultats de traitement statistique de données chimiques au BURKINA.	68
Figure 18	: Corrélations chimiques au BURKINA.	69
Figure 19	: Répartition et numérotation des feuilles au 1/200.000ème et des régions concernées par l'étude statistique.	75
Figure 20	: Carte de profondeur moyenne des forages.	82

<u>Figure 21</u> : Carte de profondeur des niveaux statiques.	85
<u>Figure 22</u> : Carte de répartition des débits spécifiques.	86
<u>Figure 23</u> : Carte de l'épaisseur d'altération.	87
<u>Figure 24</u> : Carte de l'épaisseur d'altération mouillée.	88



LISTE DES ANNEXES

<u>Annexe 1</u> : Fiche signalétique de programmes de forage réalisés dans le bouclier Ouest-Africain.	110
1.1. Projet Liptako NIGER	110
1.2. Projet SAHEL 1ère phase BURKINA FASO	111
1.3. Projet SAHEL 1ère et 2ème phases BURKINA FASO	112
1.4. Projet 4ème FED - COTE-D'IVOIRE	113
1.5. Projet BSIE. Boucle du Cacao - COTE-D'IVOIRE	114
1.6. Projet CCCE. COTE-D'IVOIRE	115
1.7. Projet Liptako CCCE. NIGER	116
1.8. Projet 5ème FED. Yatenga Comoë - BURKINA FASO	117
1.9. Projet FED. Mandiana. N-E GUINEE CONAKRY	118
1.10. Projet KFW/RFA. GHANA SUD. 3000 WELL	119
1.11. Projet CIDA. Upper region. GHANA NORD	120
<u>Annexe 2</u> : Caractéristiques de projets de forages recensés pour l'analyse statistique.	121
<u>Annexe 3</u> : Exemple de fiches de données de base pour l'analyse statistique.	122
3.1. Projet 5ème FED. Yatenga Comoë - BURKINA FASO	122
3.2. Projet SAHEL 2ème phase BURKINA FASO	122
3.3. Projet HELVETAS. MALI	123
3.4. Projet 4ème FED. COTE-D'IVOIRE	123
3.5. Projet 3000 Well Drilling. GWSC. GHANA SUD	124
3.6. Projet Water Supply Project. CIDA. Upper region GHANA NORD	124
<u>Annexe 4</u> : Exemple de fiche d'inventaire des ouvrages utilisés pour l'analyse statistique.	125
<u>Annexe 5</u> : Termes de référence de l'étude.	126

## A V E R T I S S E M E N T

La Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe et le CIEH se réservent le droit d'usage du présent document. Toute reproduction, même partielle, de ce document fera l'objet d'une autorisation préalable délivrée par le B.G.R. et le C.I.E.H.

Les listings des données de base sont archivés au Centre de Documentation et d'Information du C.I.E.H. et au siège du B.G.R. sous le numéro d'archive 97560.

---

- R E S U M E -

Depuis le début de la Décennie Internationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement (1981-1990), de nombreux programmes de puits et forages ont été exécutés afin de répondre à l'urgence des besoins de l'hydraulique humaine.

Une grande partie de ces programmes concerne le bouclier Ouest Africain caractérisé par un ensemble de roches cristallines dont les degrés variés de fracturation ont permis la constitution de nappes de fissures. Ces systèmes aquifères discontinus occupent une grande partie de la superficie des pays concernés par l'étude, la fraction considérée de la surface totale varie de 100 % au Libéria à 25 % au Niger.

Afin de mieux concevoir les programmes futurs, il est apparu nécessaire d'entreprendre une réflexion sur les données fournies par les programmes récemment réalisés.

Dans ce cadre, la présente étude réalisée conjointement par le BGR et le CIEH aborde plusieurs aspects visant à aboutir à une meilleure connaissance des ressources en eau des zones cristallines du Bouclier Ouest Africain et à une gestion appropriée de ces ressources.

L'étude comprend à cet effet cinq parties :

- Un aperçu des conditions naturelles du Bouclier Ouest Africain : climat, végétation, hydrographie, géologie, hydrogéologie, tectonique.
- Une présentation des types d'ouvrages pouvant exploiter les différents aquifères.
- Un bilan de l'utilisation des méthodes d'implantation d'ouvrages : photointerprétation, télédétection, géophysique.
- Les connaissances acquises sur les capacités hydrauliques du socle cristallin : fonctionnement du système aquifère, capacités de la couverture d'altération, productivité des zones fracturées, recharges saisonnières et annuelles, exploitation de longue durée.
- Une analyse statistique de programmes de forages. Cette analyse a concerné un échantillon de 8233 forages recensés dans 7 pays du Bouclier Ouest Africain.

## CHAPITRE I : LES CONDITIONS NATURELLES

La région étudiée se situe en Afrique Occidentale, au Sud du 15ème parallèle entre les longitudes 10°E et 20°. et couvre les pays suivants : Guinée, Mali, Sierra Léone, Libéria, Burkina, Côte-d'Ivoire, Niger, Ghana.

Les précipitations varient de moins de 500 mm à plus de 4000 mm, du Nord au Sud et reflètent l'évolution d'un climat tropical à un climat sub-équatorial.

Cette région composée en grande partie de roches cristallines constitue le Bouclier Ouest Africain pénéplané et stable, peu affecté par la tectonique.

La tectonique cassante a affecté ces formations géologiques lors de plusieurs phases en imposant des directions privilégiées N-S et NE-SW. Ces directions préférentielles ont influencé le réseau hydrographique (Sassandra, Volta, ...).

Sur le plan hydrogéologique, on peut distinguer :

- L'ensemble granito-gneissique. Les taux d'échec de forages y varient de 30 % dans les granites syntectoniques à 70 % dans les granites récents tarditectoniques.

- L'ensemble schistogréseux à forte couverture d'altération et faible taux d'échec.

## CHAPITRE II : TYPOLOGIE DES OUVRAGES DE CAPTAGE

La grande majorité des ouvrages est constituée par le forage villageois captant les niveaux fissurés du socle cristallin.

Son coût est voisin de 2,5 millions de francs CFA pour une profondeur de 60 m environ.

Dans certaines conditions (vocation du point d'eau, choix des populations, ...), des puits modernes sont réalisés dans les altérations. Leur coût est de l'ordre de 2.000.000 F.CFA pour une profondeur de 20 m.

Si les conditions géologiques le permettent, des méthodes mécanisées permettent de réaliser des puits à des cadences très rapides (puits calweld, puits mécanisés).

### CHAPITRE III : LES METHODES D'IMPLANTATION

La photointerprétation et la télédétection constituent des outils indispensables à l'implantation d'ouvrages et permettent d'obtenir des taux de succès satisfaisants (90 % dans les schistes de la Boucle du Cacao en Côte-d'Ivoire). Si les critères morphotectoniques semblent être bien maîtrisés, la corrélation entre la photointerprétation (échelle variant entre le 1/15.000ème et le 1/50.000ème) et la télédétection (1/200.000ème) ne semble pas satisfaisante.

Parmi les différentes techniques de géophysique, la méthode électrique reste la plus utilisée. Sur 28 projets de forages recensés, 11 ont fait intervenir la géophysique électrique complétée dans 2 cas par la sismique.

La géophysique améliore sensiblement les taux de réussite et doit être utilisée systématiquement dans les formations tardo-tectoniques ou régénérées, moyennant l'application de règles d'implantation portant sur les directions de linéaments, les profondeurs de socle sain et la forme de l'anomalie.

Les taux de réussite rencontrés dans les différentes formations géologiques semblent augmenter avec la pluviométrie. Le seuil de 80 % est fréquemment dépassé au delà de 1.200 mm de pluie annuelle.

### CHAPITRE IV : LES CAPACITES HYDRAULIQUES DU SOCLE

Le modèle hydrodynamique est de type bicouche comprenant un niveau supérieur capacitif altéré et un niveau inférieur fracturé conducteur.

Des essais de pompage de longue durée (72 h) ont montré que le rôle de réserve du niveau altéré ne peut être maintenu que pour une hauteur d'aquifère de 8 à 10 m à l'étiage.

Les calculs ont montré qu'un pompage sollicite une fracture sur 200 m de long au bout de 40 h d'exploitation.

Les gammes de transmissivité sont généralement comprises entre  $10^{-6}$  et  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.

Sur le plan du comportement hydraulique du système bicouche, l'expérience des essais de pompage prolongés a démontré que, au delà de quelques heures de pompage (2 à 3 h), la descente du niveau est souvent perturbée par des effets de limite hydraulique (écran imperméable, front d'alimentation, drainance temporaire).

De plus, lors des essais de débit réalisés dans le cadre des programmes d'hydraulique villageoise, les faibles débits alliés aux mauvaises capacités hydrauliques, conduisent à des effets de citerne qui perturbent également la descente du niveau et faussent l'interprétation de ces essais de pompage.

Compte tenu de l'augmentation des besoins en eau, il est apparu nécessaire d'estimer le coefficient de recharge de ces aquifères pour aboutir à une exploitation appropriée des ressources. Les différentes estimations basées sur le calcul de l'évapotranspiration (ETP) et faisant intervenir des modèles de simulation du bilan hydrique élaborés par le CIEH aboutissent à des valeurs variant entre 6 à 18 %. Il convient de retenir une valeur pessimiste de la recharge de l'ordre de 6 % de l'apport annuel par les pluies dans des conditions pluviométriques voisines de 700 mm par an.

Le dosage des isotopes stables et radioactifs a montré que la recharge des aquifères est aléatoire dans les zones de pluviométrie annuelle inférieure à 700 mm. De plus, la recharge a lieu principalement au cours des mois où la précipitation est supérieure à 150 mm.

Sur le plan de l'hydrochimie des eaux, les eaux du socle cristallin sont faiblement minéralisées et de type bicarbonaté calcique. Les venues d'eau profondes sont caractérisées par des conductivités fortes et impliquent une notion de stratification des eaux.

#### CHAPITRE V : ANALYSE STATISTIQUE

Une étude statistique a été effectuée sur 8.233 ouvrages recensés dans 7 pays. Les résultats de cette analyse confirment que, sur le plan hydrogéologique, le socle peut être subdivisé en 2 grandes familles :

- Granites à granito-gneiss et roches acides
- Schistes et phyllites.

Les profondeurs moyennes des forages sont de 50 m.

Les niveaux statiques s'approfondissent à mesure que l'on s'approche de la zone sahélienne.

Les fortes valeurs de débit spécifique caractérisent les formations granito-gneissiques.

Sur le plan des corrélations entre paramètres de forage, aucune relation significative n'apparaît entre le débit spécifique de l'ouvrage et l'un des paramètres suivants :

- Epaisseur d'altération
- Pénétration dans le socle
- Hauteur d'eau dans les altérations.

#### CHAPITRE VI : PROPOSITION D'ACTIONS COMPLEMENTAIRES

A l'issue de la présente étude, un bilan a été effectué sur les connaissances acquises en zone de socle du bouclier Ouest Africain, il apparaît néanmoins indispensable, de recommander des actions à mettre en cours par les services nationaux ou bureaux de contrôle. Il s'agit de :

- Mise en place d'un réseau de surveillance piézométrique dans le but d'une gestion appropriée des ressources.

- Normalisation des procédures et des méthodes d'interprétation des essais de débit afin de permettre une réflexion sous-régionale (carte synthétique de ressources en eau, ...).

- Analyse statistique complémentaire : répartition de variables, probabilité de succès.

- Elaboration d'un canevas type de collecte de données fournies par les programmes de forages. Ce canevas permettra d'énumérer des paramètres jugés indispensables à une réflexion de synthèse à un niveau régional (indice de productivité, indice d'exploitabilité, débit spécifique normalisé).

---

## Summary:

Since the beginning of the International Decade of Potable Water and Sewage Disposal (1981 - 1990), numerous programs for dug and drilled wells have been carried out to cope with the urgency of man's needs for water.

Most of these programs deal with the West African Shield, which is characterized by a crystalline rock unit whose different degrees of fractioning permitted the formation of fissure aquifers. These Discontinuous aquifer systems cover a large part of the countries included in the study; the proportion of the total surface considered here varies from 100 % in Liberia to 25 % in Niger.

To obtain a better conception of the future programs, the data obtained by the programs recently carried out need to be reviewed.

Within this framework, the present study jointly carried out by the BGR and the CIEH includes several aspects which aim at obtaining a better knowledge of the water resources of the crystalline zones of the West African Shield and the appropriate management of these resources.

Therefore, this report consists of five parts:

- An overview of the natural conditions of the West African Shield: climate, vegetation, hydrography, geology, hydrogeology, and tectonics.
- A compilation of the types of wells that are suitable for the exploitation of the different types of aquifers.
- A list of the methods that can be used for siting the wells: aerial-photo interpretation, remote sensing, geophysics.
- The information acquired about the hydraulic properties of the crystalline basement: parameters of the aquifer system, properties of the weathered cover layer, productivity of the



fracture zones, seasonal and annual recharge, long-term exploitation.

- A statistical analysis of drilling programs. This analysis deals with data from 8233 drilled wells examined in 7 countries of the West African Shield.

### Chapter 1: Natural conditions

The study area is situated in West Africa south of the 15°N between the longitudes 10°E and 20°E and includes the following countries: Guinea, Mali, Sierra Leone, Liberia, Burkina Faso, Ivory Coast, Niger, and Ghana.

Precipitation varies between less than 500 mm and more than 4000 mm from north to south and reflects the transition from a tropical to a subequatorial climate.

Large parts of this region consist of crystalline rocks which form the peneplain and stable West African Shield and are little affected by tectonic processes.

The disrupting tectonic events have affected these geological formations during several phases, imposing preferentially NS and NE-SW directions upon them. These preferential directions have influenced the hydrographic network (e. g. the Sassandra and Volta Rivers).

The following two hydrogeological units can be distinguished:

- a unit of granitic gneiss, in which the rate of failure for drilled wells varies between 30 % in the syntectonic granites to 70 % in the young granites of late tectonic events and
- a unit of pelitic schists covered by a thick weathered layer, in which the rate of failure is low.

## Chapter 2: Types of wells construction

Almost all of the wells are for the rural water supply and are in fissure zones of the crystalline basement.

The cost of a 60 m well is approximately FCFA 2.5 million.

Under certain conditions (e.g. the geology at the site and decision by the inhabitants) modern wells are dug in the weathered zones. The costs are on the order of FCFA 2 000 000 for a well 20 m deep. If the geological conditions are favorable, mechanical methods permit the digging of wells very rapidly (e.g. Calweld wells and other mechanically dug wells).

## Chapter 3: Siting methods

Aerial-photo interpretation and remote sensing are indispensable tools for the siting of wells for which satisfying success rates (90 % in the schists of the Boucle du Cacao, Ivory Coast) may be expected. Even though the morphotectonic properties can possibly be well mastered, the correlation of maps obtained from photo interpretation (scales between 1 : 15 000 and 1 : 50 000) with those obtained with remote sensing methods (1 : 200 000) is obviously not satisfying.

Among the different geophysical methods, geoelectrics is still the most commonly used. Eleven of 28 drilling projects examined for this study were carried out using geoelectric methods, in two cases supplemented by seismic methods.

Geophysical methods improve the rate of success considerably and should be systematically used in late tectonic formations by applying siting rules taking into account the directions of lineaments, the depth of the hard rock and the shape of the anomaly.

The rates of success achieved in the different geological formations seem to increase with the rate of rainfall. A success rate of 80 % is frequently exceeded where the annual rainfall exceeds 1200 mm.

#### Chapter 4: Hydraulic properties of the basement

The hydrodynamic model is of the two-layered type including an upper weathered semi-confined zone and a lower, fractured conductive zone.

Long-term pumping tests (72 hours) have demonstrated that the water-retaining role of the weathered zone can only be maintained for a water column of 8 to 10 m at the lowest water level.

Calculations have shown that a fracture of 200 m length is needed for a pumping time of 40 hours.

Transmissivity ranges generally between  $10^{-6}$  and  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.

As to the hydraulic behavior of the two-layered system, long-term pumping tests have demonstrated that after more than a few hours of pumping (two to three hours), the drawdown curve often becomes irregular due to the effects of hydraulic barriers (e.g. impermeable layers, flow conditions, seasonal infiltration).

Moreover, the results of pumping tests carried out within the scope of the rural water supply programs show that in areas of low yield caused by low permeabilities, the interpretation of the pumping tests is distorted by the occurrence of the "cistern" effect.

Considering the increase in demand for water, it seems to be necessary to estimate the recharge coefficient of these aquifers so that these resources can be appropriately developed. The dif-

ferent estimations of this coefficient are based on the calculation of the evapotranspiration and the use of simulation models of the hydrological balance developed by the CIEH. Values between 6 and 18 % have been obtained. It is advisable to use the lower end of this range for the recharge, i.e. about 6 % of an annual rainfall of approximately 700 mm.

The determination of the amount of stable and radioactive isotopes has shown that in the zones with less than 500 mm rainfall, the recharge rate of the aquifers is very low. Moreover, the recharge takes place mainly during the months when precipitation exceeds 150 mm.

As to their hydrochemical composition, the waters of the crystalline basement are slightly mineralized and of the calcic-bicarbonatic type. The deep water inflow typically has a high conductivity and implies stratification of the water.

#### Chapter 5: Statistical analysis

A statistical study has been carried out on 8233 wells examined in 7 countries. The results of this analysis confirm that the basement can be subdivided into 2 large groups:

- granites to granitic gneisses and acidic rocks,
- schists and phyllites.

The average depth of the drilled wells is 50 m.

The depth to the water table increases with decreasing distance to the Sahel zone.

High specific capacity values are characteristic of the granitic gneiss formations.

As to the correlation of the well parameters, there is apparently no significant relationship between the specific capacity of a well and any of the following parameters:

- thickness of the weathered layer,
- penetration into the basement,
- water level in the weathered layer.

#### Chapter 6: Proposals for supplementary activities

At the end of this present study, conclusions are drawn from the results acquired on the basement zone of the West African Shield; nevertheless, it seems to be indispensable to recommend the following activities to be started by the national authorities or consulting firms:

- Setting-up of a piezometric monitor network so that the water resources can be appropriately managed.
- Standardization of the procedures and interpretation methods of the pumping tests so that an assessment of the entire region can be made (e.g. map of water resources).
- Supplementary statistical analysis (e.g. distribution of the variables and probability of success).
- Standardization of the methods of collection and recording of the data obtained in the drilling programs. When this acquisition scheme is used in all of the programs, the data for all of the parameters needed for an assessment of the water resources of the entire region (e.g. productivity, exploitability, and specific capacity) will be available.

## I/ LES CONDITIONS NATURELLES

La région étudiée (figure 1) se situe en Afrique occidentale, au Sud du 15<sup>ème</sup> parallèle, entre les longitudes 18° Est et 2° Ouest ; elle couvre tout ou partie des pays suivants, d'Ouest en Est :

Guinée - Mali - Sierra Leone - Liberia - Burkina Faso - Côte d'Ivoire - Niger - Ghana.

Ces pays couvrent une superficie totale de 3,9 millions de km<sup>2</sup> dont 1,948 millions de km<sup>2</sup> sont constitués de socle cristallin et métamorphique représentant environ 50 % de la superficie totale (cf. tableau 1).

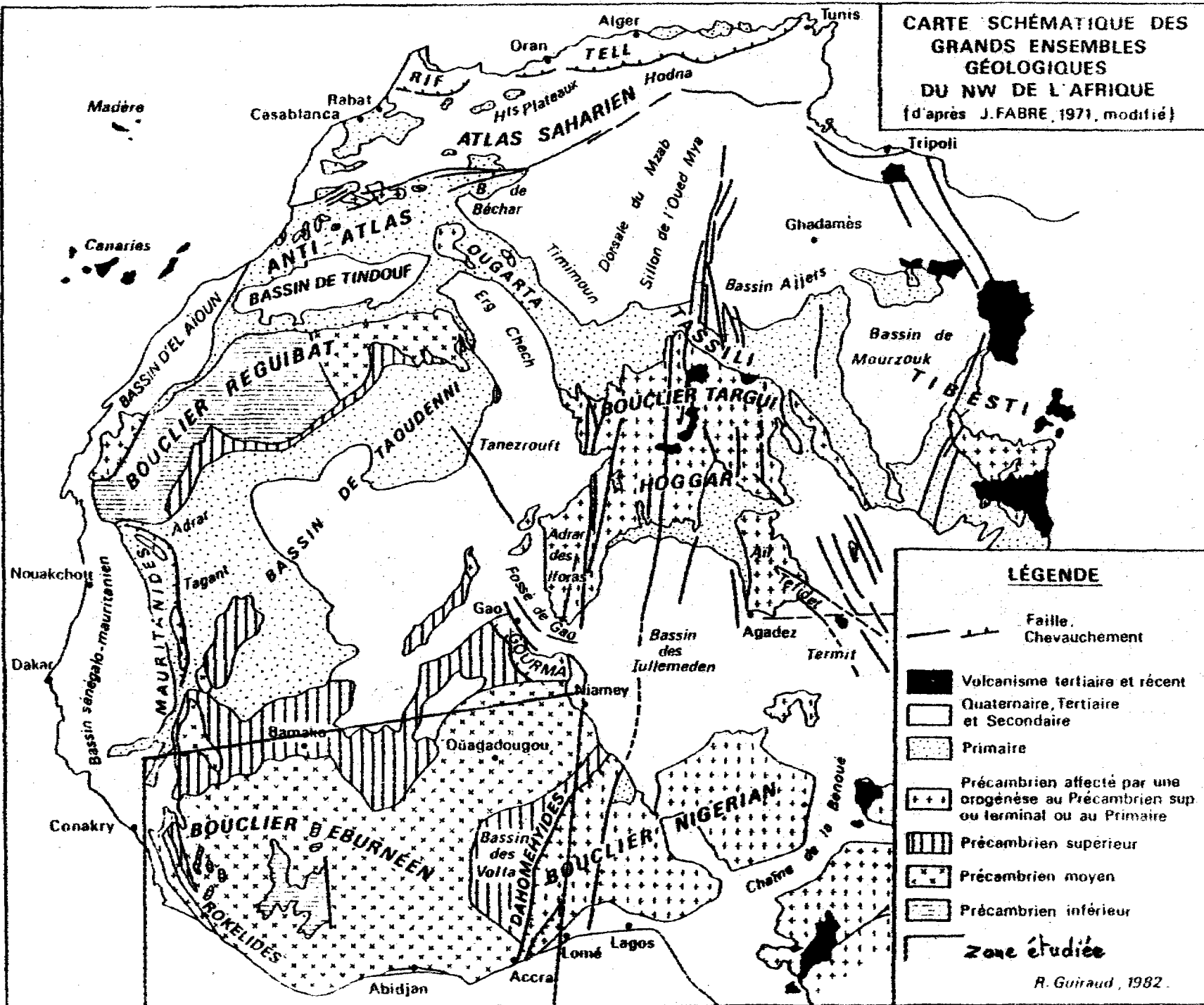
Le socle cristallin et métamorphique appartient au "Bouclier africain" et n'a pas subi de modification importante depuis l'ère primaire, au cours de laquelle a commencé le phénomène de pénéplation qui lui a donné son aspect actuel. Le résultat en est une plate forme monotone, dont l'altitude varie généralement de 100 à 500 mètres et où les surfaces planes dominent, le paysage le plus caractéristique étant celui du "bowal", affleurement de carapaces latéritiques provoqué par les défrichements abusifs et les feux de brousse .

Cependant les reliefs ne sont pas totalement absents. Ils sont constitués par les affleurements de roches dures : granites, dolérites et surtout quartzites, et s'ordonnent en trois massifs : le Fouta-Djalon en Guinée se prolongeant parallèlement à la côte par la dorsale guinéo-libérienne jusqu'au Mont Nimba (1752 m) - la chaîne de l'Atacora allongée S.SW, N.NE du Ghana au Niger (Mont Agou au Togo : 1025 m).

### I.1 CLIMAT ET VEGETATION

Située entre les masses d'air boréales et sèches (alizés et harmattan) dues aux hautes pressions de l'anticyclone des Açores et les masses d'air australes (alizés austraux) dues à l'anticyclone de Ste Hélène, la région est caractérisée par une zonalité climatique présentant toutes les variations depuis le climat désertique sec au Nord et le climat équatorial chaud et humide au Sud. Ces deux zones climatiques subissent un "balancement" en suivant le mouvement apparent du soleil, le régime équatorial s'étendant vers le Nord en été, le régime désertique se déplaçant vers le Sud en hiver. Ce mouvement explique l'alternance d'une saison des pluies centrée sur l'été boréal et d'une saison sèche centrée sur l'hiver.

CARTE SCHEMATIQUE DES  
GRANDS ENSEMBLES  
GÉOLOGIQUES  
DU NW DE L'AFRIQUE  
(d'après J.FABRE, 1971, modifié)



LÉGENDE

- — — — — Faïlle, Chevauchement
- Volcanisme tertiaire et récent
- Quaternaire, Tertiaire et Secondaire
- ▨ Primaire
- ▤ Précambrien affecté par une orogénèse au Précambrien sup ou terminal ou au Primaire
- ▥ Précambrien supérieur
- ▦ Précambrien moyen
- ▧ Précambrien inférieur
- (bordered) Zone étudiée

R. Guiraud, 1982.

Figure 1.

Tableau 1.

SUPERFICIE COUVERTE DANS CHAQUE ETAT  
PAR LES ZONES DE SOCLE CRISTALLIN

P a y s	Superficie totale (millions Km <sup>2</sup> )	Aquifère discontinu	
		Superficie* (millions Km <sup>2</sup> )	%
BURKINA	0,27	0,256	95
MALI	1,2	0,432	36
NIGER	1,27	0,317	25
COTE-D'IVOIRE	0,32	0,307	96
GHANA	0,238	0,235	98
GUINEE (Conakry)	0,28	0,232	82
SIERRA LEONE	0,072	0,053	74
LIBERIA	0,116	0,116	100

\* Valeur évaluée par planimétrie.



On peut donc dire que le climat est conditionné par des phénomènes purement cosmiques : latitude et mouvement apparent du soleil, la présence des reliefs n'intervenant que de manière locale.

#### I.1.1 La répartition des précipitations

Cette zonalité se marque bien dans la répartition des précipitations annuelles (figure 2b) qui décroissent de la côte vers l'intérieur du pays : de 4 mètres à Conakry et 2 mètres à Abidjan, elles passent à moins de 500 mm dans le Nord du Burkina Faso. Les reliefs, Fouta-Djalou, dorsale guinéo-libérienne, chaîne de l'Atacora, représentent évidemment des zones de précipitations maximales. En contrepartie, la présence d'un courant marin froid diminuant l'évaporation dans le golfe de Guinée et la barrière constituée par la chaîne de l'Atacora déterminent, dans le Sud du Ghana, une région où la hauteur de pluie est inférieure à 1 mètre.

La répartition saisonnière des pluies permet de distinguer quatre grandes zones climatiques :

- au Nord, une zone semi-désertique ou sahélienne, dont l'isohyète 600 mm représente à peu près la limite méridionale : un à trois mois sont humides et les pluies tombent durant les jours longs (juillet à septembre),

- sur la plus grande partie de la région, à l'exception d'une bande côtière, une zone à climat tropical à deux saisons : une saison sèche qui peut atteindre 8 mois et une saison humide qui dure au moins 4 mois. Dans cette très grande zone, on peut encore séparer au Nord un domaine soudanien (exemples : Kayes, Ouagadougou) où la saison des pluies dure de 4 à 6 mois de mai à octobre et un domaine guinéen (exemple : Conakry) où elle dure de 7 à 9 mois d'avril à novembre,

- en bordure de l'Océan, une zone à climat sub-équatorial, que l'on peut subdiviser en deux : de l'Est de la Côte-d'Ivoire au Nigéria, règne un climat sub-équatorial à 4 saisons (exemples : Abidjan, Accra) où les pluies durent de 7 à 9 mois avec deux maxima en mai - juin et octobre - novembre,

- à l'Ouest, de la Sierra Léone domine un climat sub-équatorial de mousson (exemple : Greenville) où la saison des pluies dure de 10 à 12 mois.

#### I.1.2 Les températures

Les variations de la température moyenne annuelle (figure 2b) sont inverses de celles des hauteurs de pluie et croissent donc de la côte vers l'intérieur : 26-27° à Conakry et Abidjan, 28° à Ouagadougou et 30° dans le Nord du Burkina Faso proche de l'équateur thermique.

Figure 2a

EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE ANNUELLE (ETP)

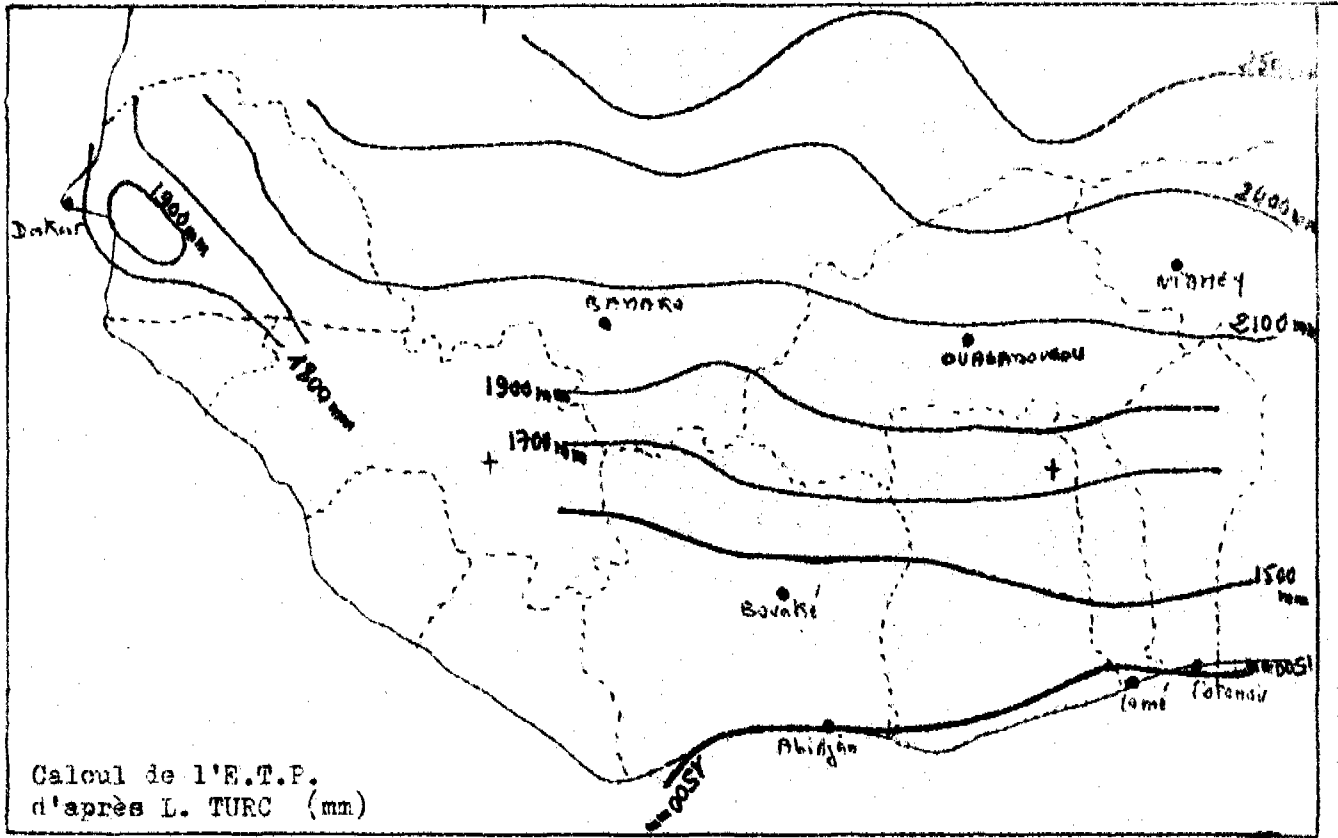
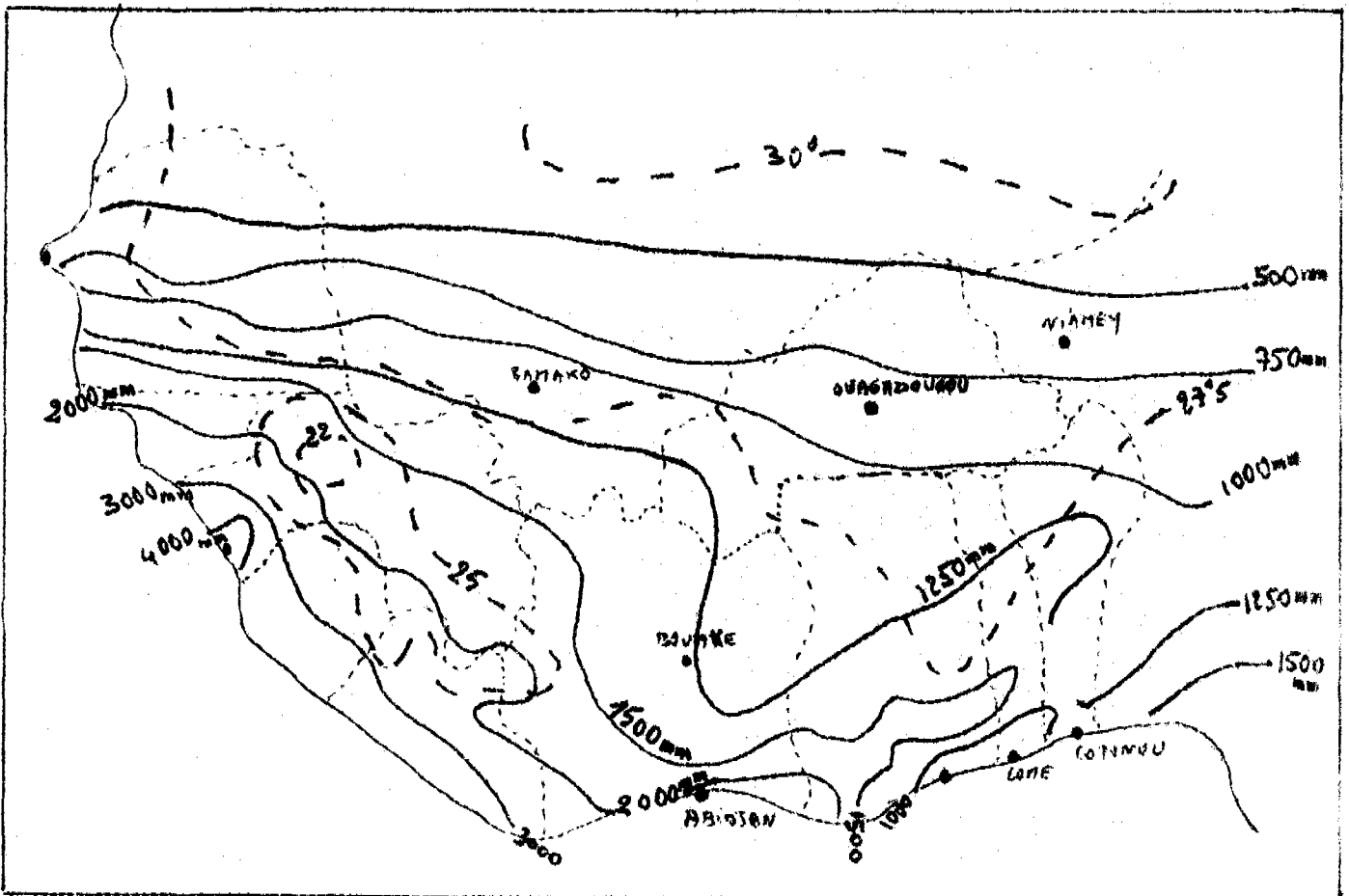


Figure 2b

MOYENNES ANNUELLES.

PLUIES.

TEMPERATURES



Les zones montagneuses plus arrosées provoquent corrélativement des diminutions sensibles de la température, le gradient thermique étant d'environ  $0^{\circ}5$  par 100 mètres sous ces latitudes : on note ainsi  $22^{\circ}$  en moyenne annuelle à Labé dans le Fouta Djalon.

En ce qui concerne l'amplitude thermique annuelle, il est commode de distinguer une zone maritime où cette amplitude est inférieure à  $5^{\circ}C$ , une zone médiane où elle est comprise entre 5 et  $10^{\circ}C$  et une zone continentale où elle est supérieure à  $10^{\circ}C$ .

### I.1.3 L'évapotranspiration potentielle

- évapotranspiration potentielle calculée par la formule de L. TURC (figure 2a) formule théorique permettant d'obtenir la valeur de l'évapotranspiration maximale en supposant le sol imbibé en permanence. Cette condition est évidemment rarement remplie, ce qui diminue l'intérêt d'une telle formule. Elle permet cependant des comparaisons valables et on peut encore une fois mettre en relief la zonalité climatique de l'Afrique occidentale, les valeurs variant de 1500 mm/an en bordure de l'Océan à 2500 mm/an au Nord du Niger. L'évapotranspiration potentielle annuelle présente un gradient croissant régulièrement de l'équateur jusqu'au 20ème parallèle de latitude Nord.

Cette zonalité climatique se retrouve évidemment dans la végétation. Sous climat guinéen et sub-équatorial règne la forêt ombrophile (= "qui aime la pluie", en anglais "rain forest"), hétérogène et étagée : ses limites sont portées sur la carte hydrogéologique.

Au-dessous de 1500 mm de pluie annuelle, la forêt est remplacée par la savane arborée : cette valeur correspond à la zone soudanienne et à une bande côtière dans le Sud du Ghana. Dans le Sud de la zone soudanienne, les cours d'eau sont soulignés par des forêts - galeries, prolongement de la grande forêt humide du Sud. En se dirigeant vers le Nord, les arbres s'espacent graduellement, puis la savane fait place à la steppe plus sèche qui règne sous le climat sahélien.

Les zones montagneuses plus humides sont couvertes par la forêt, mais celle-ci recule régulièrement par dégradation anthropique.

## I.2 HYDROGRAPHIE

Le réseau hydrographique est sous la dépendance du modelé du relief et de la zonalité climatique. On peut opposer :

- au Nord, la zone sahélienne à cours d'eau intermittents ou temporaires chargés de produits provenant de l'érosion mécanique due aux

changements de température brusques et au vent, ayant par conséquent perdu toute force de cohésion et coulant en lits mal organisés à débordements fréquents ;

- au Sud, la zone tropicale et sub-équatoriale où domine l'érosion chimique, les cours d'eau ne transportant plus que des particules fines et coulant directement sur le substratum rocheux, sans interposition d'alluvions. Le régime est plus régulier que dans la zone précédente et les grands cours d'eau sont pérennes.

En région sahélienne et tropicale, les hautes eaux se situent en période des pluies, donc en été, l'étiage ayant lieu en hiver. En zone sub-équatoriale, les eaux superficielles, comme les pluies, sont abondantes toute l'année, avec deux maximum au moment des deux passages du soleil au zénith au début et à la fin de l'été.

Dans toute la région étudiée, les profils en long des cours d'eau majeurs se ressemblent : biefs à pente faible séparés par de brusques ressauts dus souvent à des accidents tectoniques.

Le Niger, qui avec ses 4200 km est le plus long des fleuves d'Afrique occidentale, draine toute la zone nord de la région étudiée : son régime tropical d'amont avec hautes eaux d'été et basses eaux d'hiver est perturbé en aval par la superposition de deux flots de crue. Dans le Nord-Ouest du Burkina, il faut noter l'existence d'un "delta intérieur" correspondant à une ancienne zone d'endoréisme, puis de capture.

Les fleuves côtiers, Sassandra, Bandama, Comoé, Volta, sont soumis à un régime tropical simple. Le plus important, la Volta, est formé de la jonction par phénomènes de capture, de la Volta blanche et de la Volta noire. On a construit, dans les gorges que la Volta a creusées en franchissant la chaîne de l'Atacora, le barrage d'Akosombo qui retient le lac artificiel le plus long du monde (300 km).

Sur la côte occidentale, les rivières présentent un régime de type équatorial : ce sont principalement le Konkouré en Guinée, la Kaba, la Rokell, la Sewa et la Moa en Sierra Léone, les rivières St John's, St Paul's et Cess au Libéria.

### I.3 LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Le socle ancien, appartenant à la vieille plate-forme africaine, comprend des roches éruptives variées et des roches métamorphiques précambriennes, dont la stratigraphie fait encore l'objet de discussions. Sans vouloir prendre partie pour telle ou telle classification nous exposerons rapidement la série en insistant surtout sur la lithologie (figure 3).

#### I.3.1 Les roches éruptives acides

Ces roches, présentant de nombreux types pétrographiques, d'âges et de gisements fort variés, occupent une grande surface en Afrique occidentale, les plus nombreux étant les granites syntectoniques, affleurant en vastes batholites de plusieurs centaines de kilomètres de long, et les granites post-tectoniques formant de petits massifs circonscrits à bords francs.

Pétrographiquement, on y trouve des granites divers, alcalins, calco-alcalins, hyper-alcalins, des grano-diorites, des diorites, des syénites, des pegmatites.

#### I.3.2 Les roches métamorphiques

Les roches métamorphiques appartiennent au Précambrien que l'on divise ordinairement en trois parties : Précambrien inférieur, moyen et supérieur.

##### Précambrien inférieur

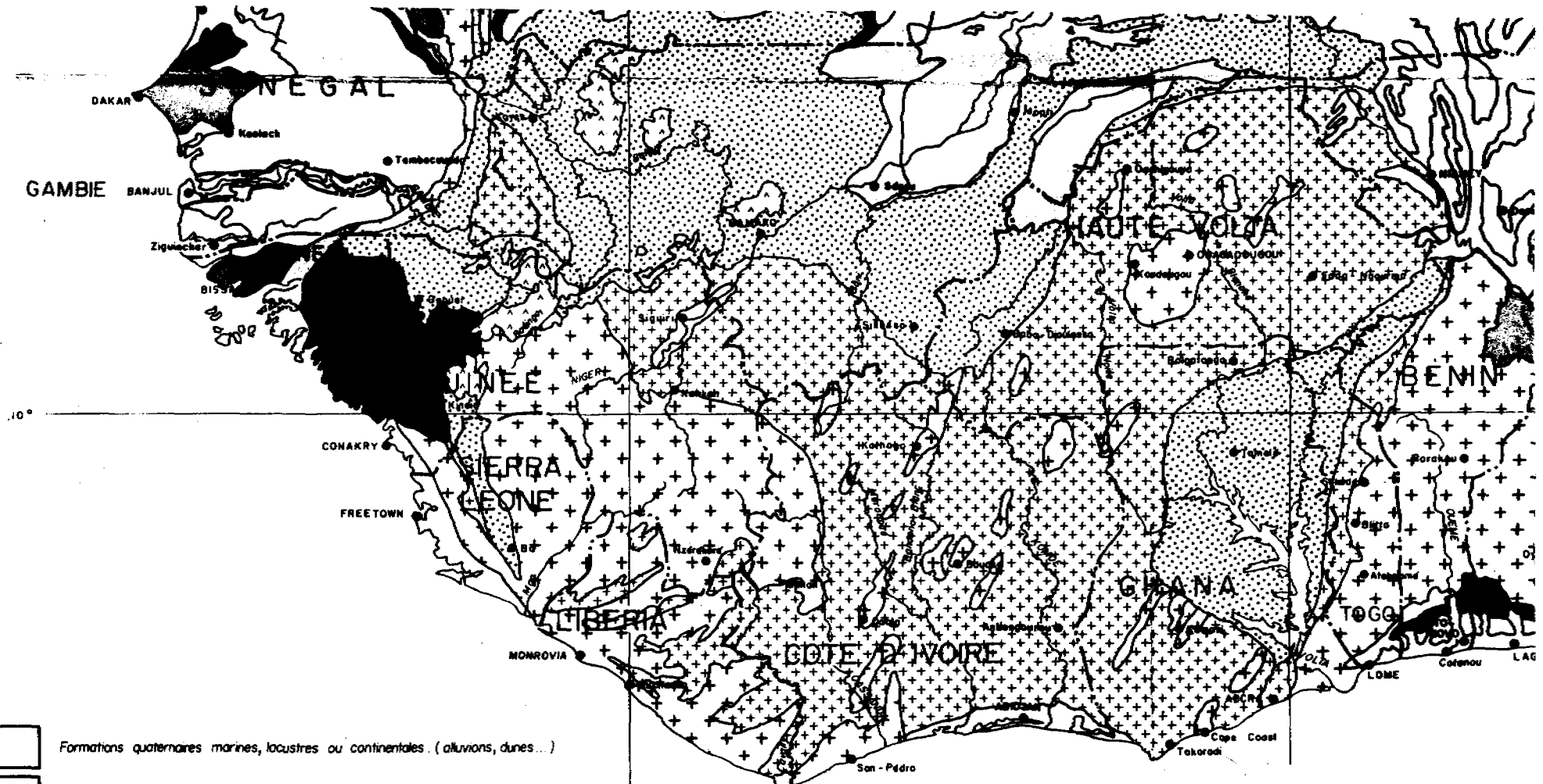
On classe, dans le Précambrien inférieur, d'une part des terrains plissés et granitisés datés, d'autre part des terrains non datés antérieurs aux autres séries précambriennes de la même région.





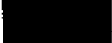

Appelé "Antébirrimien" en Côte-d'Ivoire, "Dahomeyen" au Ghana, le Précambrien inférieur est fortement métamorphisé et parfois difficile à distinguer des roches éruptives acides qui l'encaissent. Les migmatites, les anatexites, les embréchites et les gneiss sont les roches les plus communes, mais on y trouve aussi des micaschistes et des quartzites très métamorphiques, ainsi que des gabbros, des épidotites et des serpentines.

Le Précambrien inférieur est fortement plissé, avec des pendages importants et de nombreuses fractures, suivant des directions N-S ou NNE-SSW.

# ESQUISSE GEOLOGIQUE

ECHELLE: 1/ 10 000 000



-  Formations quaternaires marines, lacustres ou continentales. (alluvions, dunes...)
-  Continental terminal : sables, grés.
-  Paléogène éocène : dominante calcaire.
-  Continental intercalaire : grés, sables.
-  Jurassique crétacé : dominante calcaire.
-  Primaire et Trias — formation du Karoo.

## SOCLE PRECAMBRIEN


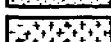

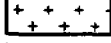
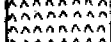
-  Précambrien supérieure (A) . Infracambrien.
-  Précambrien moyen (B + C)
-  Précambrien ancien (D) Précambrien indifférencié.
-  Roches volcaniques basiques ou ultrabasiques d'âge divers.
-  Roches volcaniques acides.

Figure 3.

On retrouve le Dahomeyen au Burkina et en Guinée et peut-être aussi en Sierra Léone où les schistes de Kambui et de Sula sont attribués du Précambrien inférieur. La stratigraphie de la carte géologique de Sierra Léone place ces séries dans le Précambrien moyen.

### Précambrien moyen

Le Précambrien moyen ou Birrimien a été défini au Ghana et il se suit parfaitement dans les pays voisins, Burkina Faso et Côte-d'Ivoire. Il a été primitivement subdivisé en deux : Birrimien inférieur schisto-gréseux et Birrimien supérieur caractérisé par la présence de "roches vertes". Cette classification tend à être abandonnée au profit d'une distinction de faciès entre "complexes volcano-sédimentaires" et "flyschs".

Le métamorphisme du Précambrien moyen est peu accentué dans la zone des micaschistes supérieurs. Les faciès lithologiques les plus courants sont schisteux : schistes, schistes arkosiques, micaschistes, grauweekes. On y trouve aussi en abondance des "roches vertes" qui sont des roches d'origine volcaniques, basiques ou neutres ou des roches basiques grenues, transformées par le métamorphisme de l'épizone : amphibolites, schistes amphibolitiques, épidotites, etc...

Le Birrimien, discordant sur les formations antérieures, est très tectonisé, avec des pendages souvent verticaux et des directions générales NNE-SSW. L'ensemble a été envahi par des venues granitiques, soit concordantes ("granites Baoulés"), soit discordantes (exemple : granite de Dixcove au Ghana).

### Précambrien supérieur

On classe dans le Précambrien supérieur, en premier lieu, des terrains métamorphiques, de la zone des micaschistes supérieurs, concordants avec le Birrimien sous-jacent et orienté comme lui, et défini dans le bassin de Tarkwa au Ghana : c'est le Tarkwaïen. On y trouve des quartzites, des phyllades, des conglomérats, des grès et des grauweekes affleurant sur des surfaces relativement restreintes au Ghana, en Côte-d'Ivoire et au Burkina Faso. Les venues éruptives acides ou basiques y sont nombreuses.

La série du Buem enfin, qui couronne le Précambrien supérieur montre un métamorphisme très faible ou nul. C'est une série essentiellement argilo-gréseuse, comprenant des schistes argileux et des argiles, des grès,

des quartzites, des arkoses, avec des intrusions volcaniques au Ghana (jaspes, tillites, laves...). L'orientation générale est parallèle à celle de l'Atacorien, soit NNE-SSW, la tectonique faible.

#### Roches intrusives basiques

Les séries que nous venons de passer en revue sont recoupées à l'emporte-pièce par des intrusions basiques d'âges variés. Ce sont, en Guinée, au Mali et au Burkina Faso, des dolérites et des gabbros.

Le résumé lithostratigraphique des séries précambriennes est donné au tableau 2.

### I.4 LA TECTONIQUE

#### I.4.1 La tectogénèse

La plupart des formations géologiques ouest-africaines ont été affectées par plusieurs phases tectogéniques qui les ont généralement structurées suivant des directions N-S à NE-SW, ces directions caractérisant l'orientation des plans de schistosité ou de foliation, et parfois des plis ou des contacts anormaux.

La superposition de différentes phases tectoniques se traduit par l'existence d'une intense fracturation. Plusieurs auteurs ont souligné la fréquence des accidents, dont l'importance est très variable : certains accidents s'observent sur des longueurs atteignant plusieurs centaines de kilomètres (failles de Kandi, de la Sassandra, des Volta, etc...), un très grand nombre étant de taille kilométrique et la plupart des affleurements montrant de nombreuses micro-fractures.

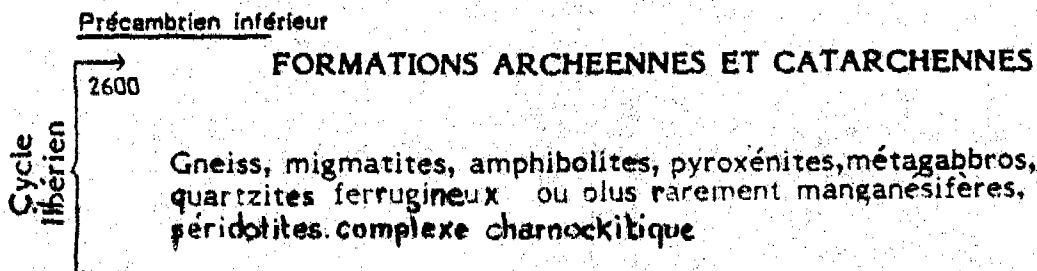
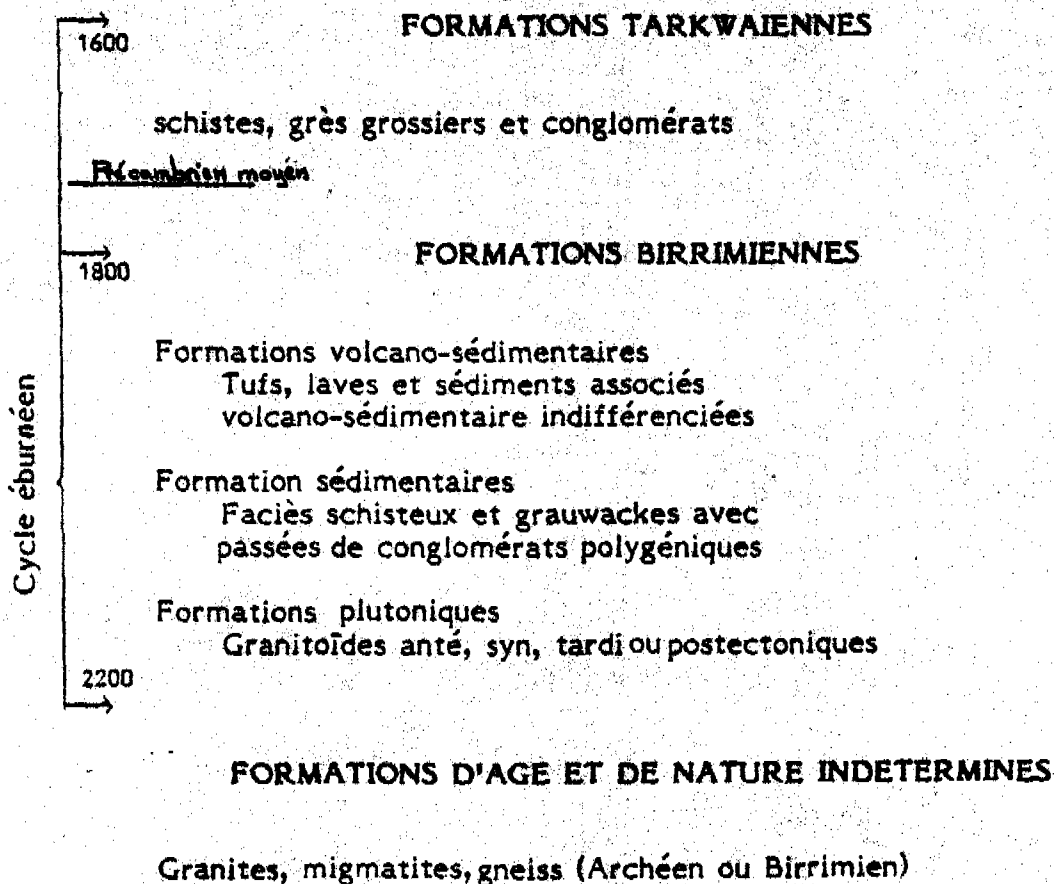
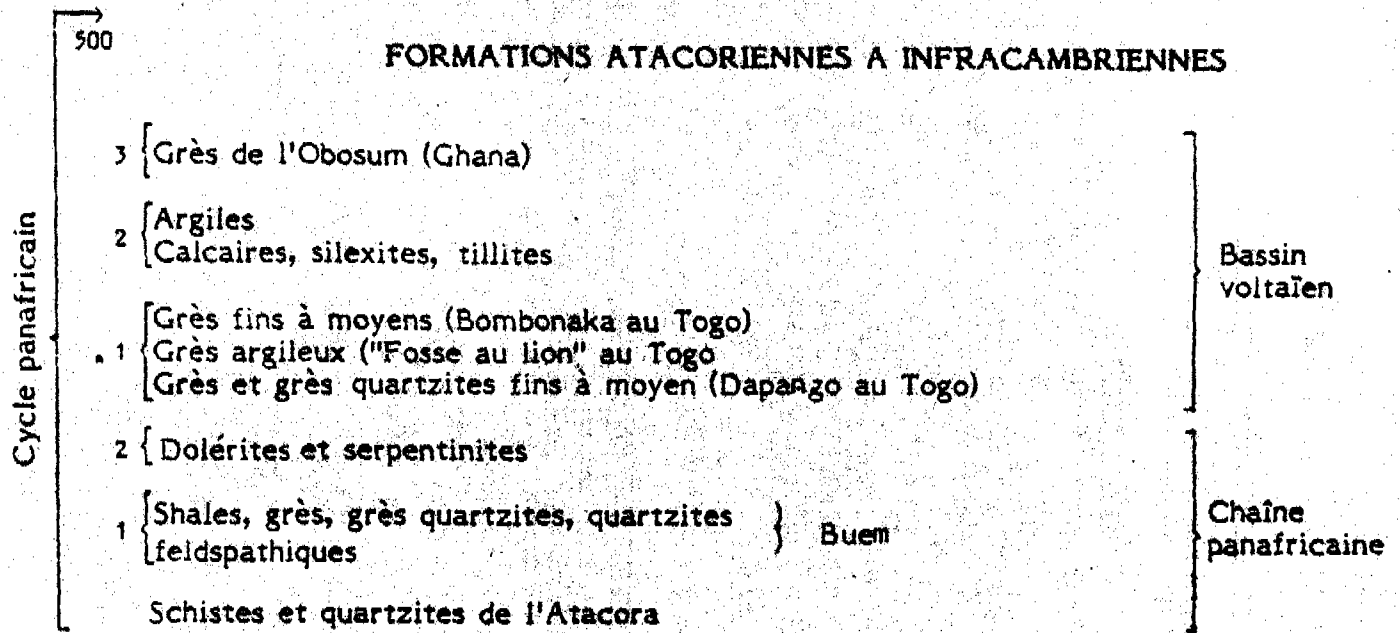
Dans l'ensemble, les failles sont rectilignes et subverticales. Elles ont joué diverses reprises, en décrochement et plus rarement en faille normale. Des rejeux ont pu se produire après le Paléozoïque, comme en atteste la présence au sein du Birrimien de Côte-d'Ivoire de filons doléritiques datés du Jurassique, ou comme on peut le constater dans le bassin de Kandi (Bénin) où d'importants accidents découpent à la fois le Crétacé et le socle (R. GUIRAUD et S. ALIDOU, 1982).

La largeur des zones fracturées est également variable, des bandes mylonitiques jalonnent parfois le tracé de certains accidents.

Enfin, on retiendra que la microfracturation se répartit dans différents plans de l'espace ; ce qui se traduit par le découpage des roches rigides en blocs qui ont évolué vers des formes en boules dans le cas des granites.



RESUME LITHOSTRATIGRAPHIQUE DES SERIES PRECAMBRIENNES



Dans les chaînes des Mauritanides et des Dahoméides, les grandes unités structurales sont séparées par des contacts anormaux très plats et continus.

1.4.2 Les directions de fracturation

Les principales directions tectoniques des séries Précambriennes et Infracambriennes de l'Afrique de l'Ouest (cf. Barrère et Slansky, 1965) sont résumées dans le tableau 3.

Une direction s'impose à toutes les phases tectoniques, les plis ou les failles sont allongés NE-SO ou NNE-SSO. On trouve plus rarement des directions structurales N-S (cf. Précambrien inférieur en Guinée).

L'allongement des structures est généralement visible sur des photographies aériennes ou sur des cartes géologiques. La direction birrienne est la plus connue (SO-NE). Elle se matérialise par des fractures longues et nombreuses (foliation - schistosité) qui sont les plus exploitées (cf. Projet Coton en Côte-d'Ivoire où 21 % des ouvrages sont réalisés sur cette direction de fracturation). Sur le plan du taux de réussite des forages réalisés sur cette direction, il est difficile de dégager une règle générale comme le montre le tableau ci-dessous :

: Pays / Projet :	<u>DIRECTIONS FAVORABLES*</u>	: <u>DIRECTIONS DEFAVORABLES</u>	:
COÛTE-D'IVOIRE			
:	(1) : (0-10) (20-30) (110-120)	: (160-170)	:
:	(2) : (10-40) (70-80) (90-120) (130-150)	: (40-50) (120-130)	:
:	(3) : (0-20) (40-50) (70-80) (110-120) (160-170)	: (60-70) (80-90) (170-180)	:
:	(4) : Toutes acceptables (0-10) (50-60) (70-90) (110-130)	: Néant-moins bonnes : (30-40) (90-100) (140-150) (160-170)	:
MALI	(5) : (0-10) (40-60) (70-80) (130-140) (160-180)	: Toutes les autres	:
BURKINA	(6) : (0-10) (20-40) (50-80) (120-140) (160-170)	: Toutes les autres	:
:	(7) : 105 (20-30) (150-170)	: (60-80) (110-120)	:
:	(8) : (20-30) (60-80)	: (80-95) (150-170) (110-120)	:
(1) Projet Coton (Granite)	(5) Kayes Nord (OMBEVI)		
(2) Projet Coton (Schistes)	(6) SaheI Ière phase		
(3) Projet Cacao (Granite)	(7) Centre (Mogtédo)		
(4) Projet Cacao (Schistes)	(8) Centre (Zigla)		
* Obtention d'un débit $\geq$ 0,6 m <sup>3</sup> /h.			

Principales directions tectoniques du bouclier Ouest Africain.

Age	Série	Pays	Directions
Infra-Cambrien ou Paléozoïque	Rokell	Guinée	Failles NE - SO
Précambrien sup.	Tarkwaïen	Côte d'Ivoire Haute-Volta Ghana	Plis NE - SO N.NE - S.SO Parfois E.O
	Buem	Togo - Bénin	NE - SO
Précambrien moyen	Pharusien	Mali (Adrar)	N.NE - S.SO
	Birrimien	Côte d'Ivoire Haute-Volta Niger (S)	N.NE - S.SO NE - SO
Précambrien inf.	Antébirrimien	Côte d'Ivoire Guinée	NE - SO NS

## I.5 LES ENSEMBLES HYDROGÉOLOGIQUES

A l'intérieur du bouclier Ouest Africain, on peut distinguer 2 grandes provinces dont les conditions hydrogéologiques sont relativement homogènes et correspondent aux familles lithologiques (cf. figure 4 et tableau 4).

### I.5.1 L'ensemble granito-gneissique

- L'ensemble granito-gneissique ou migmatitique qui est le plus étendu et qui correspond à la partie occidentale du craton Ouest Africain (plateau mossi au Burkina). Cet ensemble est caractérisé par une couverture d'altération dont l'épaisseur est variable et donc les potentialités hydrauliques sont assez faibles à l'exception de cas particuliers qui pourraient être mis en valeur par des ouvrages ponctuels : cuirasse latéritique noyée, arène grenue de l'altération... .

Les granites constituent les formations de socle les plus importantes par la surface qu'elles occupent dans le bouclier Ouest Africain. Sur le plan de la recherche d'eau souterraine, les formations granitiques nécessitent la mise en oeuvre de méthodes de recherche de fractures plus ou moins complètes selon que l'on ait à travailler dans des zones granitiques syntectoniques ou post-tectoniques.

Les granites syntectoniques, de type Baoulé sont les plus répandus. Ils constituent la zone granitique birrimienne du plateau mossi, au Burkina, et du Liptako, au Niger.

Les taux d'échec obtenus en forages y sont relativement faibles et de l'ordre de 30 %, car des granites bénéficient d'une fracturation qui facilite la recherche d'eau souterraine.

Les granites post-tectoniques forment par contre des massifs circonscrits à tendance circulaire de petite taille ne dépassant pas quelques dizaines de kilomètres de diamètre. Ils sont caractérisés par leur gisement discordant, une auréole de métamorphisme réduite et par une grande hétérogénéité pétrographique. Les affleurements se caractérisent par des inselbergs avec une altération en boules bien développée. Du point de vue pétrographique, il s'agit de granite alcalin rose à gros grain. Ces massifs circonscrits sont bien développés dans le Nord du Burkina, dans la région de Djibo et Aribinda. Du fait de leur origine, ces granites sont peu fracturés et impliquent des taux d'échec relativement importants dans les campagnes de forage. Ces taux atteignent 70 % dans la zone géographique citée précédemment.

CARTE HYDROGEOLOGIQUE

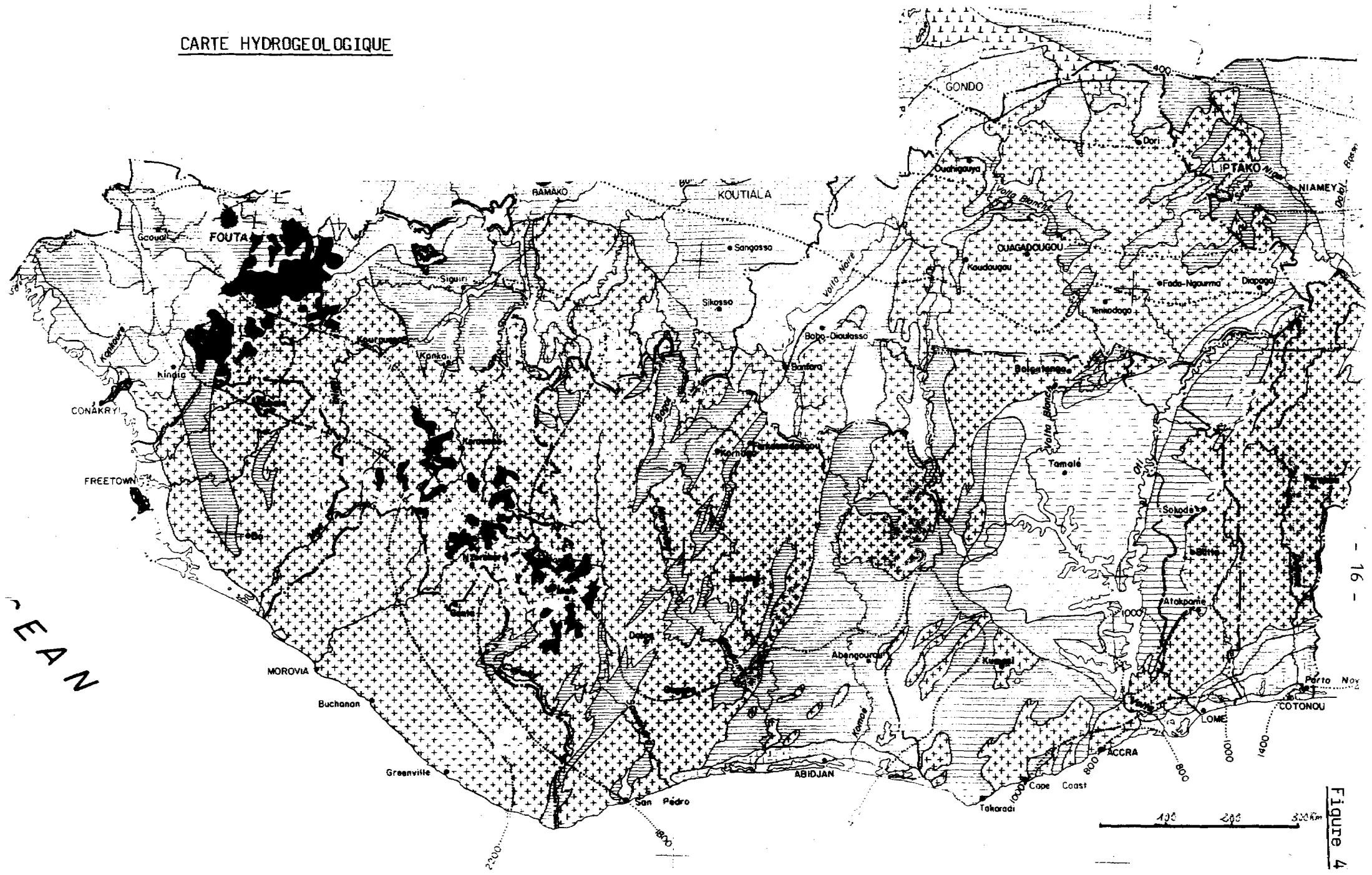










Figure 4

FIGURE	DENOMINATION	FACIES	ALTERATION FISSURATION	CARACTERISTIQUES DE L'EXPLOITATION
 d1a  d1b	"Complexe de basaltes" "Aréocambrien" "Précambrien inférieur ou moyen" "Précambrien indifférencié"	a - granites - gneiss b - roches métamorphiques "indifférenciées" - schistes - quartzites - phyllades - leptynites et gneiss	- Altération superficielle comprise entre 5 et 30m maximum dans les zones foliées. - Fracturation négligeable au delà de 60m de profondeur. - Altération et fracturation plus faible en zone métamorphique	- Ressources aquifères exploitables par ouvrages d'une profondeur moyenne 30 à 60 m. - Eau généralement proche de la surface (<20m sous le sol). - Débit des ouvrages compris entre 1 et 2 m <sup>3</sup> /h. dans les zones granitiques voisin de 0,5 m <sup>3</sup> /h ailleurs. - Qualité de l'eau généralement bonne en zone non ande et dans les granites.
 d2a  d2b	Roches volcaniques	- basaltes - dolérites  - Rhyolites - Trachytes	- Peu ou pas d'altération - Fissurations localement très importante jusqu'à des profondeurs supérieures à 100m.  Fissuration peu importante	- Ressources localement importantes marquées en zones magmatiques par des sources; insignifiantes en zone aride. - Ouvrages de captage dont la profondeur peut atteindre 150m. avec des débits compris entre 1 et plusieurs dizaines de m <sup>3</sup> /h. - Eau localement en charge. - Qualité de l'eau variable. Bonne dans les zones tropicales.
 d4a  d4b  d4c  d4d	Roches sédimentaires localement légèrement métamorphosées affectées de mouvements tectoniques injectées de roches volcaniques	a: schistes dominants b: grès quartzites dominants c: faciès carbonatés dominant d: faciès argileux dominants	I ALTERATION a jusqu'à 100m d'épaisseur de type argileux b: faible ou nulle. c altération par dissolution avec évolution karstique d insignifiante  II FISSURATION généralement faible (<50m) dans les faciès carbonatés et localement dans les grès quartzites	- Ressources négligeables en zones andes ou semi-andes sauf au niveau des zones fracturées. - Débits des ouvrages très généralement inférieurs à 1 m <sup>3</sup> /h. sauf dans les faciès carbonatés localement supérieurs à 10 m <sup>3</sup> /h ex: dolomies infracambriennes. - Profondeurs des ouvrages très variable, moyenne 20 à 50m. mais pouvant localement dépasser 100m. (faciès grès quartzites et roches carbonatées) - Qualité de l'eau souvent médiocre dans les faciès schisteux et argileux surtout en zone à pluviométrie inférieure à 600 mm.

LEGENDE DE LA CARTE HYDROGEOLOGIQUE

### I.5.2 L'ensemble schisto-gréseux

- L'ensemble schisto-gréseux ou volcano-sédimentaire. Cet ensemble est développé en Côte-d'Ivoire : schistes birrimiens de la boucle du Cacao. Il se caractérise par une couverture d'altération relativement épaisse et argileuse et une forte hétérogénéité lithologique due à une alternance de schistes et de filonnets de quartz à intercalations gréseuses. Cet ensemble offre des potentialités relativement faibles du fait de la dominance argileuse de cet ensemble mais la présence d'intercalation détritique lui confère une régularité dans les débits obtenus par forçage.

## II/ TYPOLOGIE ET COUT DES OUVRAGES DE CAPTAGE D'EAU SOUTERRAINE EN ZONE DE SOCLE CRISTALLIN.

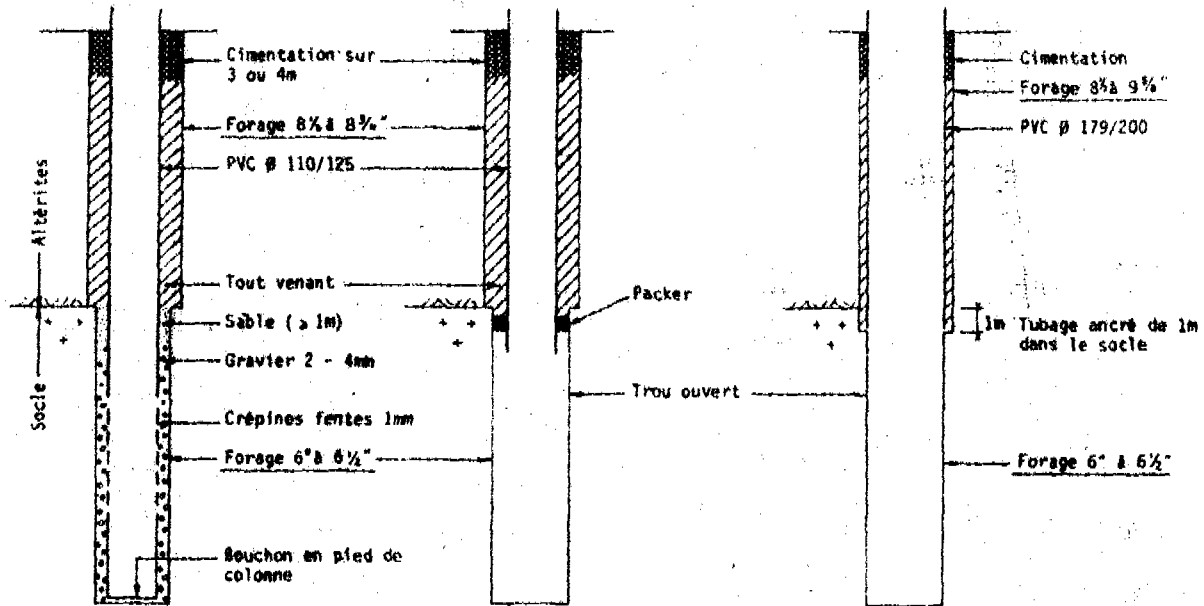
### II.1 TYPOLOGIE DES OUVRAGES

En zone de socle cristallin du bouclier Ouest Africain, on obtient les meilleurs débits dans la partie fissurée de la roche saine et plus rarement à la base de la couverture d'altération.

Nous décrivons au tableau 5 les types d'ouvrages et leurs modes de réalisation mis en oeuvre en zone de socle cristallin du bouclier Ouest Africain.

La grande majorité des ouvrages exécutés dans cette zone est constituée par l'ouvrage standard de type villageois captant les niveaux fissurés et fracturés du socle sous la couverture d'altération. Il représente en nombre la très grande majorité des besoins (cf. figure 5a). Il peut fournir un débit moyen de 5 à 6 m<sup>3</sup>/j. Il est équipé de pompes à motricité humaine exploitant l'ouvrage en dessous de ses capacités maximales. Dans certains cas particuliers les altérations peuvent présenter des possibilités aquifères et une faible proportion d'ouvrages de type villageois captent ainsi des altérations (figure 5c). Les diamètres d'exécution et d'équipement restent identiques. Les forages AEP (figure 5b) sont réalisés pour l'alimentation en eau de centres secondaires (>5000 ha) et sont équipés de tubes PVC Ø 179-200 ou 150-165 mm et exploités par électropompes immergées.

FORAGES « VILLAGEOIS » DANS LE SOCLE CRISTALLIN  
COUPES TYPES D'OUVRAGES  
RÉALISÉS AU ROTARY/MARTEAU FOND DE TROU

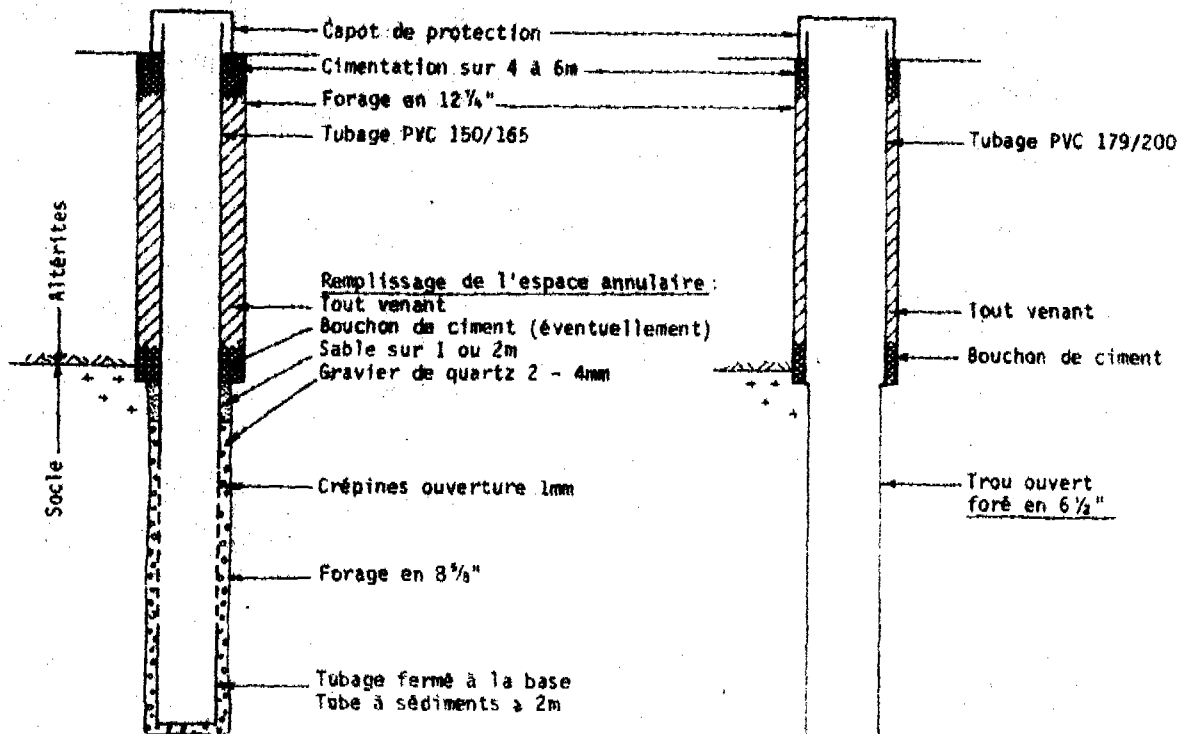


a) Tubage intégral  
Méthode recommandée

b) Tubage des altérites  
seules avec packer. La  
sécurité de l'isolation  
n'est pas absolue

c) Tubage des altérites sans  
packer.

FORAGES AVEC MOTOPOMPE DANS LE SOCLE CRISTALLIN

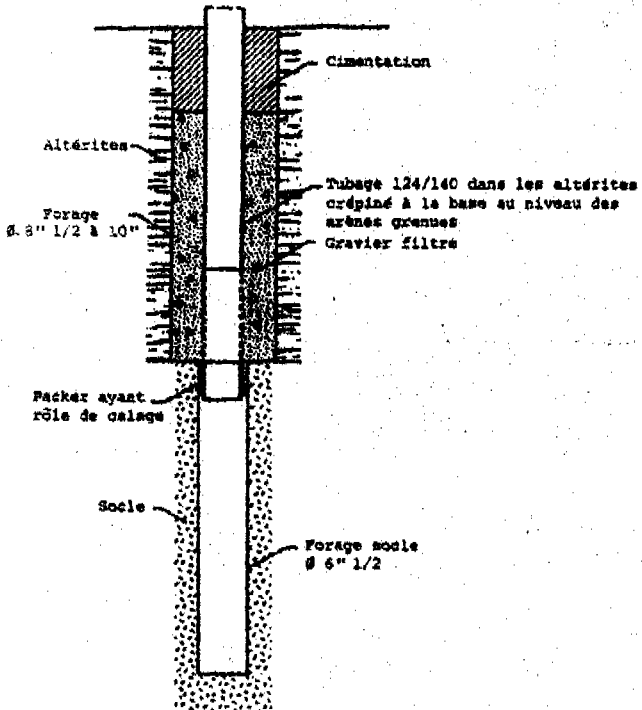


a) Forage captant les niveaux fissurés du socle  
tubé sur toute sa hauteur.

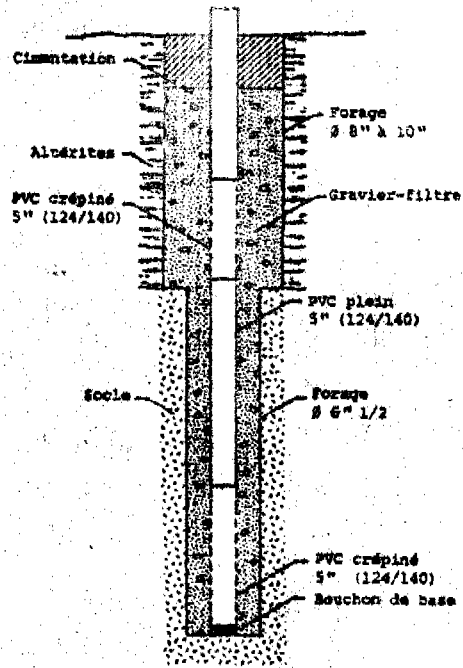
b) Forage captant les niveaux fissurés du socle  
tubé seulement au droit des altérites.



Figure 5.c

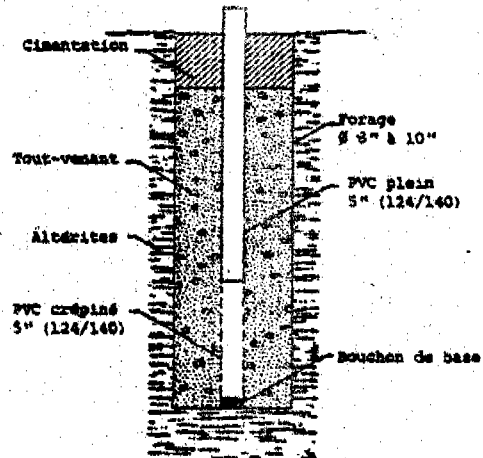


Exploitation altération + socle



Exploitation altération + socle

GEOMINES LTD.



Exploitation des altérations

## II.2 COUT DES OUVRAGES

### II.2.1 Le forage villageois

- Le coût moyen d'un forage villageois ou AEP positif réalisé par l'entreprise, compte tenu d'un taux d'échec moyen de 30 % est d'environ 2,5 millions de francs CFA (\*). Ce coût représente une moyenne des coûts réalisés sur quelques programmes d'hydraulique villageoise dans les Pays Membres du CIEH déduit des annexes 1.1 à 1.8 et résumé dans le tableau suivant :

Pays	Programme	Année	Forage positif	
			Profondeur (m)	Coût (Millions F.CFA)
NIGER	Liptako 127 forages	1983	50	3,8
BURKINA	Sahel 1981	1981	54	2,26
BURKINA	Sahel 1983	1983	48	2,13
COTE-D'IVOIRE	4ème FED	1982	67	2,077
COTE-D'IVOIRE	Boucle du Cacao	1977	62	3,67
COTE-D'IVOIRE	CCCE	1983	62	1,38
NIGER	Liptako 110 forages	1981	50	2,62
BURKINA	5ème FED	1981	46	2,49

II.2.2 - Le coût d'exécution d'un puits moderne enregistré sur le projet Yatenga Comoé (5ème FED) au Burkina est de l'ordre de 84.400 F.CFA/m hors amortissement et 501.000 F.CFA y compris l'amortissement du matériel pour une profondeur moyenne d'ouvrage de 20 m. Le coût du puits moderne réalisé en régie par l'Administration en diamètre de captage  $\varnothing$  1400 mm revient à 2.020.000 F.CFA.

II.2.3 - Les puits modernes réalisés à l'aide de matériels mécanisés (tarière bucket "Calweld" ou par méthode de havage battage - Galinet Teknifor) reviennent respectivement à :

- Puits forés de type Calweld : Côte-d'Ivoire et Burkina : Campagne FOREXI et AVV - 1979 et 1980 - 2.800.000 F.CFA par puits. Profondeur moyenne 25 m.

(\*) 1 F.CFA = 0,02 FF.

- Puits mécanisés par battage havage : Réalisés uniquement par le projet Pilote GITEC/FED en zone sédimentaire au NIGER. Coût du mètre linéaire variant entre 150.000 et 595.000 F.CFA avec une moyenne de 387.000 F.CFA.
- Approfondissement de puits : Coût moyen : 230.000 F.CFA par m d'approfondissement.
- Forages artisanaux : Approfondissement de puits anciens par des forages manuels: Puits-forages .

Cette technique est appliquée dans le cadre du projet 5ème FED Yatenga Comoë au Burkina. Les puits-forages sont exécutés par une entreprise artisanale (la COFOMAYA). La technique consiste à approfondir par forages manuels d'anciens puits secs.

Dans le cadre de ce projet, 14 ouvrages ont été réalisés et ont fait l'objet d'un approfondissement moyen de 22 m représentant un coût moyen au mètre linéaire de réhabilitation de 40.000 F.CFA.

CHOIX DES TYPES D'OUVRAGES ET MODE DE REALISATION EN ZONE DE SOCLE CRISTALLIN DU BOULIER OUEST AFRICAIN

Type d'ouvrage	Caractéristiques	Profondeur	Diamètre de tubage	Mode de réalisation préconisé	Contraintes d'exécution ou d'exploitation
Forage villageois dans le socle fissuré	-Exécution très rapide. -Seul ouvrage pouvant atteindre la zone fracturée en terrains durs.	40 à 80 m	110/125 mm ou 125/140 mm	Atelier Marteau Fond de Trou ou mixte : Rotary/Marteau	-Respecter les normes de qualité sur le plan de l'équipement : -Choix du tubage PVC conçu spécialement pour le forage et permettant un gravillonnage correct. -Mode d'isolation des altérites par tubage intégral/-gravillonnage ou utilisation d'un packer (efficacité du packer à contrôler).
Forage villageois dans les altérations (rarement exécuté).	Exécution rapide si altérations de bonne tenue.	60 m	125/140 mm	Atelier Rotation à la boue.	-Prévoir un tubage provisoire des altérations. -Réaliser la foration des altérations en diamètre 12 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> "
Forage AEP Centres secondaires dans le socle fissuré.	Exécution très rapide.	80 m	150/165 mm ou 179/200 mm	Atelier Marteau Fond de Trou ou mixte : Rotary/Marteau.	-Forage équipé d'une pompe électrique immergée 4". -Respecter les normes d'espace annulaire. -Equipement pouvant recevoir des pompes électriques 6".
Puits à main (socle ou sédimentaire).	Fonçage possible mais très cher en terrain dur.	20 à 40 m	1400/1800 mm	Brigades de puits -Compresseurs -Marteaux à air comprimé -Explosifs	-Peut difficilement exploiter une formation dure (socle ou calcaires massifs). -Profondeur maximale de niveau statique : 70 mètres. -Cadence de réalisation très lente.
Puits forés (à la tarière bucket).	Exécution rapide	27 m	1000 mm	Atelier de tarière bucket	Terrains tendres. Pas de niveaux consolidés. Le diamètre limite l'exploitation à 2 ou 3 cordes. Sujétion de transport des buses (lorsqu'elles sont en béton).
Puits forés à la benne preneuse	Terrains tendres à passées dures. Exécution assez lente.	50 m	1000 mm	Atelier de battage havage (benne preneuse)	Suivre l'expérience pilote lancée au NIGER en zone sédimentaire. -Le diamètre d'équipement ne permet pas une exploitation pastorale. -Problème de soutènement de parois à résoudre, lors de la foration. -Sujétion de transport des buses (lorsqu'elles sont en béton). -Possibilité de réalisation de puits dans couverture d'altération si conditions favorables.

### III/ METHODES D'IMPLANTATION D'OUVRAGES EN ZONE DE SOCLE CRISTALLIN - BILAN DES PROGRAMMES DE REALISATION.

#### III.1 LA PHOTOINTERPRETATION ET LA TELEDETECTION

III.1.1 - La photo-interprétation a pris de l'importance en hydrogéologie du socle en Afrique de l'Ouest depuis que l'on oriente systématiquement la prospection des eaux souterraines vers la recherche des fractures pour implanter des forages.

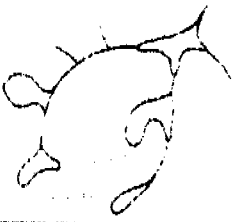
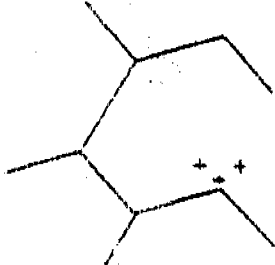
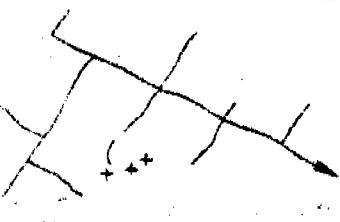



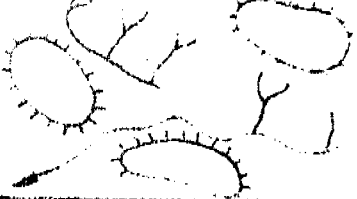
La photographie aérienne constitue le document le plus précieux. Elle complète efficacement les cartes existantes (topographiques, géologiques, pédologiques, etc...), ou les remplace carrément lorsque celles-ci sont inexistantes ou bien à des échelles trop petites comme c'est fréquemment le cas en Afrique de l'Ouest.

La photo-interprétation est une méthode rapide et peu coûteuse pour tracer une esquisse structurale, voire géologique, mais surtout pour repérer les fractures. On relève a priori tous les alignements morphostructuraux, ou linéaments, soulignés par le réseau hydrographique ou se détachant simplement en clair ou sombre sur la photo. On obtient ainsi une vision régionale de la fracturation et l'on peut en faire une étude statistique. Cette technique permet également un levé rapide et précis du chevelu hydrographique, et peut donner une idée sur l'épaisseur moyenne probable des altérites (figure 6).

La photo-interprétation utilisée dans le cadre d'un programme d'hydraulique villageoise dans le Nord du Burkina (tableau 6) a permis de définir des critères morphotectoniques d'implantation d'ouvrages et de considérer que les conditions les plus favorables (plus de 80 % de succès) sont remplies sur les bords et aux confluences de marigots, à l'intersection de deux linéaments majeurs. Inversement les noeuds de trois linéaments ou plus sont défavorables car la fracturation y est peu développée par manque de direction tectonique dominante.

## INFLUENCE DES CRITERES MORPHOLOGIQUES SUR LES TAUX D'ECHEC D'OUVRAGES

## Projet "Coton" - Côte-d'Ivoire

FIGURE OU RESEAU HYDROGRAPHIQUE	TYPE	OBSERVATIONS MORPHOLOGIQUES CRITERES D'IMPLANTATION	Epaisseur altération (m)	% échec forages	% échec puits
	1	Réseau arrondi, en "choux-fleur". Plateau cuirassé. Zones inondables. Faible pente du réseau hydrographique. Critères d'implantation : absence d'indices géologiques, zone inondable, filon, linéament dénivellation par rapport au marigot <15 m. Puits traditionnels nombreux.	20-25	16	36
	2	Réseau polygonal, en "nid d'abeilles". Interfluvies érodés. Affleurements fréquents. Réseau forte pente. Marigots étroits. Forêt galerie. Cas difficile. Critères d'implantation : linéaments sécants larges, noeuds de fractures, replats. Rupture de pente avec changement de végétation. Pas de puits traditionnels.	10-15	64	Puits déconseillés
	3	Réseau orthogonal ou oblique. Interfluvies érodés. Forte pente du réseau. Marigots temporaires étroits. Forêt galerie. Inselberg, affleurement. Cas peu favorable. Rechercher : site bas (alt. <5 m) noeud de fractures, filons, petits talwegs.	15-20	38	52
	4	Sur gneiss. Réseau pente faible. Cuirasse. Forêt galerie. Nombreux puits traditionnels. Rechercher : linéaments, replats (la présence de granites (pour les puits). Pour les forages : rechercher interfluvies érodés, replats, linéaments.	15-24	43	42
	5	Zone forestière. On ne perçoit pas le réseau hydro. Zone granitique. Pente faible du réseau. Cuirasse. Nombreux puits. Grande largeur des zones de drainage. Aucun forage.	forte	?	26
	6	Schistes et granites. Zone indéterminée à secteurs variables. Epaisseur altération variable ; pas de puits. Chercher altération épaisse avec cuirasse, zone inondable absence d'éléments géologiques de surface, noeud de fractures	variable	26	pas de puits
	7	Schistes Birrimiens à linéation parallèle. Altération très épaisse. Pente du réseau faible. Grandes zones inondables. Absence d'indices géologiques. Pas de puits. Pas de difficulté d'implantation des forages.	>27	7	-
	8		>60	faible	-
	9	Réseau digité, autour des collines de roches vertes, dans schistes Birrimiens. Chercher : marigot étroit avec forêt galerie. Filons de quartz et fractures.	15-35	50	-

Pourcentage de succès en fonction des critères morpho-tectoniques d'implantation

- Hydraulique villageoise. ORD du SAHEL. BURKINA FASO -

	Critère d'implantation	Nb de cas	Nb forages positifs	Pourcentage de succès
Réseau hydrographique et morphologie	bord de marigot 1 *	73	69	<u>94,5</u>
	bord de marigot 2	67	51	<u>76,1</u>
	bord de marigot 3	47	26	<u>55,3</u>
	confluent de marigots 1-1, 1-2 et 1-3	25	23	<u>92</u>
	confluent de marigots 2-2, et 2-3	22	16	<u>72,7</u>
	confluent de marigots 3-3	12	5	41,6
	interfluves et flats sans réseau hydrographique	31	15	48,4
Points d'eau	bordure de mare puisards ou puits à proximité immédiate	30	25	<u>83,3</u>
		102	83	<u>81,4</u>
Linéaments	Linéament simple	51	38	<u>74,5</u>
	Noeud de 2 linéaments	87	73	<u>83,9</u>
	Noeud de 3 linéaments et plus	77	50	<u>64,9</u>

\* Marigot 1 : grand marigot sinueux avec zone inondable de largeur supérieure à 100 m, correspondant à un couloir de deux fractures parallèles.

Marigot 2 : marigot secondaire, le plus souvent rectiligne et correspondant à une fracture unique, mais possédant une zone inondable plate ayant l'aspect d'une plaine alluviale étroite.

Marigot 3 : petit marigot rectiligne sans zone axiale plate.

Utilisée sans la géophysique, la photo-interprétation a donné de bons résultats (90 % de succès) dans les schistes birrimiens de la Boucle du Cacao de Côte-d'Ivoire). Dans les granito-gneiss en revanche, où les taux d'échec sont souvent élevés (de l'ordre de 30 % à 50 % en Côte-d'Ivoire, Bénin, Yogo, etc...), de même que dans le sédimentaire ancien (Mali) ou lorsque les débits recherchés sont relativement élevés, l'étude des photographies aériennes ne suffit pas, et il convient de rechercher des compléments d'information à l'aide des méthodes géophysiques.

III.1.2 - La technique de la télédétection est mise en oeuvre depuis une vingtaine d'années à partir des données des satellites artificiels de la terre.

Son utilisation pour la recherche d'eau en Afrique de l'Ouest reste encore au stade expérimental (S. SAWADOGO, 1982 ; P. BERARD, 1982). Certes cette technique a ses avantages ; en effet :

- . les périodes de prise de vue et la répétitivité des informations permettent de sélectionner les images les plus intéressantes, en fin de saison des pluies et en saison sèche ;

- . l'image satellite conduit à une meilleure intégration des fractures importantes en longueur, mais souvent faibles en nombre ;

- . si le contraste des images en noir et blanc est faible, divers traitements existants ont l'avantage de les améliorer ; par exemple, le traitement numérique des images peut simplifier l'information en soulignant certaines directions ;

- . le traitement des images permet aussi d'avoir des documents à des échelles plus grandes (1/100 000, 1/50 000).

Cependant, certains inconvénients limitent considérablement la méthode :

- . si l'échelle d'observation (1/200 000) représente un avantage pour des études de synthèse à l'échelle régionale, elle devient un inconvénient quand on doit passer à l'échelle du terrain ;

- . le manque de relief sur les images ne favorise pas une bonne relation entre ces dernières et la réalité du terrain, si bien que l'utilisateur est obligé de se rabattre ensuite sur les méthodes classiques ;



. les traitements élèvent les coûts et provoquent une certaine détérioration de l'information. Dans le socle du Burkina, où la méthode a été testée en Afrique de l'Ouest, des débits de 1 à 3 m<sup>3</sup>/h et dépassant parfois 10 m<sup>3</sup>/h ont été obtenus dans des forages implantés sur des linéaments repérés par interprétation des images satellites en complément à la photo-interprétation traditionnelle.

Mais il s'est finalement avéré que "l'usage de l'image satellite et son interprétation adaptée aux objectifs particuliers de reconnaissance en secteurs hydrogéologiques difficiles, pour l'obtention des débits ponctuels élevés, de l'ordre de 3 à 25 m<sup>3</sup>/h, ne représente qu'un outil supplémentaire nécessairement associé aux autres moyens d'investigation préalables qui demeurent fondamentaux et faciles à mettre en oeuvre" (S. SAWADOGO, 1982, p. 207).

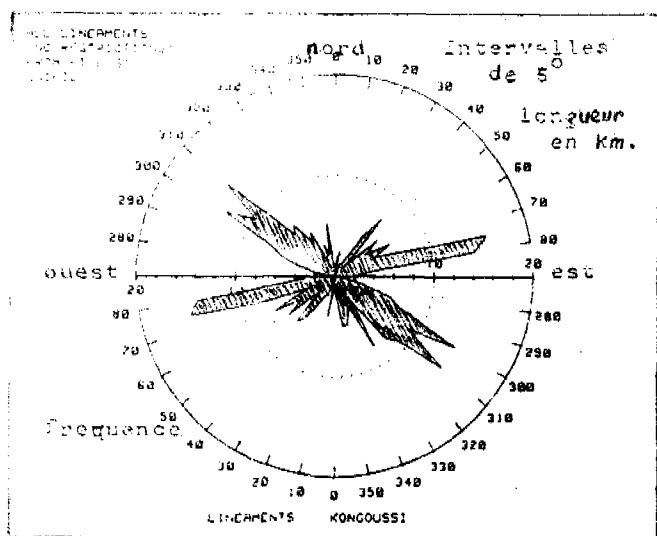
Néanmoins, quand les débits recherchés sont importants, l'image satellite peut se révéler un guide précieux pour l'hydrogéologue dans l'implantation des forages. Et il est permis de penser qu'avec la prochaine génération des satellites (Spot et Landsat D) dont la résolution au sol sera meilleure (30, 20, 10 m) et qui permettront la prise de vue stéréoscopique (Spot), l'image satellite fournira certainement autant de détails que les photographies aériennes au 1/50 000e.

Enfin, la télédétection thermique spatiale pourrait permettre également d'obtenir des résultats prometteurs en ce qui concerne l'hydrogéologie des zones fissurées. Les discontinuités géologiques ont en effet un comportement thermique variable, probablement fonction de plusieurs phénomènes dont elles peuvent permettre la perception indirecte -notamment l'état hydrique de l'écoulement.

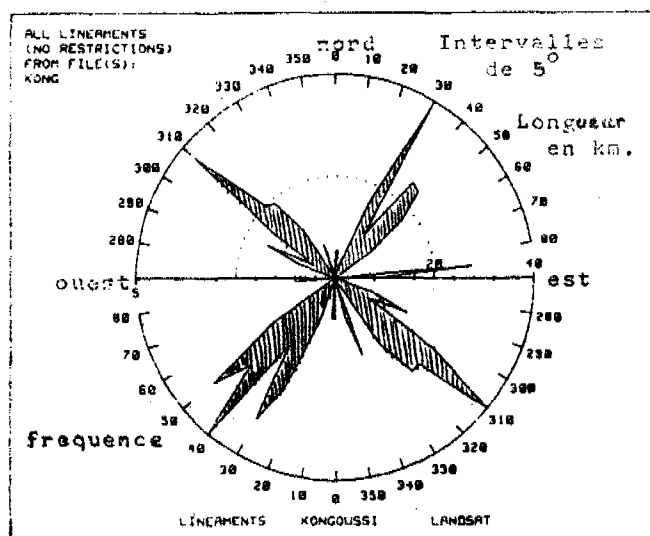
### III.1.3 - Corrélations photographies aériennes - Imageries satellites

Des expériences menées dans le cadre d'implantation d'ouvrages à partir des photographies aériennes classiques à l'échelle au 1/30 000e et d'imageries Landsat (image "fausse couleur" agrandie au 1/200 000e) a montré que l'analyse quantitative des linéaments ne correspond que partiellement. Certaines directions apparaissent dominantes sur une image plutôt que sur une autre (figure 7). Dans ce cas, les observations microtectoniques de terrain complétées par la géophysique doivent permettre de sélectionner la fracture dominante. La comparaison de ces deux méthodes d'implantation par photointerprétation a permis, dans le cadre d'un programme d'hydraulique

### CORRELATIONS ENTRE IMAGES LANDSAT ET PHOTOGRAPHIES AERIENNES



Lineaments photographies aeriennes.



Lineaments image satellite Landsat.

[ d'après IWACO AEP  
10 centres secondaires  
au BURKINA FASO ]

le Nord Sahel au Burkina, de juger comme "très favorables" les zones qui se situent à proximité immédiate d'un marigot axé sur un ou plusieurs linéaments "Landsat" majeur.

### III.1.2 Les directions de linéaments favorables

Comme il a été dit précédemment dans le chapitre concernant "la tectonique", il paraît difficile de dégager une règle générale concernant les directions favorables de linéaments pour l'exécution de forages.

Néanmoins, des statistiques réalisées en Côte-d'Ivoire et au Burkina ont mis en évidence des directions de linéaments favorables, tout au moins dans ces deux pays. Les directions sont les suivantes (figure 8) :

Géologie			
Pays	Vieux socle		Socle régénéré ou granite tardif tectonique
Faciès	Granite	Schistes	
BURKINA	N 90 - N 110	N 120 - N 140	N 150 - N 160
COTE D'IVOIRE	N 100 - N 110	N 70 - N 80	

### III.2 LA GÉOPHYSIQUE

Les méthodes géophysiques présentent un intérêt certain pour les recherches d'eau en zone d'aquifères discontinus et notamment en zone de socle cristallin. Elles sont employées depuis le développement de la méthode de forage au marteau fond de trou, c'est-à-dire, approximativement depuis les années 1970.

Ces méthodes visent à abaisser le coût des ouvrages en diminuant le nombre de forages négatifs par le biais d'implantations plus précises ; elles peuvent avoir pour résultat la découverte de meilleurs débits, un meilleur contrôle de la profondeur à forer et à coût égal l'obtention d'un meilleur service (diminution de la distance entre le village et le forage).

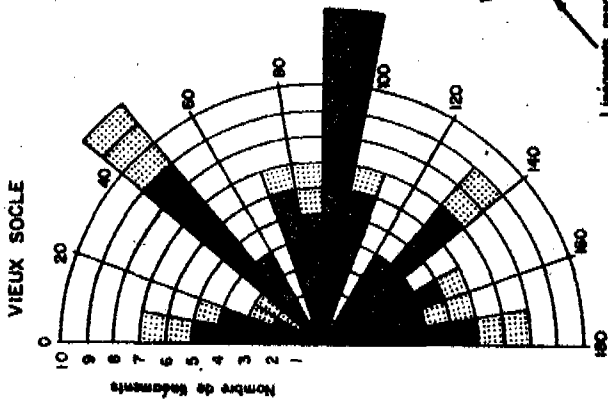
#### III.2.1 Rappel des techniques

Les différentes techniques utilisées en zone de socle cristallin dans le cadre des programmes de forages sont résumées au tableau 7. Parmi ces méthodes, la prospection électrique est la plus utilisée car la plus connue et la plus ancienne dans le domaine de la recherche d'eau.

INFLUENCE DE LA DIRECTION DES LINEAMENTS SUR LES TAUX D'ÉCHEC DE FORAGES

REGION DE DJIBO-ARIBANDA (BURKINA FASO)  
 ORIENTATION DES LINEAMENTS PAR FORMATION GEOLOGIQUE  
 (Projet SAHEL Ière - 2ème phase)

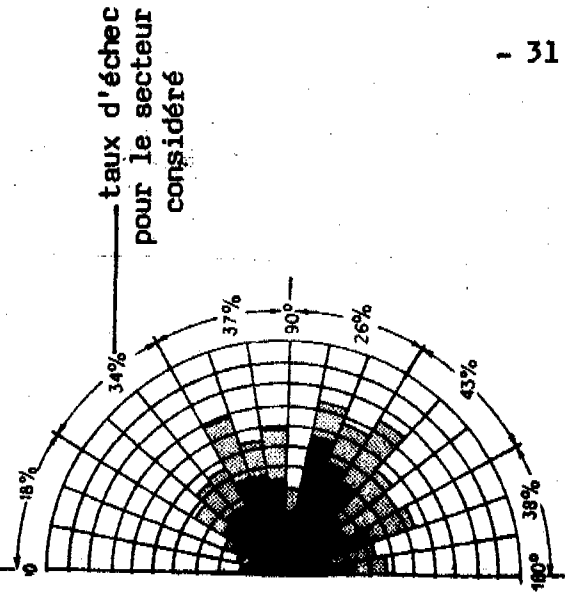
VIEUX SOCLE  
 GRANITES TARDI-TECTONIQUES



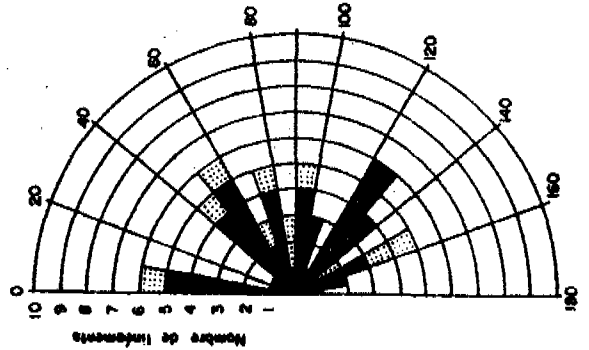
Lièvements associés à des forages positifs

REGION DE KORHOGO (COTE-D'IVOIRE)  
 ORIENTATION DES FRACTURES RETENUES POUR  
 IMPLANTATION DE FORAGES  
 (Projet Coton)

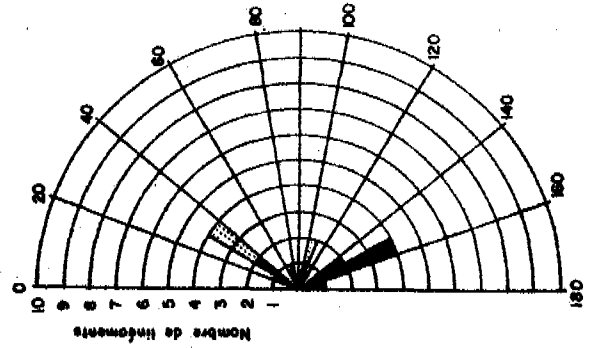
GRANITES



SCHISTES (BIRRIEMIEN)



ROCHES BASIQUES



SCHISTES

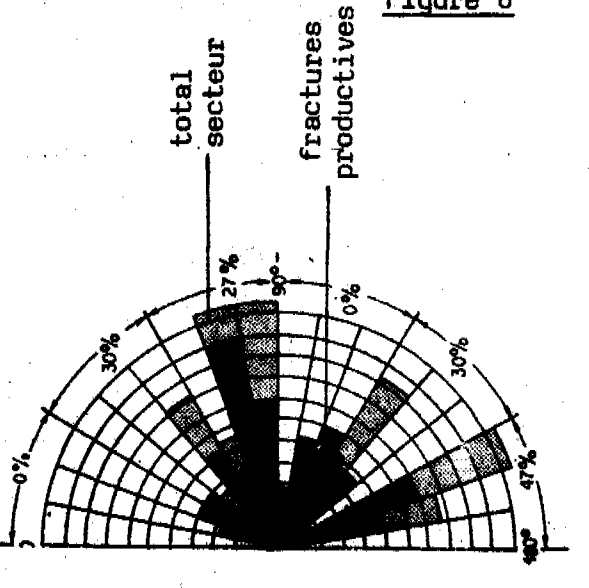


Figure 8

APPLICATION DES METHODES GEOPHYSIQUES  
EN ZONE DE SOCLE CRISTALLIN

METHODE	PRINCIPE	AVANTAGES - INCONVENIENTS
Sondage électrique	Etude la répartition verticale des résistivités apparentes dans le sous sol	<u>Avantages</u> : Détermine l'épaisseur d'altération. <u>Inconvénients</u> : - Nécessite un calage sur un forage existant - Interprétation varie en fonction de l'orientation du sondage par rapport à la fracturation.
Trainée électrique	Mesure de la résistivité apparente du sous-sol avec un dispositif ABNN fixe. Dispositif optimal : AB : 180m. MN : 20m. Pas de mesure : 20m	<u>Avantages</u> : Repérage de zones fracturées ou fissurées verticales. Méthode qualitative <u>Inconvénients</u> : - A utiliser avec des sondages électriques. - La précision du traité est fonction du pas de mesure et de la dimension du quadripole.
Sondage électrique pluridirectionnel	Etude de l'anisotropie électrique du milieu.	<u>Avantages</u> : Détermine la direction de fracturation. <u>Inconvénients</u> : Ne suffit pas pour planifier un forage.
Electromagnétique	Mesure du déphasage entre un champ magnétique primaire et un champ magnétique secondaire crée par un conducteur	<u>Avantages</u> : Méthode légère et rapide <u>Inconvénients</u> : Profondeur d'investigation est fonction de la fréquence. Généralement inférieur à celle obtenue par méthode électrique. Méthode difficilement applicable lorsqu'il y a un conducteur en surface.
Magnétisme	Recherche de fractures injectées de roches à susceptibilité magnétique (dolérite, roches basiques).	<u>Avantages</u> : Méthode rapide légère. <u>Inconvénients</u> : Ne peut détecter que des fractures injectées d'intrusions magnétiques. Ne peut être utilisé seule.
	Etude de la propagation dans le sous sol d'ondes élastiques provoquées par charges explosives.	<u>Avantages</u> : Bonne précision dans la détermination de la profondeur du socle et la surface piézométrique. <u>Inconvénients</u> : Mise en oeuvre lourde. Cadence lente. Interprétation délicate
Microgravimétrie	Etude des défauts de masse (minerais ou zones fracturées) Mesure de g (accélération de la pesanteur) et anomalie de Bouguer.	<u>Avantages</u> : Méthode légère. Applicable sans nivellement précis dans le cas de recherche de socle sous couverture sédimentaire. (Ex: Zinder - NIGER). <u>Inconvénients</u> : Nécessite une altimétrie très précise de la zone étudiée.

### III.2.2 Bilan de la contribution des méthodes géophysiques dans les programmes de forages

Sur 28 projets de forages recensés en zone de socle, 17 d'entre eux n'ont pas mis en oeuvre de méthodes d'implantation géophysiques (tableau 9). Parmi les 11 programmes restants, la méthode électrique a toujours été mise en oeuvre et complétée, dans 2 cas, par des méthodes sismiques et, dans 5 cas, par des méthodes électromagnétiques.

Si l'on compare les résultats obtenus après utilisation de la géophysique (tableau 8), on s'aperçoit que, globalement, les taux de réussite obtenus par géophysique sont identiques à ceux obtenus sans géophysique (de l'ordre de 63 %).

En fait, utilisée dans les cas difficiles, elle assure l'obtention de débits plus importants tout en réduisant les profondeurs forées. L'influence de la géophysique ne se manifeste pas simplement sur le critère du taux de succès mais par l'importance des débits obtenus. Ainsi dans le cadre d'une étude méthodologique au Togo, l'utilisation de la géophysique systématique a permis d'obtenir 69,5 % de forages à débit supérieur à 2 m<sup>3</sup>/h, alors que la moyenne était de 39,4 % pour cette gamme de débit.

L'expérience des programmes mis en oeuvre a montré que l'application de la géophysique doit être systématique dans le cas de formations de granites tardi-tectoniques ou régénérés, leucocrates récents ou pour traiter les cas d'échecs obtenus sans prospection géophysique préalable.

Les règles d'implantation que l'on peut retirer à partir de l'expérience des méthodes électriques mises en oeuvre dans quelques projets de forages sont les suivantes :

- Comparaison des directions de linéaments : photo aérienne / traînées électriques.

La correspondance est excellente dans le cas des filons de dolérite et correcte, à 20 grades près, dans les granites et les schistes.

- Profondeur du socle sain.

Des corrélations effectuées sur des données recueillies au Burkina, Guinée, permettant de conclure que les sondages électriques déterminent avec une bonne précision les profondeurs de substratum granitique. Avec plus ou moins 5 m d'erreur,

COMPARAISON DES TAUX DE REUSSITE OBTENUS DANS LES CAMPAGNES  
DE FORAGE AYANT UTILISE PARTIELLEMENT LA GEOPHYSIQUE

CAMPAGNE	GEOLOGIE	Avec géophysique			Sans géophysique		
		nombre forages	forages positifs	taux % réussite	nombre forages	forages positifs	taux % réussite
Hydraulique Sahel 1979 - 1981 BURKINA	Granite ancien	26	20	77	49	40	82
	Granite régénéré	22	14	64	33	15	45
OMBEVI Kayes Nord MALI	Granite	21	7	33	32	6	19
	Schiste	19	6	32	30	13	43
Projet PNUD Mali (1974 - 82)	Grès schiste Dolérite	446	294	66%	270	145	54%
Projet Coton (COTE D'IVOIRE)	Granite	59	39	66	302	206	68
Hydraulique Sahel 1ère et 2ème phase BURKINA	Granite, schiste Granite régénéré Roches Vertes	61	38	62	158	126	79%
T O T A L		654	418	64	874	551	63

la corrélation est bonne à 80 % pour les profondeurs d'investigations usuelles. Elle est globalement meilleure pour les granites que pour les schistes car la transition entre altération et socle sain est plus franche.

- Relation entre la forme de l'anomalie électrique et la productivité de l'ouvrage.

On peut considérer comme particulièrement favorables un site où les résultats auront été les suivants :

- . Largeur de l'anomalie supérieure à 100 m.
- . Résistivité minimale de l'anomalie : 70 ohm. m.
- . Contraste de résistivité : 2 à 2,4
- . Substratum résistant à plus de 25 m de profondeur.
- . Altération noyée sur une épaisseur minimale de 10 m.

Les figures 9a et 9b mettent en évidence les relations entre :

- le débit des ouvrages réalisés en zone de socle et la résistivité apparente de la formation, d'une part,
- le débit des ouvrages et l'épaisseur d'altération (ou la profondeur de la roche compacte) d'autre part.

Ces corrélations corroborent les règles d'implantation qui ont été annoncées ci-dessus et notamment que l'on doit rechercher des anomalies présentant une résistivité apparente inférieure à 100 ohm. m et que la productivité des ouvrages augmente avec l'épaisseur d'altération.



RAPPORT ENTRE LA RESISTIVITE APPARENTE

Figure 9.a

EN LONGUEUR AB = 200 m ET LE DEBIT

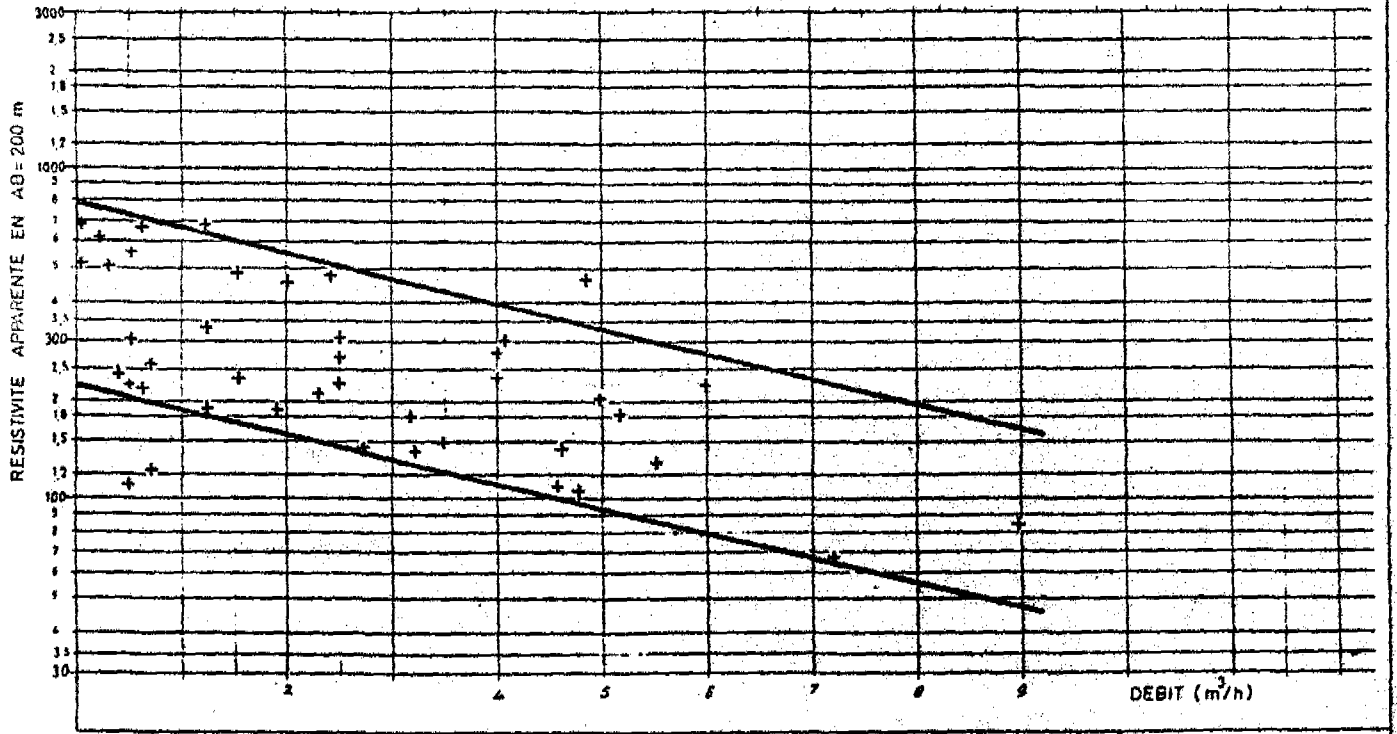
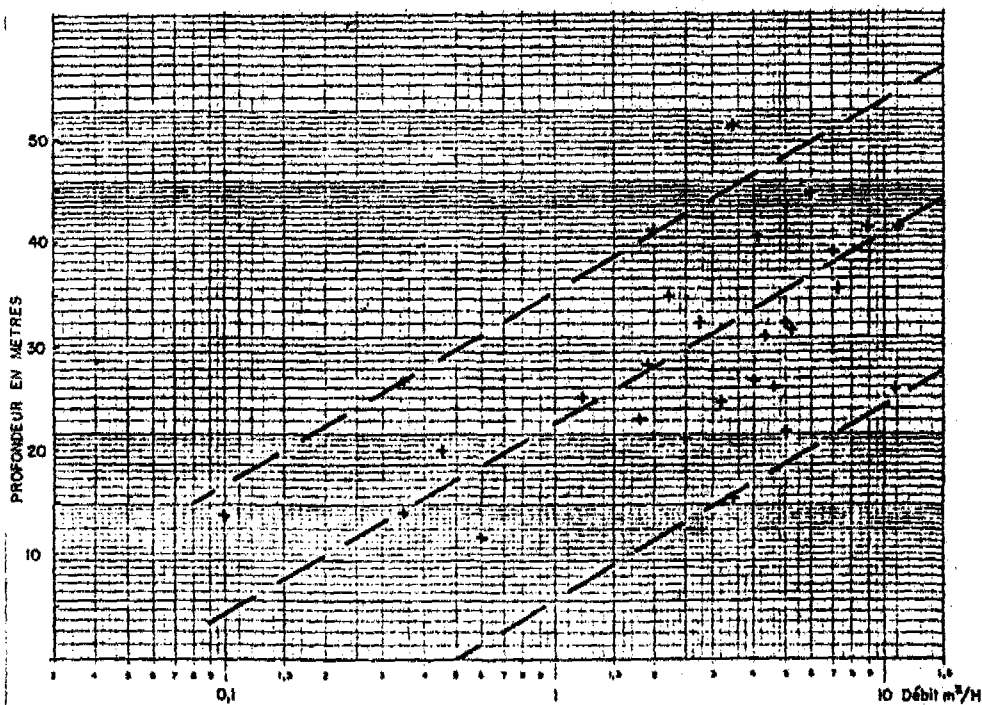


Figure 9.b

RAPPORT ENTRE LA PROFONDEUR DE LA ROCHE COMPACTE

SELON LA SISMIQUE ET LE DEBIT DES FORAGES



d'après ARLAB  
1980

### III.3 LES TAUX DE RÉUSSITE ENREGISTRÉS SUR LES PROGRAMMES DE FORAGES

#### III.3.1 Remarques préliminaires

La comparaison des taux de réussite des projets réalisés dans le bouclier cristallin porte uniquement sur les taux enregistrés sur les campagnes de forages et fournis par les rapports de fin de projets.

Cette comparaison de résultats de projets n'est pas rigoureuse et a uniquement valeur d'indication car les taux de réussite varient d'un projet à l'autre et au sein d'un même projet selon de nombreux facteurs (géologie, emploi de la géophysique, critère de distance par rapport au village, profondeur contractuelle des ouvrages, seuil de débit de réception des forages...). Dans le sens d'une meilleure comparaison entre programmes, et, afin d'aboutir à une meilleure programmation des projets futurs, il conviendrait de définir et d'appliquer uniformément des critères stratégiques :

- + débit de référence
- + profondeur moyenne des forages
- + distance maximale autorisée entre le point d'eau et le village
- + pourcentage de villages abandonnés après un ou plusieurs tentatives.

#### III.3.2 Résultats des programmes

Les résultats de programmes réalisés dans la zone d'étude sont donnés au tableau 9 et concrétisés sur la figure 10.

L'examen de ces résultats montre que les taux de réussite sont extrêmement variables. Ils paraissent dépendre des conditions géologiques et climatologiques. Des corrélations entre les taux de réussite et l'épaisseur d'altération se dégagent les conclusions suivantes (figure 11a) :

Dans les granites, les taux de réussite varient de 23 à 84 % avec une moyenne de 64 % et semblent être grossièrement liés à l'importance de l'altération.

Dans les zones de socle limitant les dépressions sédimentaires (exemple : Projet Yatenga Comcè - 5ème FED - Burkina. Zone de contact granite - sable du Continental Terminal de la plaine du Gondo) le drainage latéral vers la dépression sédimentaire peut entraîner un dénoyage des altérations qui ne contribuent alors que très faiblement à l'alimentation des fractures (par leur fonction capacitive) et entraînent des taux de réussite relativement faibles dans ces zones.

RESULTATS DE PROJETS DE FORAGES EN ZONE DE SOCIE CRISTALLIN.

	PROJET	PAYS	Epaisseur moyenne Altération	Pluviométrie	GEOLOGIE	FORAGES		GEOPHYSIQUE
						Nbre	Réussite%	
1	Sahel 79-81	BURKINA	11	400 - 600	GRA Tardi.	14	28	oui. E
2	" 79-81	"	15	" "	GRA régénéré	55	55	oui. E
3	" "	"	25	" "	GRA	76	77	oui. E
4	" "	"	28	" "	SCH	35	83	non.
5	1000 forages CCEE	NIGER	—	500 - 700	GRA / SCH	63	84	non.
6	Mitako 130 forages	NIGER	13	500 - 700	GRA	90	77	non.
7	CCEE PAC	"	25	" "	SCH.	46	85	non.
	Mitako 125 forages	"	20	" "	GRA.	76	57	oui. E+M
	2. Antanta/2000 Bas	"	28	" "	SCH.	7	71	oui. E+EM
	Yatenga-Comou 5ème FED	BURKINA	8	600 - 800	GRA	47	42	non.
	(YATENGA)	"	30	" "	SCH	68	45	non.
	Yatenga - Comou	"	20	1100	GRA	118	63	non.
	5ème FED (Comou)	"	31	1100	SCH	66	70	non.
4	HELVETIAS.	MALI	29	1100 - 1500	GRA / SCH	266	67	oui. E.
5	COTON (Projet)	COTE D'IVOIRE	21	1100 - 1400	GRA	361	68	oui. E.
6	(BIRD)	"	"	"	SCH	78	86	non.
7	"	"	60	1200	SCH	16	25	non.
8	MANDIANA	GUINEE	38	1500	SCH	42	88	non.
9	BOUAKE/BOUMA	COTE D'IVOIRE	28	1200	SCH	760	85	non.
0	(4ème FED)	"	22	1200	GRA			non.
1	BONDOUKOU (5ème FED)	COTE D'IVOIRE	47	1200	GRA	96	84,4	non.
22	CHESVI 1980-82	MALI	9	600 - 800	GRA	53	25	oui. E+M
23	" "	"	7	"	SCH	49	39	oui. E+M
23	Boucle Cacao(DGHC)	COTE D'IVOIRE	33	1200	SCH	848	88	non.
			12	1200	GRA	254	83	non.
24	AVV 1981-1982	BURKINA	15	700	GRA	40	72	oui. E+M
25		"	15	700	SCH	50	90	oui. E+EM
26			16.	700.	R.Vertes	17	50	oui. E+EM
27	UNICEF	BURKINA	8	700	GRA	101	60	non.

GEOPHYSIQUE :

E: Electrique.

EM: Electromagnetisme.

M: Magnetisme.

CARTE DE REPARTITION DES PROJETS DE FORAGES  
 TAUX DE REUSSITE - EPAISSEUR D'ALTERATION

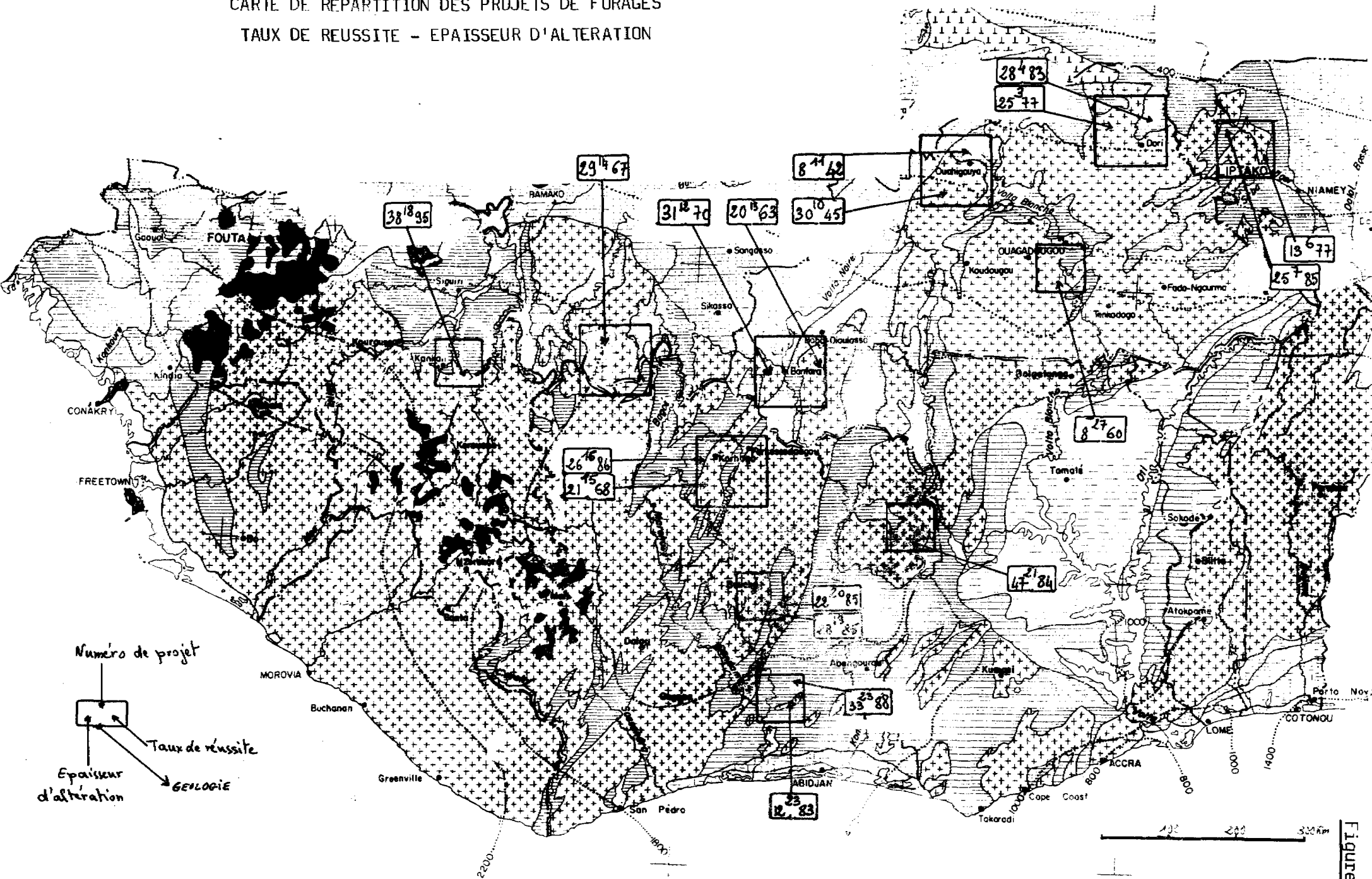


Figure 10

Figure 11.a

CORRELATION ENTRE EPAISSEUR D'ALTERATION ET TAUX DE REUSSITE

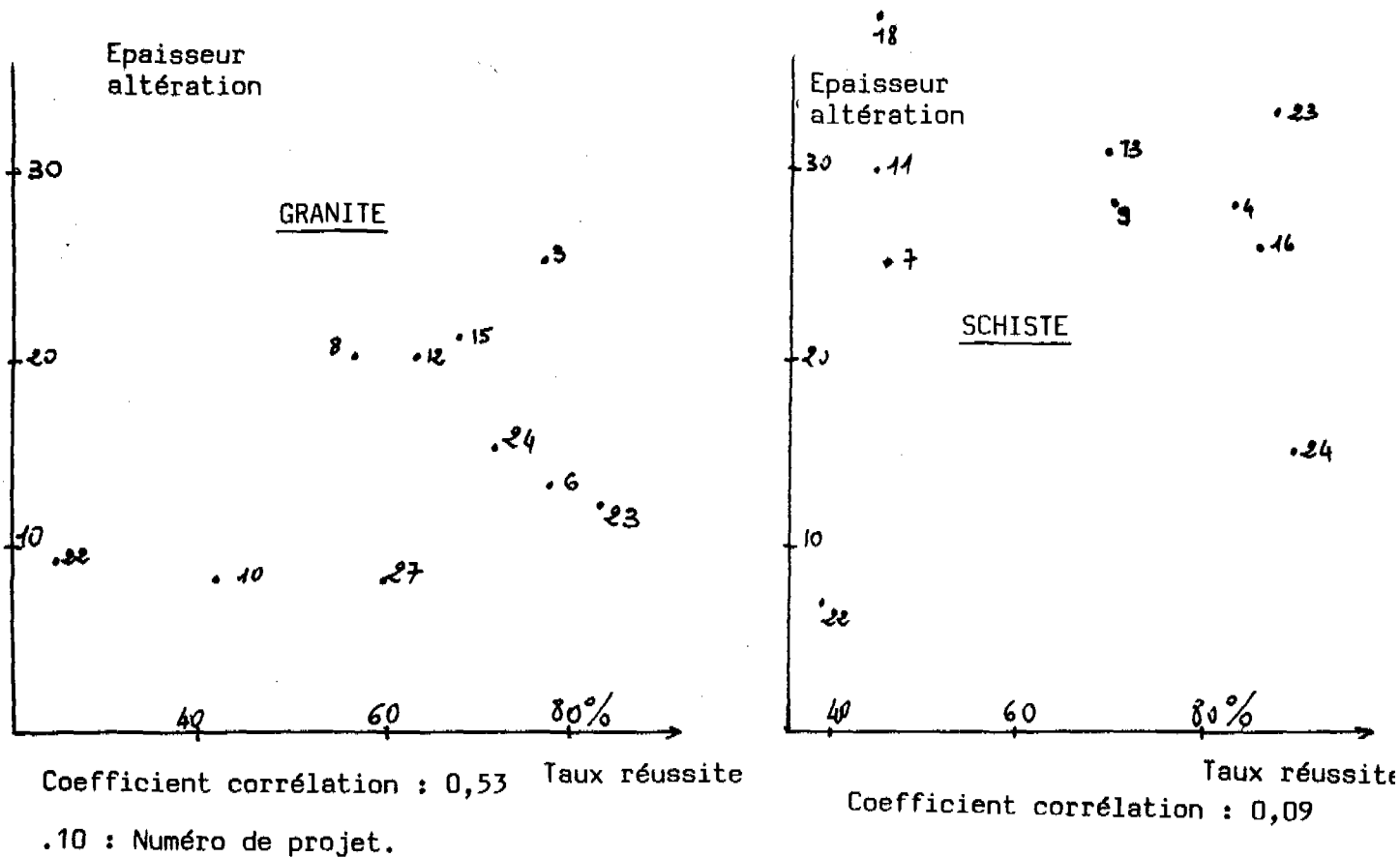
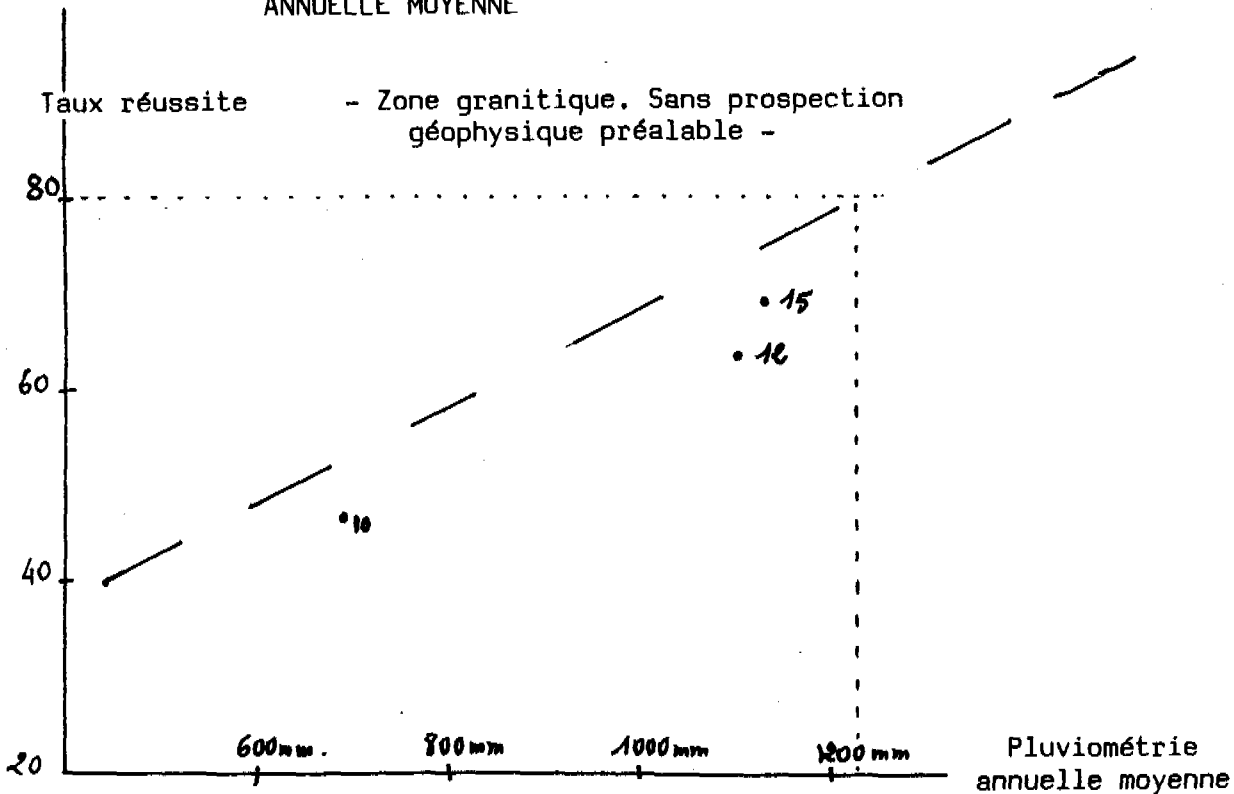


Figure 11.b

CORRELATION ENTRE TAUX DE REUSSITE ET PLUVIOMETRIE ANNUELLE MOYENNE



.10 : Numéro de projet.

Dans les schistes, les taux de réussite sont en moyenne plus élevés (66 %) mais ne paraissent pas être corrélés avec l'épaisseur d'altération. Ces résultats semblent assez logiques du fait de la nature lithologique des schistes.

L'ordre de grandeur des taux de réussite dans les différentes formations géologiques du socle sont les suivants :

Formations géologiques	Taux de réussite
Schistes birrimaniens	72 à 90 %
Granite ancien à forte épaisseur d'altération ( 20m)	70 à 85 %
Granite ancien à épaisseur d'altération moyenne (10 à 20 m)	50 à 65 %
Granite ancien à altération déveillé	20 à 40 %

Les conditions pluviométriques semblent constituer en atout en faveur des taux de réussite (Figure 11h). Les taux de réussite augmentent grossièrement avec la pluviométrie. Le seuil de réussite de 80 % semble être dépassé dans la majorité des cas, en zone de granite ancien, sans prospection géophysique préalable, à partir d'un seuil pluviométrique de 1200 mm. Cette dernière considération doit être utilisée avec beaucoup de précaution car, d'une part, les projets sont difficilement comparables du fait de la variété des critères adoptés sur le taux de réussite et, d'autre part, du fait de l'intervention de la prospection géophysique dans les différents projets. Aussi nous avons écarté les projets qui ont fait intervenir de la géophysique et retenu uniquement ceux qui concernaient une même formation géologique et en particulier, les granites anciens, qui constituent la formation la plus développée dans le bouclier Ouest africain.

#### IV. LES CONNAISSANCES SUR LES CAPACITES HYDRAULIQUES DU SOCLE

##### IV.1 RAPPEL DU FONCTIONNEMENT DU SYSTEME AQUIFERE

Le modèle hydrodynamique du système aquifère se schématise par un système bicouche ou même multicouche, des aquifères monocouches (altération ou fissure) peuvent éventuellement exister mais de façon isolée :

- Un niveau inférieur strictement fissuré et fracturé parcouru par des fractures longues et profondes que recoupe l'ouvrage d'exploitation. Ce niveau peut avoir une épaisseur d'une quinzaine de mètres.

- Un niveau intermédiaire qui est la zone fissurée épais de 2 à 6 m. Ce niveau possède une perméabilité de fissure élevée malgré un remplissage partiel des vides par des produits d'altération.

- Un manteau altéré formant le niveau supérieur. La perméabilité de cet ensemble est mauvaise mais contribue, par sa fonction capacitive, à alimenter les niveaux inférieurs.

Des essais de pompage effectués sur 2 stations expérimentales, à Zigla et Mogtédo, dans le cadre d'une étude sur le milieu cristallin (CIEH, 1979) ont montré que le débit d'exploitation du niveau inférieur, généralement capté par les forages, ne peut être maintenu que par la présence du niveau supérieur altéré.

Le rôle de réserve du niveau altéré ne peut être maintenu que pour une hauteur d'aquifère de 8 à 10 m à l'étiage. L'exploitation optimale de ces réserves ne peut se faire que s'il existe un drain naturel suffisant pour induire le plus grand volume d'altération saturée. Le système drainant peut être les arènes grenues situées à la base des altérations ou la zone fissurée intermédiaire. Les calculs ont montré qu'un pompage sollicite une fracture sur 200 m de long au bout de 40 h et peut atteindre 1000 m d'influence au bout d'un an. Ces essais montrent enfin que le choix doit porter sur des fractures au moins kilométriques pour assurer un débit pérenne même dans le cas de l'hydraulique villageoise.

#### IV.2 LES POTENTIALITES DE LA COUVERTURE D'ALTERATION

De nombreux programmes de puits exécutés il y a quelques années portaient uniquement sur ce réservoir qui était considéré à l'époque comme le seul contenant des ressources en eau disponibles en terrain cristallin et cristallophylien du bouclier Ouest africain.

Cet aquifère est exploité, par exemple, en Côte-d'Ivoire où plus de 3000 puits l'atteignent à une profondeur maximale de 29 m. Il est difficile, dans cet aquifère de cartographier les zones les plus favorables car d'une part les échecs des programmes mis en oeuvre ne sont pas inventoriés, et d'autre part les tests de débits mis à part quelques exceptions (par exemple "le projet 5ème FED Yatenga Comoë au Burkina") ne sont pas rigoureux et systématiques.

Dans la pratique, l'exécution de puits captant cet aquifère est plus liée à la disponibilité du matériel qu'à la volonté d'exploiter systématiquement ce réservoir.

##### IV.2.1 Les résultats acquis

L'expérience montre que, dans les pays concernés par l'étude :

- Seules les zones granito-gneissiques sont aptes à être captées. Dans le cadre du programme "Boucle du Cacao, en Côte-d'Ivoire, les altérations argileuses des schistes birrimiens ont été écartées car les essais de pompage ont montré que les venues d'eau de prime abord importantes diminuaient rapidement dans le temps et que les ouvrages se colmataient rapidement par apport de particules argileuses, contrairement à ce qui se produit dans les arènes granito-gneissiques.

En ce qui concerne les caractéristiques hydrodynamiques des altérations, des essais de pompage réalisés dans le Centre-Est du Burkina, dans le cadre de travaux effectués en 1973-1974 ont montré que les nappes d'arènes sont très hétérogènes sur une même verticale avec des transmissivités très variables et également très variables d'un point à un autre.



La perméabilité moyenne serait dans cette région de l'ordre de  $10^{-5}$  m/s. La porosité utile déduite des fluctuations de niveau de cette nappe serait de l'ordre de 1,5 %, valeur faible due à la présence d'horizons argileux dans les altérations.

Un puits réalisé dans les altérations granito-gneissiques, permet en général d'obtenir des débits recherchés si la tranche de hauteur mouillée exploitée est voisine de 8 m.

Le débit obtenu sera d'autant plus important que l'on capte la totalité des altérites saturées.

Si l'on se réfère à la schématisation des réseaux hydrographiques, les taux d'échecs de puits ont été évalués dans le cadre du projet "Coton" en Côte-d'Ivoire à :

Réseau	Profondeur moyenne du socle (m)	Taux d'échec (*)
1	20 - 25	30 %
2	15	60 %
3	15 - 20	50 %
4	20 - 25	50 %

(\*) Taux d'échec : Débit journalier du puits inférieur à 5 m<sup>3</sup>/j.

Ces résultats sont comparables à ceux obtenus dans le cadre du projet 5ème FED au Burkina Faso où l'on a obtenu à l'issue de la campagne 1984 :

Zone	GRANITE		SCHISTES		Pluviométrie
	(1)	(2)	(1)	(2)	
Comoë	28	61	8	62	1100 mm
Yatenga	22	50	28	74	600 mm

(1) Nombre de puits réalisés.

(2) Taux d'échec (débit d'exploitation inférieur à 5 m<sup>3</sup>/j).

#### IV.2.2 Stratégie d'exploitation

De ces résultats, il semble se dégager une stratégie d'exploitation de l'aquifère d'altération :

- Le puits doit être arrêté au contact altération/socle. Dans ce cas la hauteur d'eau suffisante doit être de 8 m.

- Si le puits n'atteint pas le socle, la hauteur d'eau doit être de 12 m pour assurer un débit d'exploitation minimum de 5 m<sup>3</sup>/j.

Des évaluations récentes ("Evaluation des projets FAC au NIGER" et "Situation de l'hydraulique villageoise en Haute-Volta") ont montré que ces conditions sont rarement remplies, conduisent aux situations suivantes :

- Puits "Liptako" au NIGER : Hauteur d'eau moyenne dans 15 puits en mars 1981 : 2 m.

- Puits "HER" au BURKINA : Sur 589 puits modernes réalisés entre 1976 et 1979 :

hauteur d'eau de 1 à 3 m = 37 %

hauteur d'eau de 3 à 5 m = 63 %

hauteur d'eau  $\geq$  5 m = 0.

Compte tenu de la baisse régulière du niveau des nappes durant la présente période climatique déficitaire on ne saurait encore insister sur la nécessité de respecter les critères d'exécution cités précédemment. Les résultats de l'analyse statistique\* montrent que ces critères sont généralement respectés dans la majorité des pays et applicables à toutes les formations géologiques pour lesquelles la hauteur d'eau moyenne dans les altérations, tous pays et toutes formations géologiques confondus, est de 15 m pour une épaisseur moyenne d'altération de 22,5 m.

Il importe que, dans le cadre de la mise en oeuvre de programmes de puits ou de forages captant les niveaux d'altération, une étude hydro-géologique préalable de détail soit entreprise car les données citées précédemment n'ont qu'une valeur statistique. Ces études se révéleraient primordiales si l'on envisage d'effectuer une campagne de puits forés (type Calweld) dont le matériel de forage (cf. projet Coton en Côte-d'Ivoire) requière des conditions de travail bien particulières : épaisseur d'altération inférieure à 28 m et hauteur d'eau supérieure à 8 m.

---

\* Effectuée dans le cadre de la présente étude.

#### IV.3 CAPACITE DU SOCLE FISSURE

La recherche d'eau dans la zone fissurée et fracturée est relativement récente. Elle a débuté avec l'apparition de la technique de forage au marteau fond de trou dans les années 1970.

Les études antérieures (\*) ont montré que le socle fissuré et fracturé doit être exploité par l'intermédiaire de fractures régionales. Du fait du phénomène de décompression des roches, ces fractures se referment généralement autour de 80 m de profondeur.

Le milieu fissuré étant par définition un milieu anisotrope, les théories d'écoulement souterrain en milieu homogène et isotrope s'appliquent très mal. Aussi faut-il réserver une importance toute relative aux valeurs de transmissivité obtenues par interprétation, suivant les méthodes classiques, des essais de pompage réalisés dans le cadre des programmes de forages.

La gamme des valeurs de transmissivités généralement calculée est voisine de  $10^{-6}$  à  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s (exceptionnellement  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s dans des schistes en Guinée, Conakry).

Un bilan des procédures d'essai de débit réalisées dans le bouclier Ouest africain, dans le cadre des programmes de forages d'hydraulique villageoise ou semi-urbaine (alimentation de centres secondaires de plus de 5000 ha) montre une grande hétérogénéité des méthodes (tableau 10). Ces méthodes limitées à quelques heures de pompage sont surtout destinées à connaître l'ordre de grandeur des capacités de l'ouvrage, plutôt que les valeurs de transmissivités et coefficient d'emmagasinement. Compte tenu de la représentativité de la transmissivité calculée par les méthodes classiques d'interprétation appliquées généralement dans les projets, il serait préférable d'adopter un paramètre commun plus concret. Ce paramètre pourrait être le débit spécifique de l'ouvrage obtenu après un temps déterminé de pompage provoquant une pseudo stabilisation.

L'expérience des essais de pompage prolongés au delà de quelques heures (2 à 3 heures) a montré que, très souvent des effets "de limite" influencent la descente régulière du niveau d'eau dans l'ouvrage. C'est ainsi

---

(\*) CIEH / Géohydraulique - 1978 et 1979.

Procédures d'essai de débit entreprises  
dans le cadre de programmes de forages  
réalisés dans le bouclier Ouest-Africain

Projet / Pays	Procédure
Yatenga - Comos 5ème FED (BURKINA)	- 3 paliers de 1h chacun .. - 1 essai de longue durée (24h)
Centre - UNICEF (BURKINA)	Air lift uniquement. Le débit de l'ouvrage est estimé à 130% du débit "Air lift".
Sahel 1ère et 2ème phase-FAC (BURKINA)	1 palier de 6h. à débit constant.
225 forages CCCE/Entente (Cote d'Ivoire)	3 paliers à débit croissant. une durée totale de 6h.
Mali Sud Helvetas (Mali)	10 heures de pompage à débit constant.
Liptako 1000 forages. (NIGER)	1 essai à débit constant pendant 4h
Liptako 130 forages (FED) (NIGER)	4 paliers à débit croissant, chaque palier doit durer 4h ou se poursuivre 1/2h après la stabilisation.
125 forages C.Entente/Pays Bas Liptako (NIGER)	Pompage à débit constant pendant 8h.
10 Centres secondaires (BURKINA)	- 1 essai de 5 heures - 5 paliers de 1h à débit croissant. - Un essai de longue durée (6 à 3 jours)
760 forages 4ème FED (COTE D'IVOIRE)	3 paliers à débits croissants durée totale 6h.
Boucle du Cacao. (COTE D'IVOIRE)	3 paliers à débits croissants. Durée totale 6h.

que dans le cadre du programme ORD du Sahel mené au BURKINA (tableau 11) environ 22 % des essais de pompage ont été perturbés par des effets de :

- limite imperméable
- limite alimentée
- drainance temporaire des altérations.

Ces constatations sont confirmées, d'une manière plus générale par les résultats enregistrés au Burkina, Côte-d'Ivoire et Mali (tableau 12) où la majorité des essais de pompage de longue durée (durée supérieure à 24 h) ont subi des effets de drainance temporaire ou de limite alimentée à l'issue de la première heure de pompage.

Il faut signaler en outre (tableau 13) que dans le cas des essais de pompage réalisés en hydraulique villageoise, les débits relativement faibles alliés à de mauvaises capacités hydrauliques de l'aquifère conduisent à des effets de citernes qui peuvent perturber les courbes de descente durant les 20 premières minutes de pompage.

#### IV.4 RELATION ENTRE AQUIFERES - UTILITE DES ESSAIS DE POMPAGE DE LONGUE DUREE

Nous avons vu au paragraphe précédent que les essais de pompage de longue durée effectués dans le socle cristallin mettent en évidence, dans la plupart des cas, des phénomènes d'alimentation ou de limite.

L'alimentation de la zone fissurée et fracturée est assurée par le manteau altéré qui possède une fonction capacitive élevée. Du fait de ce schéma hydraulique très fréquent, les méthodes d'interprétation propres au milieu fracturé sont conseillées au début de pompage. On a intérêt, même si les raisons économiques ne militent pas en leur faveur, à effectuer des essais de pompage de longue durée (supérieure à 72 h) pour entrer dans le domaine de validité des méthodes d'interprétation classiques utilisées en milieu poreux mais il faut s'attendre à un effet de drainance (débit retardé) s'exprimant par un palier de Boulton.

- Effets perturbateurs -  
Résultats des essais de pompage  
réalisés dans le cadre  
du projet "ORD Sahel"  
- BURKINA FASO -

Effets perturbateurs	% de cas	Interprétation
- Front d'alimentation	6 %	- Amélioration des caractéristiques de l'aquifère : décolmatage de fissures, limite à charge constante.
- Ecran imperméable	7 %	- Fermeture de fissures : fin de zone fracturée, intrusion magnétique, limite lithologique.
- Drainance temporaire des altérations.	9 %	- Changement de pente de descente de niveau après 40 mn de pompage. Reprise de la pente initiale à partir de 100 mn : sur-alimentation temporaire par égouttement des altérations.

RESULTATS D'ESSAIS DE POMPAGE DE LONGUE DUREE  
EFFECTUES EN ZONE DE SOCLE CRISTALLIN

FORAGE	DEBIT (m <sup>3</sup> /h)	DUREE (h)	COMMENTAIRES
- BURKINA - ST1 AEP Toma	6	118	Descente régulière à partir de 10 mn.
ST2 AEP Toma	4	50	Pseudo stabilisation à partir de 50mn
D110 AEP Djibo	8	145	Descente régulière
SD2 AEP Djibo	7	162	Pseudo stabilisation à partir de 16h.
SD3 AEP Djibo	Piézomètre	à	22m de SD2. Idem SD2
SG6 AEP Gourcy	4	95	Pseudo stabilisation à partir de 50h.
SG3 AEP Gourcy	Piézomètre	à	19m de SG6. Idem SG6
SZ1 AEP Zabré	4	120	Pseudo stabilisation à partir de 5mn
SZ2 AEP Zabré	2	72	Pseudo stabilisation à partir de de 80mn.
SZ3 AEP Zabré	2,5	95	Descente régulière à partir de 10mn. Stabilisation à partir de 33h.
SR3 AEP Réo	5	72	Pseudo stabilisation à partir de 3h
SR1 AEP Réo	1	24	" " " de 20mn
Aribinda 1 (Hydraulique villa- soise-Sahel)	3,6	6h	Palier de stabilisation (effet de Boulton) entre 20 et 240mn.
- MALI - Fakola 1 (Mali-Sud - Bougouni)	1,9	11	Pseudo stabilisation à partir de 40mn.
COTE D'IVOIRE Yamoussokro (ENSTP)	3,5	43	Drainance des altérations sus-jacentes

Temps de vidange d'une colonne  
d'eau en fonction du  
débit d'exhaure

Perturbation d'un essai de pompage  
en zone de socle cristallin

Caractéristiques du forage : Tubage 110 mm intérieur.

Débit	Rabatement, (m)			
	5m	10m	15m	20m
0,5 m <sup>3</sup> /h	6 mn.	12 mn.	17 mn.	23 mn.
1 m <sup>3</sup> /h	2.5 mn.	5.5 mn.	8.5 mn.	11 mn.
1,5 m <sup>3</sup> /h	2 mn.	3.5 mn.	5.5 mn.	7.5 mn.
2 m <sup>3</sup> /h	1.5 mn.	3 mn.	4 mn.	5.5 mn.



#### IV.5 EXTENSION DES AQUIFERES DE FISSURE. REPRESENTATIVITE DES CARTES PIEZOMETRIQUES.

Peu de cartes piézométriques ont été établies en zone de socle cristallin.

En ce qui concerne la couverture d'altération, le bassin de Korhogo, en Côte-d'Ivoire, a fait l'objet d'un relevé piézométrique (CIEH / BRGM, 1972) qui a montré que la surface piézométrique présentait une allure régulière et pouvait être assimilée à une surface cylindrique à lignes de courant parallèles.

En ce qui concerne le niveau fracturé, les schistes de la boucle du Cacao en Côte-d'Ivoire ont fait l'objet d'études piézométriques qui ont montré que lorsque la fracturation et la lithologie des formations le permettaient, on pourrait être en présence d'un aquifère généralisé installé indifféremment dans les formations schisteuses et granitiques (cf. Haubert : Résultats des projets FORACO I et II). Cette notion d'aquifère généralisé a été confirmée en 1979 par des essais de pompage de longue durée réalisés sur un site pilote (Zigla) au Burkina - (CIEH / GEOHYDRAULIQUE, 1979) où le système multifissuré s'est comporté comme un aquifère généralisé : la chute et la remontée des niveaux dans le forage et les piézomètres évoluaient d'une façon semblable à celle d'un milieu homogène et isotrope.

#### IV.6 LA RECHARGE DES AQUIFERES

En ce qui concerne la couverture d'altération, le bassin de

##### IV.6.1 Estimation de la recharge par la méthode des bilans hydrologiques

On admet qu'il doit exister un équilibre entre les précipitations d'une part et le ruissellement, l'évapotranspiration et l'infiltration d'autre part sous la forme de l'équation :

$$P = R + E + I$$

avec : P = Précipitation

R = Ruissellement

E = Evapotranspiration réelle

I = Infiltration.

Dans ces quatre termes, seule l'infiltration contribue à la recharge des aquifères. L'estimation de l'évapotranspiration est particulièrement délicate et, le plus souvent, est approchée par les formules de PENMAN, TURC, COUTAGNE ou THORNTHWAITTE. Ces formules présentent un inconvénient majeur, elles ne tiennent pas compte de la répartition journalière des averses dans le temps, ni la relation intensité - durée de pluie.

Différentes approches ont été effectuées dans le cadre d'études antérieures, pour connaître l'ordre de grandeur de la recharge des aquifères.

Dans la région du Centre-Est du Burkina Faso, où la pluviométrie moyenne est voisine de 700 mm, un bilan hydrologique du sous bassin de la Volta Blanche a permis (F. KABORE, 1975) d'estimer l'infiltration moyenne à 127 mm sur la période 1974-1975 et une porosité utile de la nappe d'arènes intéressée par les fluctuations saisonnières à 1,5 %. Cette valeur relativement faible s'explique dans le cas particulier par la présence de niveaux argileux. Ce calcul de bilan montre qu'environ 18 % de la pluie contribue à l'alimentation des aquifères.

Dans le cadre de la surveillance de la ressource, le CIEH a installé un piézomètre à OUAGADOUGOU. Différentes méthodes de calcul de bilan hydrologique ont été appliquées pour restituer les fluctuations piézométriques.

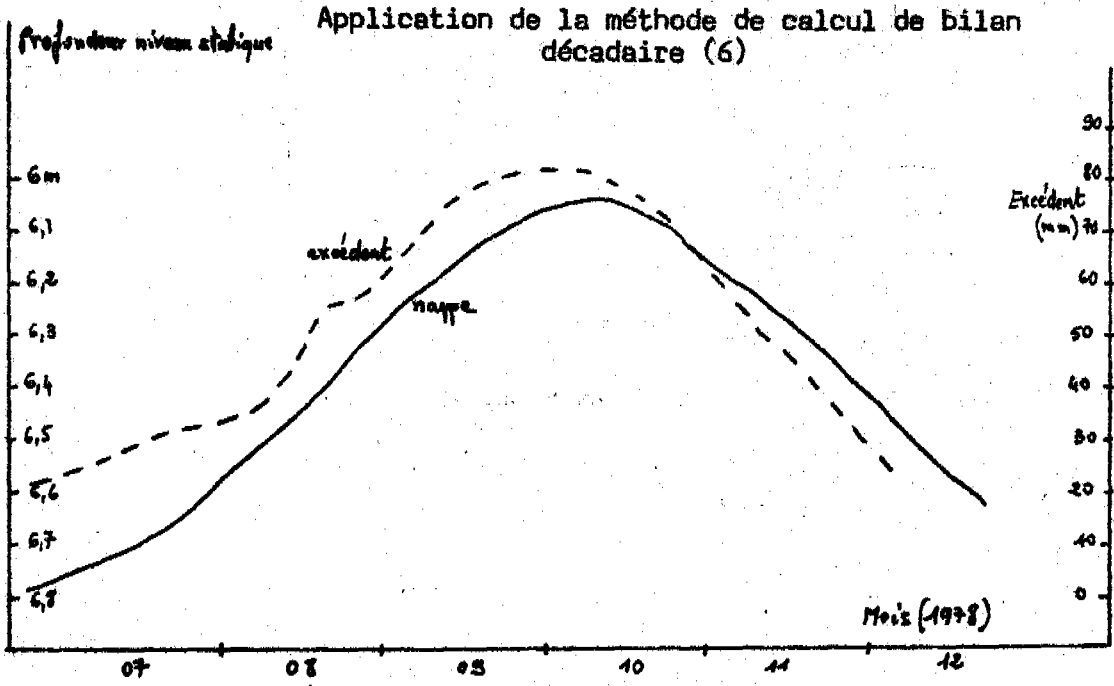
Ces méthodes prennent en compte l'évapotranspiration et la réserve utile du sol. Les méthodes décadaires appliquées ont été les suivantes :

Méthode	Calcul ETP	Réserve utile	Commentaires
1	:ETP = 0,6. Ev. Piche	: 100 mm	: Pas d'excédent
2	:ETP = $\alpha$ Piche	: 100 mm	: Pas d'excédent
3	: $\alpha$ = 0,28 à 0,43 en fonction de la saison	:	:
	:ETP = ETP Penmann	: 100 mm	: Pas d'excédent
4	:ETP = (Ev. Bac) X(k) : k = Coeff. végétation	: 100 mm	: Mauvaise corrélation avec piézométrie
5	:ETP = (Ev. Bac) X(K) X(k) : K = Coefficient fonction de l'humidité et du vent. : k = Coefficient fonction de la végétation.	: 100 mm	: Mauvaise corrélation avec la piézométrie
6	:ETP = $\frac{\text{Ev. Bac}}{2-1,25 \text{ Hr.}}$ : Hr = Humidité Relative	: 100 mm	: Bonne corrélation avec la piézométrie

La meilleure correspondance entre le graphique des excédents décadaires et la piézométrie a été obtenue par la méthode n° 6 mise au point à SARIA (BURKINA) et appliquée avec une RFU de 100 mm (figure 12a). L'excédent cumulé est de l'ordre de 81 mm pour l'année 1978 dont la pluviométrie annuelle est de 789 mm. Soit une infiltration utile de 10,2 % environ.

SIMULATION DES FLUCTUATIONS DE NIVEAU DE NAPPE  
Piézomètre CIEH - Nappe des granites

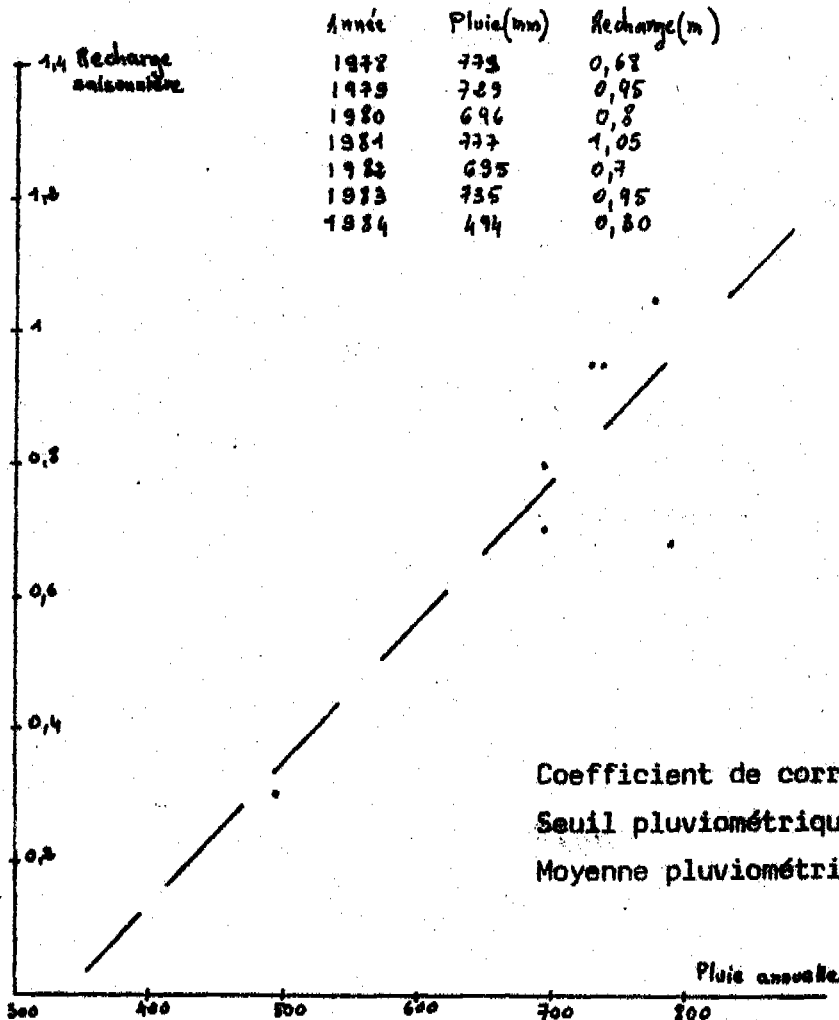
Figure 12.a



Piézomètre du CIEH - OUAGADOUGOU  
GRANITE FRACTURE

Figure 12.b

ANALYSE DE TENDANCES



La comparaison entre l'excédent annuel et la remontée de la nappe (1.055 m) conduit à un coefficient d'emmagasinement moyen du milieu fissuré de l'ordre de 7,7 %.

Une approche de l'évaluation de la recharge a été effectuée dans le cadre du projet "Bilan d'eau" mis en oeuvre au BURKINA à partir de programme de simulation de bilan hydrique (BILJAN) mis au point par le CIEH - (Le Corvec et Quideau, 1984) sur une période végétative pour une culture.

L'équation générale du bilan d'eau est la suivante :

$$\text{PREC} = \text{EVTR} + \text{RS} + \text{DRAIN} + \text{RUIS}$$

avec

PREC : Précipitation

EVTR : Evapotranspiration réelle

RS : Stock d'eau du sol

DRAIN : Drainage

RUIS : Ruissellement.

La région étudiée par ce modèle a été le bassin versant de la Volta Noire. Le détail du programme et les hypothèses adoptées dans le calcul du bilan étant précisés dans la note de présentation du programme de calcul (BASIC) nous indiquerons uniquement que l'ETP adoptée a été celle de Penmann et que les calculs ont été effectués à un pas de temps journalier. Les résultats de la simulation menée sur la période 1979-1980 montrent que, durant la période mars - avril, il n'y a presque pas d'évapotranspiration et de drainage (infiltration profonde) à cause du manque d'eau en surface. Le début du drainage a lieu en juillet avec un maximum en septembre. Le drainage moyen annuel (infiltration profonde) est de l'ordre de 5,8 % des précipitations. C'est l'ordre de grandeur des valeurs trouvées par ROOSE, 1981, sur la station de SARIA au BURKINA.

Ces différentes approches du coefficient de recharge des aquifères de socle évaluent ce paramètre du simple au triple selon les méthodes, soit de 6 % à 18 %. Dans la programmation des opérations d'hydraulique et notamment des possibilités d'exploitation, il conviendrait de retenir la valeur la plus pessimiste soit une recharge d'environ 6 % de l'apport annuel par les pluies.

#### IV.6.2 L'analyse des fluctuations des niveaux piézométriques

Les données fournies par le tableau 14 récapitulant les variations de niveaux (saisonniers et interannuelles) en aquifères d'altération ou de fractures, les figures 13 et 14 montrent une tendance générale à la baisse de niveau.

Une corrélation effectuée en zone d'aquifères de fracture (figure 12b) sur le piézomètre du CIEH à Ouagadougou met en évidence une relation satisfaisante (coefficient de corrélation : 0,82 %) entre la recharge saisonnière et la pluviométrie annuelle, et semble indiquer qu'une pluviométrie annuelle de 350 mm constitue le seuil minimum en dessous duquel il n'y aurait pas de recharge saisonnière de la nappe.

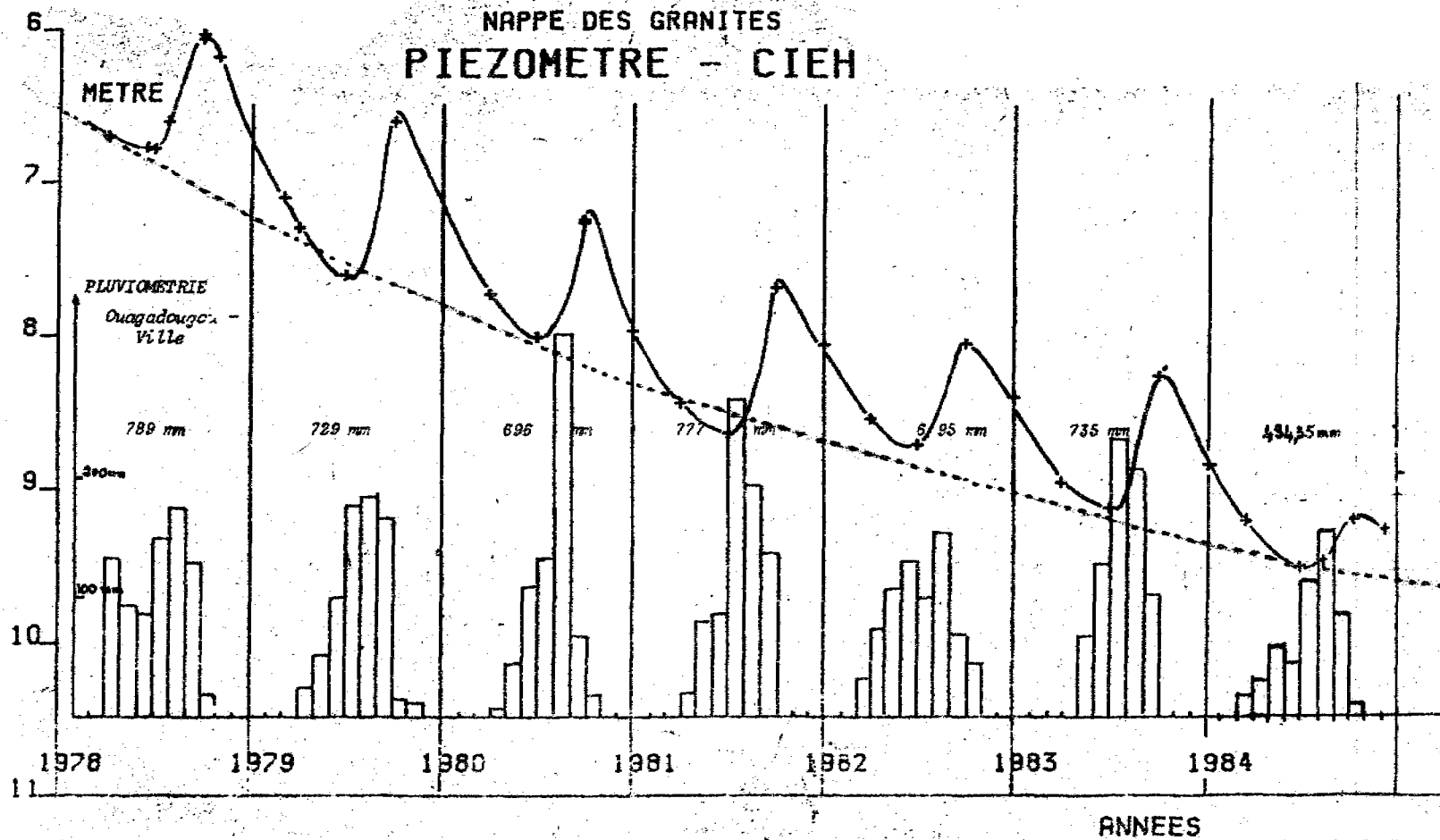
En ce qui concerne les processus de vidange et de recharge des aquifères de fracture, une étude effectuée sur quelques points d'eau au Burkina (IWACO) (figure 15) a montré que le tarissement de la nappe durant la saison sèche est d'autant plus marqué que le niveau de la nappe est profond. Ceci pourrait s'expliquer par la présence de niveaux plus argileux dans les forages disposant de niveaux statiques profonds et impliquant, par leur mauvaise perméabilité une chute rapide des niveaux.

En ce qui concerne les règles qui régissent la remontée de la nappe, une analyse effectuée sur l'historique des fluctuations du piézomètre CIEH (tableau 15) montre qu'il n'existe pas de relation simple entre la date de remontée du niveau de la nappe et la hauteur de pluie tombée avant cette date, de même qu'il n'existe pas de relation entre cette date de remontée et le nombre de jours de pluie ayant eu lieu avant cette date. Le comportement de la nappe semble lié à la résultante des apports qui ont eu lieu au cours des années précédentes. La répartition des pluies pendant la saison pluvieuse semble être un critère prépondérant dans les phénomènes de recharge des aquifères. Dans le domaine de la connaissance des mécanismes de recharge, les deux projets d'étude "Bilan d'eau" et "Milieu fissuré" mis en oeuvre au BURKINA devraient permettre d'appréhender la valeur des paramètres significatifs : Evapotranspiration, ruissellement, réserve utile du milieu non saturé.

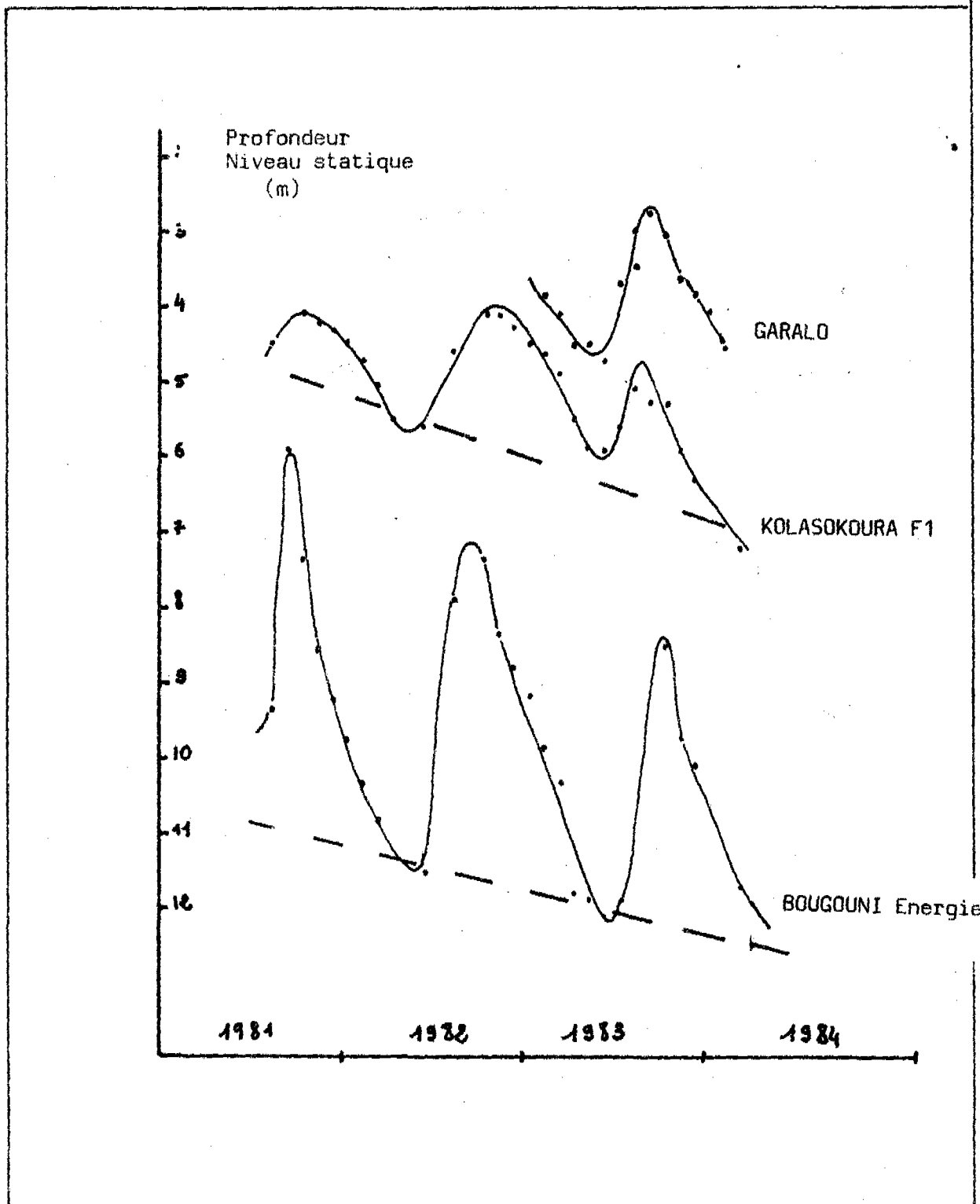
FLUCTUATION DE NIVEAUX DE NAPPES  
EN ZONE DE SOCLE CRISTALLIN  
(BOUCLIER OUEST AFRICAIN)

Pays	Point d'eau	Géologie	Pluviométrie annuelle (mm)	Remontée saisonnière (année)	Tendance moyenne annuelle (période)
A/ NAPPE D'ALTERATION					
BENIN	Parakou	GRA	1549	6 m (1963)	
COTE-D'IVOIRE	Tiébissou	SCH		1 m (1973)	
BURKINA	Manga	GRA	791	3 m (1981)	0 m (1981-82)
"	Ouagadougou	GRA	693	2 m	
"	Saria/Koudougou	GRA	700	1,5 m(1982)	-0,40 m(1972-82)
"	EIER Ouaga.	GRA	789	2,5 m(1978)	
"	Keupéla	GRA	881	9 m (1974)	
NIGER	Liptako	GRA	518	? (1983)	-0,2 m (1975-81)
B/ NAPPE DE FRACTURE					
BURKINA	CIEH / Ouaga.	GRA	735	0,95m(1983)	-0,3 m (1982-83)
"	Yako	GRA	606	3 m (1981)	-1 m (1981)
"	Manga	GRA	791	3 m (1981)	-0,15m (1960-81)
"	Gourcy	GRA	461	1,5m (1982)	-0,3 m (1975-81)
"	Toma	GRA	583	2 m (1982)	-0,3 m (1968-82)
GHANA	Bolgatanga	GRA	890	6 m (1979)	+0,2 m (1975)
BENIN	Dassa Zoume	GRA	1752	3 m (1963)	
MALI	Bougouni	GRA	944	4 m (1983)	-0,5 m (1983)

FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES



FLUCTUATION DU NIVEAU DE LA NAPPE  
Projet HELVETAS. MALI-SUD





INFLUENCE DE LA PROFONDEUR DU NIVEAU STATIQUE SUR LE TARISSEMENT DE LA NAPPE

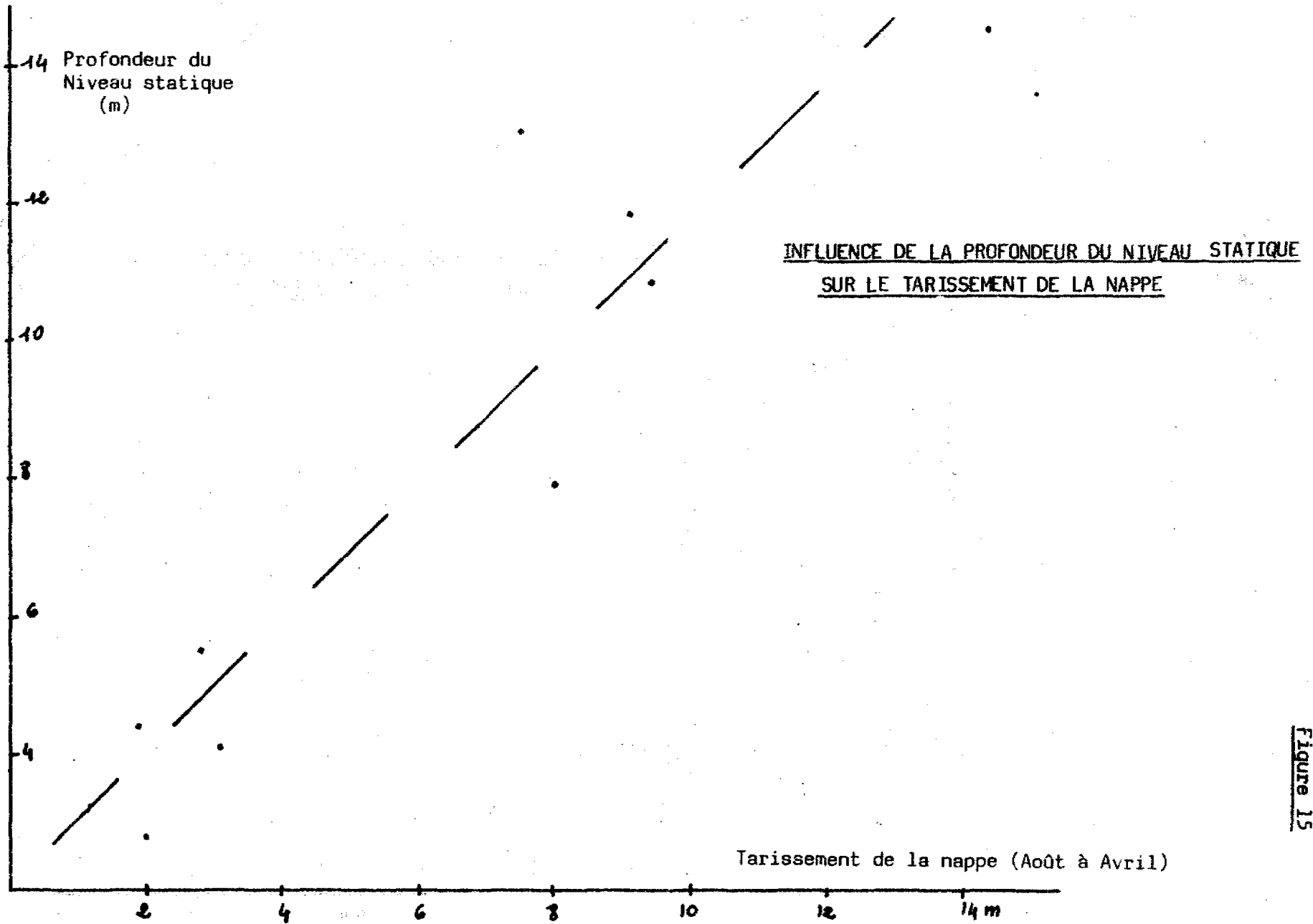


Figure 15

d'après données AVV/IWACO  
"Projet Bilan d'Eau". BURKINA

ANALYSE DES FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES  
ETUDE DU PIEZOMETRE CIEH.

1 Année	2 Pluviométrie annuelle	3 Pluviométrie moyenne glis- sante sur 3ans	4 Recharge saisonniers	5 Variation annuelle du niveau	6 Date Début Remontée	7 Pluviométrie cumulée en début de la Remontée			8 Nombre de jours de pluie avant la remontée		
						> 10mm	> 20mm		> 10mm	> 20mm	
1978	779	725	0,68	+0,8	5/06	247	225	195	8	6	4
1979	729	725	0,95	-0,45	10/07	325	157	47	14	10	5
1980	696	695	0,80	-0,6	10/07	116	120	51	14	6	1
1981	777	734	1,05	0	5/07	192	134	72	16	7	2
1982	695	722	0,70	-0,5	2/06	202	169	61	20	6	4
1983	735	735	0,95	-0,3	15/06	100	72	31	8	4	1
1984	494	641	0,30		15/06	143			11		

#### IV.6.3 L'utilisation des méthodes de datations isotopiques

L'utilisation des isotopes du milieu est devenue un outil important en hydrogéologie du socle cristallin depuis ces dernières années.

En hydrogéologie on utilise généralement deux types d'isotopes du milieu :

- isotopes stables : Oxygène 18, deutérium, Carbone 13
- isotopes radioactifs : Tritium, Carbone 14.

Les isotopes stables permettent de déterminer l'origine des eaux souterraines, et aussi l'origine des sels dissous.

Les isotopes radioactifs estiment le taux de renouvellement et les vitesses de circulation des eaux souterraines.

Les caractéristiques des principaux isotopes utilisés en hydrogéologie et les méthodes d'étude géochimiques isotopiques sont présentées au tableau 16.

Les variations des teneurs en isotopes stables sont fonction de l'évaporation, l'altitude, la latitude et l'effet de continentalité.

L'influence des effets évaporatoires est caractérisée par la corrélation entre Oxygène 18 et Deutérium (figure 16).

Parmi les isotopes radioactifs, le Tritium contribue à déterminer l'âge des eaux du fait de sa présence dans l'atmosphère depuis les explosions thermonucléaires qui ont eu lieu entre 1954 et 1962. Il est admis les critères suivants relatifs aux teneurs en Tritium :

- 0 à 1 UT : Eau ancienne antérieure à 1952
- 5 à 20 UT : Eau constituée d'un mélange entre eau ancienne et apports récents, ou apport récent dans le cas des zones côtières où les précipitations actuelles sont appauvries en Tritium.
- 20 à 30 UT : Eau infiltrée après les explosions thermonucléaires.

ISOTOPES STABLES					ISOTOPES RADIOACTIFS	
Isotope	Deutérium 2H (D)	Oxygène 18 18O	Carbone 13 13C	Soufre 34 34S	Tritium 3H (T)	Carbone 14 14C
Forme moléculaire	H <sub>2</sub> O liquide, solide vapeur	H <sub>2</sub> <sup>18</sup> O liquide, solide vapeur	<sup>13</sup> CO <sub>2</sub> H - <sup>13</sup> CO <sub>3</sub> <sup>--</sup> <sup>13</sup> CO <sub>2</sub> <sup>13</sup> CO <sub>3</sub> C <sub>a</sub>	<sup>34</sup> SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> <sup>34</sup> SH <sub>2</sub> <sup>34</sup> SO <sub>4</sub> C <sub>a</sub>	HTO liquide, solide vapeur	<sup>14</sup> CO <sub>2</sub> H- <sup>14</sup> CO <sub>3</sub> <sup>--</sup> <sup>14</sup> CO <sub>2</sub> <sup>14</sup> CO <sub>3</sub> C <sub>a</sub>
Unité de mesure	‰ R = $\frac{D}{M}$ (1)	‰ R = $\frac{18O}{16O}$	‰ R = $\frac{13C}{12C}$	‰ R = $\frac{34S}{32S}$	.U.T.	%
Période (6)					12,26 ans	5730 ans
Standard	SMOW (2)	SMOW (2)	P.D.B. (3)	C.D. (4)	1 UT = $\frac{3H}{1H} 10^{-18}$	Acide Oxalique N.B.S. (5)
Valeur du standard en 10 <sup>-6</sup>	R = 158	R = 1993,4	R = 11237,2	R = 45004,5	1UT = 7,28 10 <sup>-3</sup> dpm/ml	1,176 10 <sup>-6</sup> 13,55 dpm/g de C
Variation naturelle dans les eaux.	+ 30‰ à - 150‰	+ 5‰ à - 20‰	+ 1‰ à - 30‰	+ 30‰ à - 30‰	Naturel : 18h20UT Thermonucléaire : 20 à 1000 UT	Naturel : < 85% Thermonucléaire : > 85%

(1) ‰ =  $\left[ \frac{R_{\text{Echantillon}} - R_{\text{Standard}}}{R_{\text{Standard}}} \right] \cdot 1000$

(2) SMOW = Standard mean ocean water

(3) PDB : Belemnite du Crétacé de la Pee Dee Formation. Caroline (USA)

(4) CD : Troilite (FeS) de la météorite du Canyon Diablo (USA)

(5) MBS : National Bureau of standards (USA)

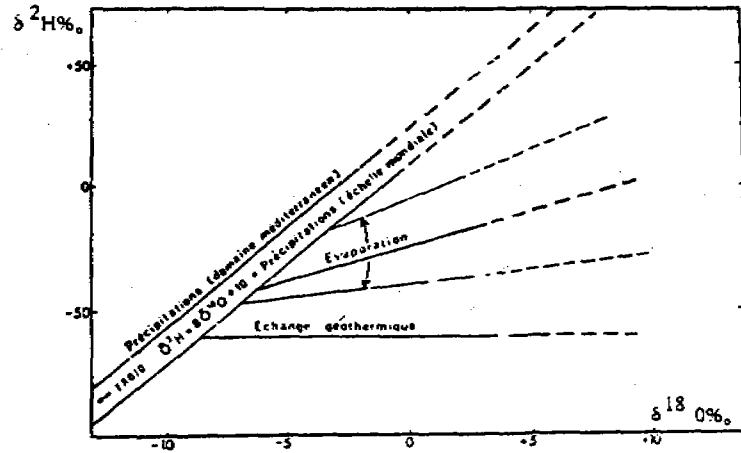
(6) Période : Temps nécessaire pour que l'activité diminue de moitié.

RESUME DES PRINCIPALES METHODES D'ETUDE GEOCHIMIQUE ISOTOPIQUE

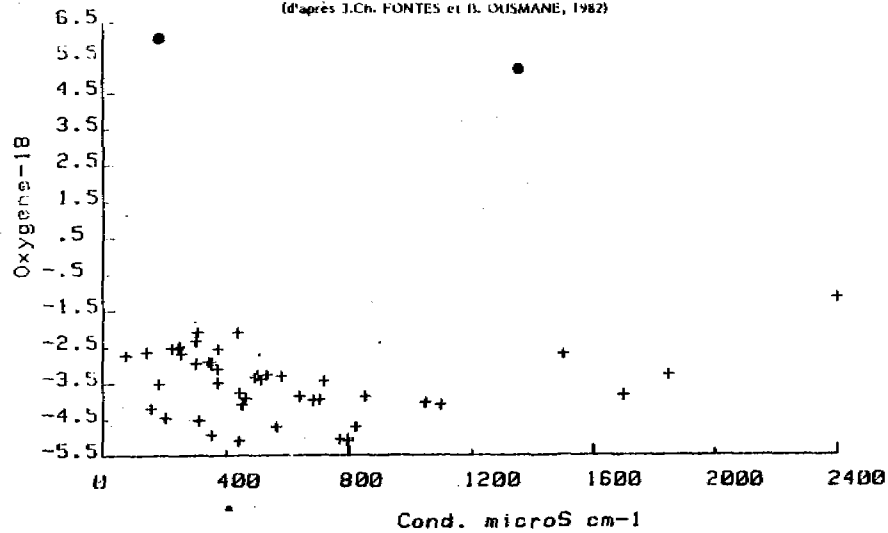
METHODES	OBJECTIFS	AVANTAGES	INCONVENIENTS
Physico-chimiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>potabilité des eaux</li> <li>pollution des eaux</li> <li>caractéristiques hydrogéologiques</li> <li>relations eaux-roches</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>méthode simple</li> <li>rapide</li> <li>détermination qui peut être exécutée sur le terrain</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>produits et réactifs délicats à conserver</li> </ul>
Isotopes stables <sup>18</sup> O, <sup>2</sup> H, <sup>13</sup> C	<ul style="list-style-type: none"> <li>origine des eaux souterraines</li> <li>localisation de zones de recharge</li> <li>relations entre eaux de surface et eaux souterraines</li> <li>drainage et mélange entre aquifères</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>risque d'évaporation des échantillons</li> </ul>
Isotopes radioactifs <sup>3</sup> H, <sup>14</sup> C	<ul style="list-style-type: none"> <li>estimation de temps de transit ("âge" des eaux)</li> <li>taux de renouvellement</li> <li>vitesse radiométriques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>détermination de la continuité des aquifères</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>difficulté d'évaluation de l'activité initiale</li> <li>il faudrait disposer d'un grand nombre de données</li> </ul>
Isotopes enrichis	<ul style="list-style-type: none"> <li>étude des directions des écoulements</li> <li>estimation de la vitesse de Darcy</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>durée de vie courte donc difficile à conserver</li> <li>contraintes inhérentes à l'importation et à la manipulation des produits</li> </ul>

: Corrélation de teneurs en deutérium et oxygène-18  
dans les précipitations et l'effet de l'évaporation

D'après FONTES, 1976

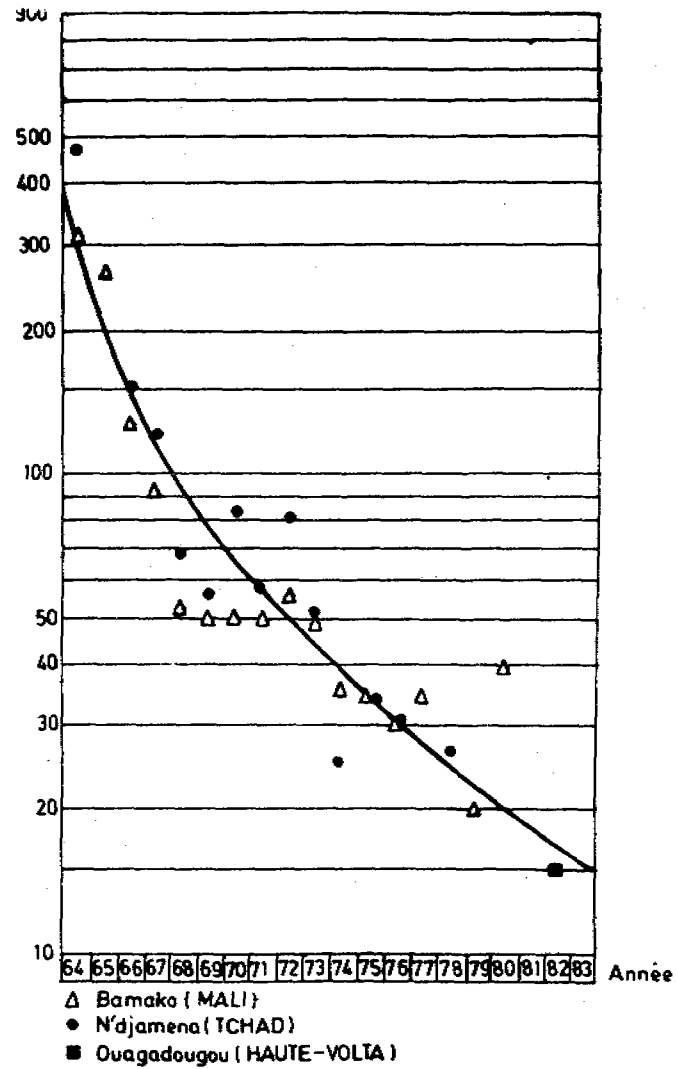


Relation conductivité-oxygène-18 dans les eaux souterraines du Liptako  
(d'après J.Ch. FONTES et B. OUSMANE, 1982)



LIPTAKO 1980 - NIGER -

U.T.



Moyenne pondérée du tritium de la précipitation;  
le facteur de pondération est la hauteur de pluie annuelle.

DONNEES ISOTOPIQUES EN ZONE DE SOCLE  
CRISTALLIN

Figure 16

Les teneurs comprises entre 1 et 5 UT sont délicates à interpréter.

Très peu de datations sont effectuées à l'aide du Carbone 14 du fait de l'âge récent des eaux infiltrées en zone de socle (inférieur à 30 ans); le Carbone 14 étant plutôt réservé à la datation d'eau d'aquifères sédimentaires captifs (Continental Intercalcaire au Niger ou Maestrichtien au Sénégal).

#### Résultats :

Nous donnons au tableau 17 le résultat des datations isotopiques effectuées à l'aide d'isotopes stables ou radioactifs (Deutérium, Oxygène 18, Tritium) dans les pays concernés par l'étude. Il apparaît que, d'une manière générale, les aquifères sont rechargés par des eaux récentes dans les zones où la pluviométrie moyenne annuelle dépasse 700 mm. Notons que dans certaines conditions hydrogéologiques particulières, les aquifères peuvent être alimentés lorsque la pluviométrie annuelle est inférieure à 700 mm (LIPTAKO).

Les études détaillées des teneurs en isotopes du milieu menées dans le cadre du projet "Bilan d'eau" au Burkina ont mis en évidence les points suivants :

+ La plupart des eaux de surface et des puits peu profonds creusés dans les altérations ont été affectées d'un effet évaporatoire variable (relation Deutérium / Oxygène 18).

+ Les échantillons de l'eau souterraine des aquifères du milieu fracturé ne manifestent pas de concentration par évaporation et se regroupent autour d'une valeur d'Oxygène 18 de 4,4 %. Par ailleurs, la teneur en isotope stable de l'eau de pluie de Bamako, échantillon de référence, montre que les précipitations de faible intensité possèdent de grandes valeurs de teneur en Oxygène 18 par suite d'évaporation. Cette constatation conduit à adopter l'hypothèse que la recharge des aquifères de fractures a lieu pendant les mois durant lesquels la précipitation est supérieure à 150 mm.

Dans le cadre du projet "Bilan d'eau" ci-dessus mentionné, on a constaté que l'activité en Tritium diminuait avec la profondeur des venues d'eau dans les ouvrages. Cela traduit une alimentation par percolation à travers les altérations. En estimant l'âge moyen des eaux à 25 ans, on en déduit des vitesses de percolation de l'ordre de 0,3 à 1,5 m par an pour

Tableau 17

RESULTATS DES MESURES DE DATATIONS ISOTOPIQUES  
SUR LES OUVRAGES EFFECTUES EN ZONE DE BOULIER  
OUEST AFRICAIN

PROGRAMME	PLUVIOMETRIE (mm)	ISOTOPE	CONCLUSION
125 forages Liptako C. Entente/Pays Bas NIGER	500	Tritium	Eau récente sauf 2 forages à faible recharge
Programme Recherche "Bilan d'eau" BURKINA	600 - 800	Tritium Deutérium	Recharge dans la partie Sud du pays
10 centres secondaires BURKINA	600 - 800	Tritium	Kongoussi : Relation nappe- barrage - eau récente. Les autres centres : Pas de réalimentation Eau ancienne (> 25 ans)
Etude ranch de Léo BURKINA	900	Tritium	Eau ancienne (> 30 ans)
Recherche Nord - Voltaïque Hydrogéologie BURKINA	500	Oxygène 18 Deuterium	Alimentation des nappes par les mares en période de crues enrichissement par évaporation
Upper Region GHANA	900	Deuterium Oxygène 18 Tritium	Alimentation par les pluies Eaux récentes
NIGERIA	900	Oxygène 18 Deuterium	Alimentation des schistes et gneiss d'Ife-Ife par les eaux superficielles enri- chies par évaporation
Etude Université Niamey Liptako - NIGER -	500	Deuterium Oxygène 18	Alimentation par les pluies Pas d'effet évaporatoire

une épaisseur d'altération variant de 6 à 30 m, soit une réalimentation de 30 à 150 mm avec une porosité de 10 %. Ces chiffres s'inscrivent dans la gamme des valeurs du taux de recharge estimé dans les paragraphes précédents. Ces constatations conduisent à penser que le temps de résidence de l'eau dans les altérations est considérable et que, compte tenu de l'âge des eaux -25 ans-, les variations piézométriques seraient plutôt dues à des effets de pression que des transferts de masse.

Les données isotopiques corroborent donc les résultats d'interprétation de fluctuations piézométriques à savoir que le comportement de la nappe est influencé par des phénomènes climatiques pluriannuels.

#### IV.7 HYDROCHIMIE DU SOCLE

##### IV.7.1 Les faciès chimiques

La plupart des eaux souterraines du socle cristallin sont en général de faciès chimique bicarbonaté calcique ou mixte.

Les faciès à tendance alcalino-terreuse caractérisent les eaux souterraines issues des terrains volcanosédimentaires.

Des faciès chlorurés sodiques existent dans les gneiss précambriens de la plaine d'Accra.

Dans l'ensemble, les eaux sont peu minéralisées -la résistivité moyenne est de l'ordre de 4200 ohm.cm -et se caractérisent par une légère acidité et agressivité. Cette agressivité pose un problème au niveau des moyens d'exhaure mis en place sur les ouvrages.

##### IV.7.2 Stratification chimique - Mécanisme d'alimentation

Un traitement statistique d'une série d'analyses chimiques au Burkina (projet "Bilan d'eau" - IWACO) a démontré que (figures 17 et 18) :

- Il existe une corrélation entre la conductivité des eaux et la teneur en ion dominant (Bicarbonate). Aucune relation n'est mise en évidence entre la minéralisation et la teneur en ion chlorure et sulfate.

- Les eaux souterraines sont affectées d'une stratification chimique : les eaux des puits modernes captent les niveaux supérieurs présentant des conductivités plus faibles que les forages. La conductivité augmente avec la profondeur des venues d'eau. Les fortes conductivités caractérisent des eaux qui ont séjourné longtemps dans l'aquifère. Cette stratification (cf. figure 17.c) est confirmée par l'indice de saturation qui



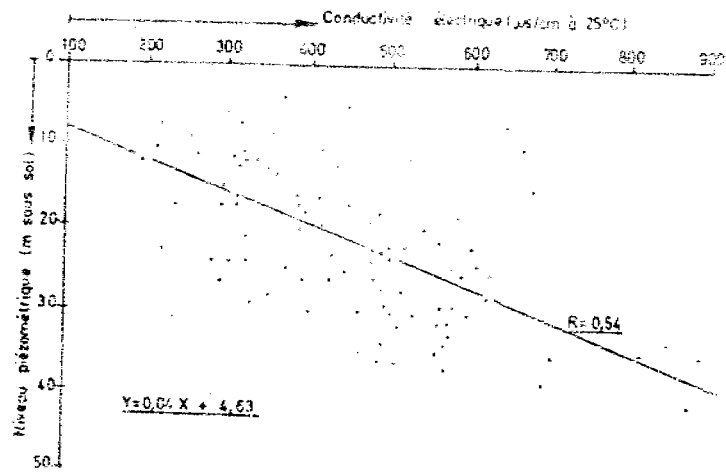


Fig 17b La corrélation entre la conductivité électrique et le niveau piézométrique (tous les forages)

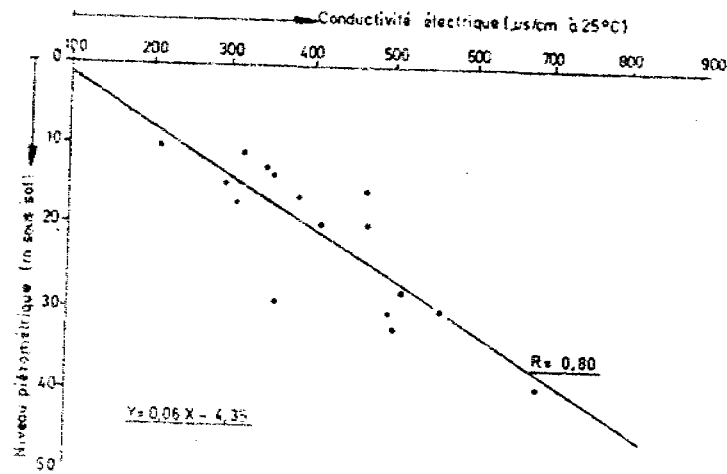


Fig 17c La corrélation entre la conductivité électrique et le niveau piézométrique (forages avec débit  $\geq 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ )

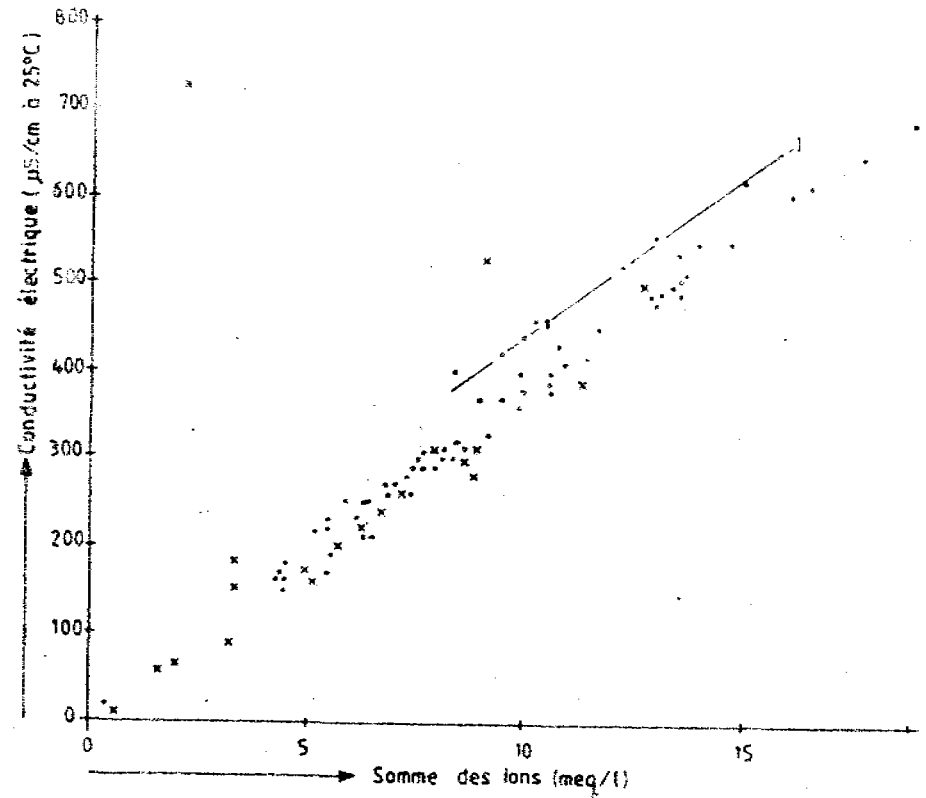


Fig 17a La corrélation entre la somme des ions en solution et la conductivité électrique.

Figure 18.b

Les variations saisonnières des paramètres physico-chimiques des eaux et des niveaux piézométriques de quelques forages à Mankarga - BURKINA FASO -

d'après IWACO - Bilan d'eau -

Figure 18.a

La corrélation entre la conductivité électrique et les teneurs en trois anions des eaux souterraines

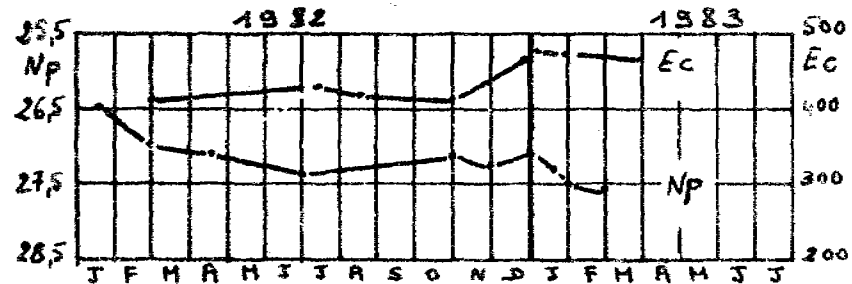
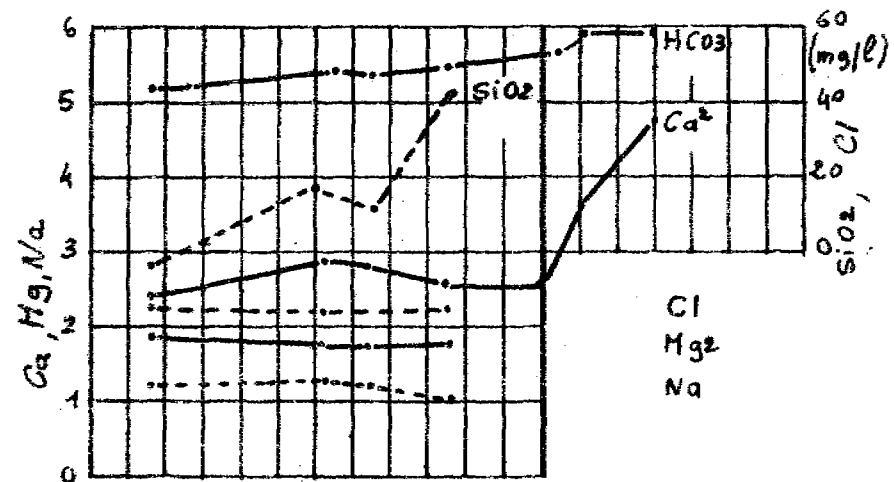
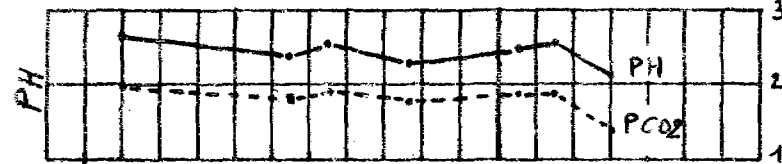
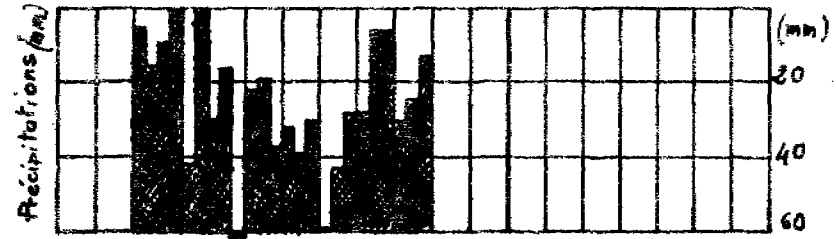
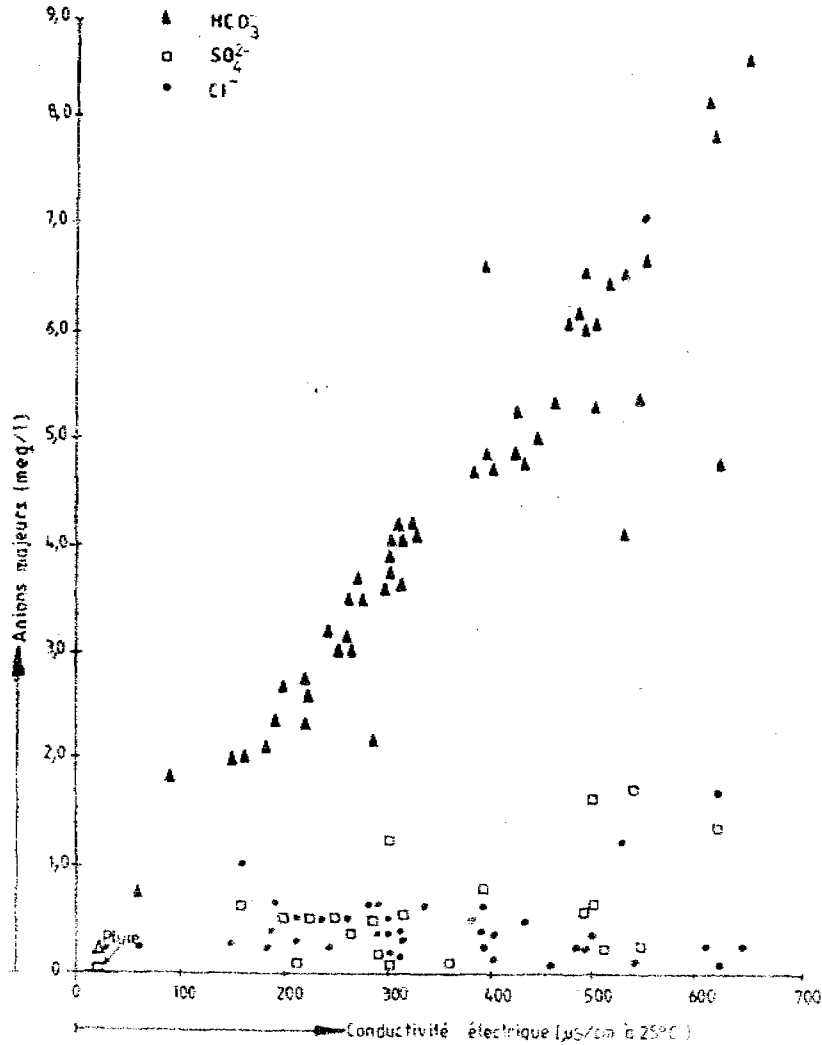


Figure 18

caractérise le degré d'agressivité des eaux. Les eaux deviennent moins agressives et sous-saturées, par rapport à la calcite et à la dolomie, au cours de leur circulation souterraine. Ainsi, la plupart des forages captant les niveaux profonds se trouvent dans le domaine sous-saturé et exploitent une eau en équilibre avec le milieu encaissant.

- La composition chimique des eaux du socle cristallin varie très peu d'une année à l'autre. On observe par contre des variations importantes au cours de l'année notamment sous l'influence de la recharge saisonnière (figure 18.b). En saison des pluies, le lessivage des terrains siliceux provoque un enrichissement des eaux souterraines en Silice ( $\text{SiO}_2$ ) et en Calcium (Ca), la teneur des autres éléments ne varie pratiquement pas dans l'année.

L'examen des résultats d'analyses chimiques effectuées dans le cadre de projets d'hydraulique villageoise montre également que :

- La conductivité ne reflète pas la nature pétrographique de la roche réservoir. Elle augmente très légèrement dans les schistes et roches vertes par rapport aux zones granitiques.

- Les fortes conductivités caractérisent les venues d'eau profondes. Les eaux nouvellement infiltrées présentent de faibles conductivités. Ces constatations confirment les observations faites dans le cadre du projet "Bilan d'eau" et confirment la notion de stratification des eaux souterraines en zone de socle cristallin. Une corrélation a été mise en évidence entre la conductivité totale de l'eau et l'activité en Tritium. Cette corrélation confirme encore une fois la relation entre la teneur en sels et la recharge des aquifères.

REPARTITION DES OUVRAGES RECENSES  
POUR L'ANALYSE STATISTIQUE

Géologie Pays	GRA	GDD	GAB	DOL	SCH	GNE	DIO	Totaux
Burkina	172	4	3		51	12	2	244
Ghana - Sud forages secs	259	38		12	274	95	39	718
Ghana - Sud	788	113		48	1644	354	123	3070
Ghana - Nord	1581	359	24	41	528	123	39	2695
Mali	214			15	112			341
Guinée	8				45			53
Niger	200	29		17	130	12		388
Côte-d'Ivoire	488	8		13	170	36	9	724
<b>T O T A L</b>								<b>8233</b>

- GRA : Granite - Migmatite - Pegmatite - Syénites.
- GDD : Grano diorite.
- GAB : Gabbros.
- DOL : Dolérites.
- SCH : Schistes et phyllites.
- GNE : Gneiss.
- DIO : Diorites.

## V/ ANALYSE STATISTIQUE

Dans le cadre de la présente étude, une étude statistique a été effectuée sur un échantillon de 8233 ouvrages recensés dans les secteurs suivants :

- |                |                  |
|----------------|------------------|
| - Burkina Faso | - Guinée Conakry |
| - Ghana Sud    | - Niger          |
| - Ghana Nord   | - Côte-d'Ivoire  |
| - Mali         |                  |

La répartition de ces ouvrages est donnée au tableau 18.

### V.1 RECUEIL DES DONNEES DE BASE

Ces données ont été issues de sources différentes :

+ Données recueillies et traitées dans le cadre d'études statistiques antérieures. C'est le cas des données de la Côte-d'Ivoire préparées et homogénéisées par Géomines dans le cadre de l'étude sur l'inventaire hydrogéologique de la Côte-d'Ivoire.

+ Tableaux récapitulatifs des travaux de forage réalisés dans le cadre de programmes d'hydraulique villageoise. Ces tableaux ont été établis soit par l'Administration responsable du suivi du projet (cf. Liptako - Niger), soit par le bureau d'étude de contrôle et surveillance (dans la majorité des cas), soit par le projet responsable de l'exécution (projet UNICEF / Burkina Faso).

Nous donnons, en annexes 1 et 2, les modèles de fiches signalétiques ainsi que les caractéristiques des projets qui ont été utilisées dans le cadre de l'analyse statistique.

### V.2 DONNEES TECHNIQUES RETENUES POUR L'ANALYSE STATISTIQUE

Nous donnons en annexe 4 un modèle de tableau récapitulatif des ouvrages pour lesquels nous avons retenu des caractéristiques qui sont exprimées dans la majorité des rapports d'exécution :

+ Colonne1: Nom du forage et numéro d'ordre spécifique à la présente étude.

+ Colonne 2 : Numéro de feuille au 200.000<sup>ème</sup>. Numéro spécifique à l'étude - Voir carte de présentation des feuilles 200.000<sup>ème</sup> par pays.

+ Colonnes 3 et 4 : Profondeur et niveau statique du forage donnés par le rapport technique de l'ouvrage à la date de sa réalisation. Le critère de profondeur de l'ouvrage est fonction des caractéristiques hydrogéologiques du milieu mais aussi des critères d'arrêt spécifiques de chacun des programmes.

+ Colonne 5 : Epaisseur d'altération - Paramètre évalué d'après la coupe géologique des ouvrages et confirmé par les valeurs de vitesse d'avancement relevées lors de l'exécution du forage.

+ Colonne 6 : Pénétration dans le socle - Différence entre la profondeur totale de l'ouvrage et l'épaisseur d'altération.

+ Colonnes 7, 8 et 9 : Débit d'essai, rabattement, débit spécifique. Nous avons pu constater dans l'étude que les procédures d'essai de débit entreprises dans le cadre des programmes de forages sont très variées de telle sorte que la détermination de la valeur de ce paramètre a été subjective. Ces paramètres ont été choisis suivant les programmes de travaux :

- Pompage Air Lift. Dans ce cas les valeurs de rabattement n'ont pas été obtenues ;
- débit moyen de l'essai de pompage de courte durée ;
- 2<sup>ème</sup> palier de pompage, dans le cas d'un pompage par palier (cf. Programme Hydrogéologie 4<sup>ème</sup> FED, Côte-d'Ivoire).

Dans le cas des débits obtenus par pompage à l'Air Lift, l'importance de ces valeurs dépend de la productivité de la formation et également des conditions de pompage (hauteur de submergence, puissance du compresseur). C'est un bon test de productivité mais qui a tendance à sous-estimer les faibles débits inférieurs à 1 m<sup>3</sup>/h.

+ Colonnes 10, 11 et 12 : Profondeur des venues d'eau. Dans la majorité des programmes qui ont contribué à l'étude, les venues d'eau sont données :

- Soit sous la forme d'une profondeur : généralement la plus importante. Peu de programmes déterminent avec précision le niveau des venues d'eau ;
- soit déduites de valeurs de débits, en cours de foration, données à intervalle régulier de profondeur.

Dans le cas d'une minorité de programmes aucune information n'est donnée sur les venues d'eau.

+ Colonne 13 : Résistivité à 18°. Elle est exprimée en ohm.cm à partir de valeurs de résidus secs ou de conductivité donnée en micro siemens suivant les relations suivantes :

$$\text{Résistivité (ohm.cm)} = 10^6 / \text{Conductivité (micro-siemens)}$$

$$\text{Résidu sec (mg/l)} = \frac{0,72 \cdot 10^6}{\text{Résistivité (ohm.cm)}}$$

+ Colonne 14 : Géologie - Un découpage par formation géologique a été effectué sur la base des faciès suivants :

- . GRA : Granite - Migmatite - Pegmatite - Syénites
- . GDD : Grano diorite
- . GAB : Gabbros
- . SCH : Schistes et phyllites
- . DOL : Dolérites
- . GNE : Gneiss
- . DID : Diorites
- . A : Altération
- . AMP : Amphibolites et Roches Vertes

### V.3 LES PRINCIPES DE L'ANALYSE STATISTIQUE

L'analyse statistique a porté sur l'examen des paramètres cités précédemment (colonne 1 à 14 du tableau récapitulatif). Cette analyse a été effectuée suivant deux domaines.

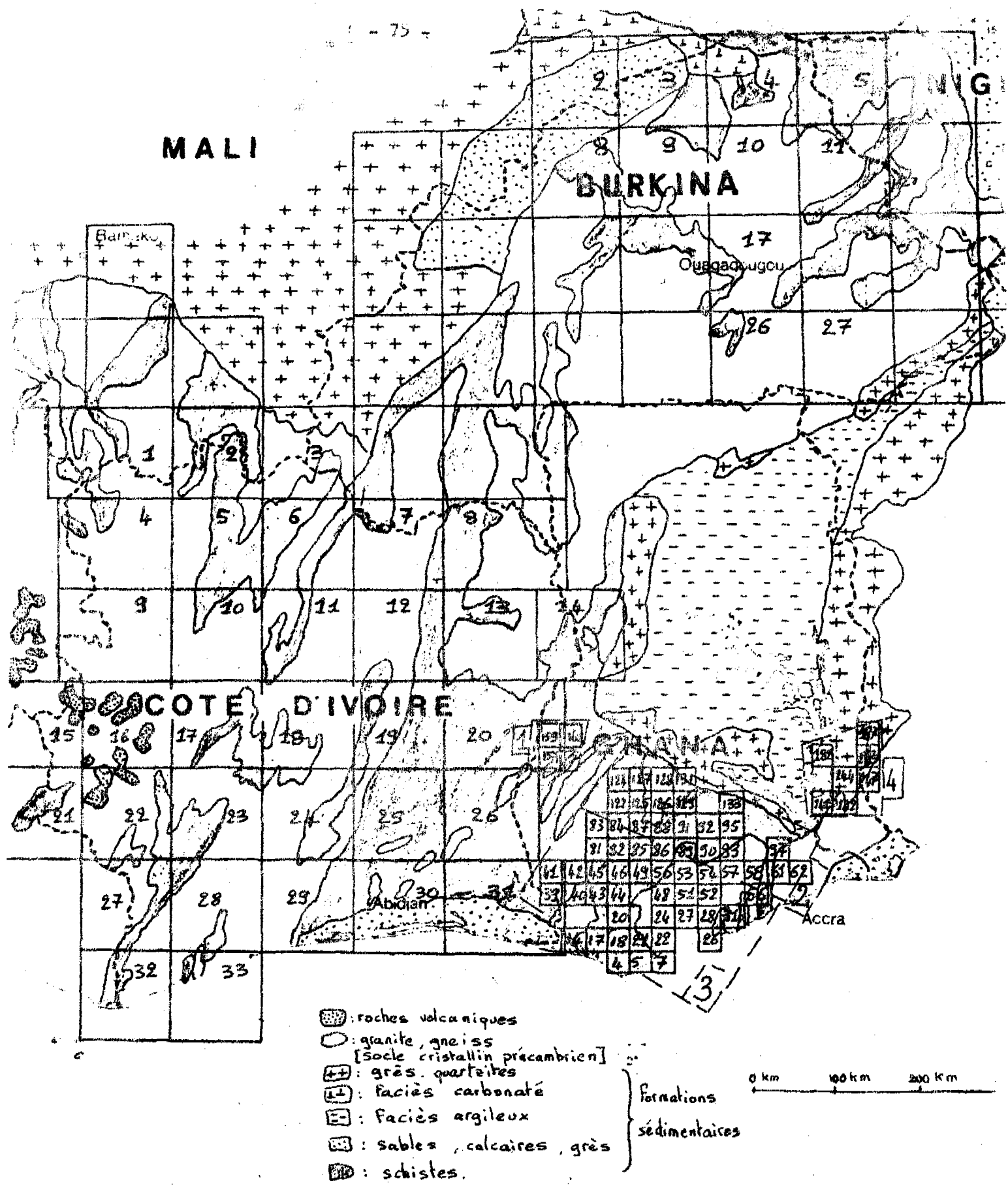
#### V.3.1 Les fréquences des valeurs moyennes

. fréquences des valeurs moyennes pour chaque formation géologique dont le nombre a été défini préalablement. Dans ce domaine, l'étude a été effectuée à deux niveaux :

- au niveau de chaque pays (cf. tableau 19 à 27).

- au niveau des feuilles au 1/200.000<sup>e</sup> de chaque pays. La répartition de ces feuilles et leur numérotation sont présentées à la figure 19.

Le tableau 26 récapitule le résultat de l'analyse de ces paramètres pour l'ensemble des pays concernés, toutes formations géologiques confondues.



20 : Numéro des cartes dans le pays.

1 : Numéro de région (Ghana Sud).

REPARTITION ET NUMEROTATION DES FEUILLES AU 1/200.000<sup>e</sup>  
 ET DES REGIONS CONCERNÉES PAR L'ETUDE STATISTIQUE

Figure 19



L'ensemble du traitement statistique par coupure au 1/200.000 a permis de cartographier les paramètres suivants :

- Profondeur moyenne de forages (figure 20)
- Profondeur des niveaux statiques (figure 21)
- Répartition des débits spécifiques (figure 22)
- Epaisseur d'altération (figure 23)
- Epaisseur d'altération mouillée (figure 24)

Ces cartes ont été établies en effectuant une moyenne des valeurs de paramètres en fonction des différentes formations géologiques. On n'a pas tenu compte des formations géologiques faiblement représentées (nombre d'échantillons inférieur à 5).

#### V.3.2 Corrélations entre paramètres

L'analyse des corrélations a été effectuée pour chaque pays en fonction des différentes formations géologiques entre le critère "débit spécifique" et les critères "épaisseur d'altération", "pénétration dans le socle", "hauteur d'eau dans les altérations".

### V.4 RESULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE (tableaux 19 à 27)

#### V.4.1 Les profondeurs moyennes d'ouvrages (figure 20)

La répartition des profondeurs d'ouvrages est uniforme et ne semble pas être corrélée avec la latitude de la région concernée. Les valeurs moyennes sont voisines de 50 m.

L'interprétation des variations de valeurs de ce paramètre est délicate car, mises à part les conditions naturelles (hydrogéologiques) la profondeur de l'ouvrage est fortement influencée par les limites contractuelles d'exécution. C'est ainsi que les ouvrages situés au Ghana Sud, zone climatique et hydrogéologique analogue au Sud de la Côte-d'Ivoire présente des profondeurs d'ouvrages nettement inférieures à la moyenne de l'ensemble des pays concernés.

La répartition des profondeurs d'ouvrages par pays et par formation géologique montre que l'on peut regrouper les formations sous les groupes suivants :

Valeurs moyennes

Géologie	GRA	GDD	GAB	SCH	GNE	DIG
Profondeur du forage	53 (171)	52 (4)	43 (3)	63 (57)	52 (12)	46 (2)
Profondeur du niveau statique	14 (120)	23 (4)	15 (3)	19 (44)	19 (10)	15 (2)
Épaisseur d'altération	26 (165)	17 (4)	12 (3)	29 (51)	23 (12)	13 (2)
Pénétration dans le socle	29 (161)	35 (4)	29 (3)	35 (51)	29 (12)	33 (2)
Débit (m <sup>3</sup> /h)	3,0 (127)	3,0 (4)	2,7 (3)	2,5 (44)	2,4 (10)	1,8 (2)
Débit spécifique (m <sup>3</sup> /h/m)	0,46 (59)	0,52 (4)	0,6 (3)	0,41 (20)	0,53 (5)	0,17 (2)
Profondeur des venues d'eau 1	20 (146)	15 (4)	3,2 (3)	34 (41)	26 (11)	4 (2)
P. V. E. 2	33 (59)	58 (1)				
P. V. E. 3	44 (28)					
Résistivité (ohm.cm)	2300 (28)	2700 (3)	2400 (1)	2000 (8)	2300 (4)	
Hauteur d'eau dans les altérations	15 (95)	9 (1)	6 (2)	16 (31)	7 (6)	13 (1)

(171) nombre de forages de chaque échantillon.

Tableau : 20

Valeurs moyennes

Géologie	GRA	GDD	SCH	DOL	GNE	DIG
Profondeur du forage	61 (488)	63 (8)	64 (170)	79 (13)	59 (36)	56 (9)
Profondeur du niveau statique	10 (379)	6 (7)	15 (140)	12 (6)	7 (34)	8 (5)
Épaisseur d'altération	18 (480)	17 (8)	30 (168)	15 (13)	16 (36)	13 (9)
Pénétration dans le socle	43 (478)	46 (8)	34 (168)	65 (13)	42 (36)	42 (9)
Débit (m <sup>3</sup> /h)	4,1 (364)	7,0 (5)	4,0 (137)	4,3 (6)	3,4 (33)	6,3 (8)
Débit spécifique (m <sup>3</sup> /h/m)	0,39 (343)	0,33 (5)	0,41 (131)	0,32 (6)	0,52 (32)	0,44 (8)
Profondeur des venues d'eau 1	13 (360)	15 (6)	15 (118)	17 (8)	14 (31)	6 (9)
P. V. E. 2	48 (118)	47 (3)	46 (35)	67 (2)	46 (12)	37 (2)
P. V. E. 3						
Résistivité (ohm.cm)	5063 (87)	6434 (4)		5408 (4)	4645 (28)	3239 (6)
Hauteur d'eau dans les altérations	12 (300)	10 (7)	18 (113)	7 (5)	10 (32)	9 (6)

(488) nombre de forages de chaque échantillon.

Tableau : 19

## GHANA NORD

Valeurs moyennes

Géologie	GRA	GDD	GAB	SCH	DOL	GNE	DIO
Profondeur du forage	26 (1581)	25 (359)	21 (24)	29 (528)	21 (41)	25 (123)	21 (39)
Profondeur du niveau statique	6 (1531)	7 (347)	6 (21)	8 (502)	6 (41)	7 (120)	6 (38)
Épaisseur d'altération	26 (1581)	23 (359)	21 (24)	29 (528)	21 (41)	25 (123)	21 (39)
Pénétration dans le socle							
Débit (m <sup>3</sup> /h)	2,0 (1557)	1,6 (356)	1,8 (23)	1,7 (522)	1,4 (40)	1,7 (120)	1,5 (39)
Débit spécifique (m <sup>3</sup> /h/m)	0,47 (1493)	0,53 (339)	0,39 (20)	0,46 (478)	0,88 (40)	0,41 (118)	0,44 (38)
Profondeur des venues d'eau 1							
P. V. E. 2							
P. V. E. 3							
Résistivité (ohm.cm)							
Hauteur d'eau dans les altérations	18 (1530)	17 (347)	14 (21)	20 (500)	15 (41)	18 (120)	14 (38)

(1581) nombre de forages de chaque échantillon.

Tableau : 22

## GHANA SUD

Valeurs moyennes

Géologie	GRA	GDD	SCH	DOL	GNE	DIO
Profondeur du forage	35 (788)	36 (113)	46 (1644)	39 (48)	35 (354)	31 (123)
Profondeur du niveau statique	6 (516)	6 (74)	8 (1365)	9 (36)	5 (254)	5 (83)
Épaisseur d'altération	17 (788)	19 (113)	30 (1643)	24 (48)	37 (354)	18 (123)
Pénétration dans le socle	18 (755)	17 (112)	19 (1398)	16 (44)	18 (354)	16 (118)
Débit (m <sup>3</sup> /h)	2,1 (529)	1,9 (75)	2,6 (1370)	2 (36)	1,9 (259)	1,6 (84)
Débit spécifique (m <sup>3</sup> /h/m)	0,5 (529)	0,4 (74)	0,6 (1370)	0,3 (36)	0,4 (259)	0,3 (84)
Profondeur des venues d'eau 1						
P. V. E. 2						
P. V. E. 3						
Résistivité (ohm.cm)	5802 (437)	5629 (59)	6968 (1039)	10413 (31)	4987 (221)	4611,2 (75)
Hauteur d'eau dans les altérations	14 (446)	14 (71)	22 (1336)	18 (33)	13 (250)	16 (82)

(788) nombre de forages de chaque échantillon.

Tableau : 23

Valeurs moyennes

Géologie	GRA	GDD	GAB	SCH	DOL	DIO
Profondeur du forage	53 (171)	52 (4)	41 (3)	63 (57)	52 (12)	46 (2)
Profondeur du niveau statique	14 (120)	23 (4)	15 (3)	19 (44)	19 (10)	15 (2)
Epaisseur d'altération	26 (165)	17 (4)	12 (3)	29 (51)	23 (12)	13 (2)
Pénétration dans le socle	29 (161)	35 (4)	29 (3)	35 (51)	29 (12)	33 (2)
Débit (m <sup>3</sup> /h)	3,0 (127)	3,0 (4)	2,7 (3)	2,5 (44)	2,4 (10)	1,8 (2)
Débit spécifique (m <sup>3</sup> /h/m)	0,46 (59)	0,52 (4)	0,6 (3)	0,41 (20)	0,53 (5)	0,17 (2)
Profondeur des venues d'eau 1	20 (146)	15 (4)	3,2 (3)	34 (41)	26 (11)	4 (2)
P. V. E. 2	33 (59)	58 (1)				
P. V. E. 3	44 (28)					
Résistivité (ohm. cm)	2300 (28)	2700 (3)	2400 (1)	2000 (8)	2300 (4)	
Hauteur d'eau dans les altérations	15 (95)	9 (1)	6 (2)	16 (31)	7 (6)	13 (1)

(171) nombre de forages de chaque échantillon.

Tableau : 20

Valeurs moyennes

Géologie	GRA	GDD	SCH	DOL	DNE	DIO
Profondeur du forage	61 (488)	63 (8)	64 (170)	79 (13)	59 (36)	56 (9)
Profondeur du niveau statique	10 (379)	6 (7)	15 (140)	12 (6)	7 (34)	8 (9)
Epaisseur d'altération	18 (480)	17 (8)	30 (168)	15 (13)	16 (36)	13 (9)
Pénétration dans le socle	43 (478)	46 (8)	34 (168)	65 (13)	42 (36)	42 (9)
Débit (m <sup>3</sup> /h)	4,1 (364)	7,0 (5)	4,0 (137)	4,3 (6)	3,4 (33)	6,3 (6)
Débit spécifique (m <sup>3</sup> /h/m)	0,39 (343)	0,33 (5)	0,41 (131)	0,32 (6)	0,52 (32)	0,44 (8)
Profondeur des venues d'eau 1	13 (360)	15 (6)	15 (118)	17 (8)	14 (31)	8 (9)
P. V. E. 2	48 (118)	47 (3)	46 (35)	67 (2)	46 (12)	37 (2)
P. V. E. 3						
Résistivité (ohm. cm)	5063 (87)	6434 (4)		5408 (4)	4645 (28)	3239 (6)
Hauteur d'eau dans les altérations	12 (300)	10 (7)	18 (113)	7 (5)	10 (32)	9 (6)

(488) nombre de forages de chaque échantillon.

Tableau : 19

## GHANA NORD

Valeurs moyennes

Géologie	GRA	GDD	GAB	SCH	DOL	GNE	DIO
Profondeur du forage	26 (1581)	23 (359)	21 (24)	29 (528)	21 (41)	25 (123)	21 (39)
Profondeur du niveau statique	6 (1531)	7 (347)	6 (21)	8 (502)	6 (41)	7 (120)	6 (38)
Épaisseur d'altération	26 (1581)	23 (359)	21 (24)	29 (528)	21 (41)	25 (123)	21 (39)
Pénétration dans le socle							
Débit (m <sup>3</sup> /h)	2,8 (1557)	1,6 (356)	1,8 (22)	1,7 (522)	1,4 (40)	1,7 (120)	1,5 (39)
Débit spécifique (m <sup>3</sup> /h/m)	0,47 (1493)	0,53 (359)	0,39 (20)	0,46 (478)	0,86 (40)	0,41 (114)	0,44 (38)
Profondeur des venues d'eau 1							
P. V. E. 2							
P. V. E. 3							
Résistivité (ohm.cm)							
Hauteur d'eau dans les altérations	18 (1530)	17 (347)	14 (21)	20 (502)	15 (41)	18 (120)	14 (38)

(1581) nombre de forages de chaque échantillon.

Tableau : 22

## GHANA SUD

Valeurs moyennes

Géologie	GRA	GDD	SCH	DOL	GNE	DIO
Profondeur du forage	35 (788)	36 (113)	46 (1644)	39 (48)	35 (354)	31 (123)
Profondeur du niveau statique	6 (516)	6 (74)	8 (1345)	9 (36)	5 (254)	5 (83)
Épaisseur d'altération	17 (788)	19 (113)	30 (1643)	24 (48)	17 (354)	18 (123)
Pénétration dans le socle	18 (755)	17 (112)	19 (1398)	16 (44)	18 (354)	16 (116)
Débit (m <sup>3</sup> /h)	2,1 (529)	1,9 (75)	2,6 (1370)	2 (36)	1,9 (259)	1,6 (84)
Débit spécifique (m <sup>3</sup> /h/m)	0,5 (529)	0,4 (74)	0,6 (1370)	0,3 (36)	0,4 (259)	0,3 (84)
Profondeur des venues d'eau 1						
P. V. E. 2						
P. V. E. 3						
Résistivité (ohm.cm)	5802 (437)	5629 (59)	6968 (1039)	10413 (31)	4987 (221)	4611,2 (79)
Hauteur d'eau dans les altérations	14 (446)	14 (71)	22 (1336)	18 (33)	13 (250)	16 (82)

(788) nombre de forages de chaque échantillon.

Tableau :

GHANA Sud - Forages tests

Valeurs moyennes

Géologie	GPA	GDU	SCH	GOL	GNE	DTD
Profondeur totale du forage	35 (259)	36 (38)	52 (274)	38 (12)	37 (95)	31 (39)
Profondeur du niveau statique						
Épaisseur d'altération	13 (259)	18 (38)	27 (274)	22 (12)	13 (95)	12 (39)
Pénétration dans le socle	29 (252)	19 (38)	29 (278)		23 (95)	18 (39)

(259) nombre de forages de chaque échantillon.

## MALI

Valeurs moyennes

Géologie	GRA	SCH	DOL
Profondeur du forage	60 (214)	58 (112)	53 (15)
Profondeur du niveau statique	6 (93)	7 (59)	7 (6)
Épaisseur d'altération	28 (213)	30 (110)	21 (15)
Pénétration dans le socle	32 (213)	26 (109)	31 (15)
Débit (m <sup>3</sup> /h)	3,0 (164)	4,3 (27)	3,6 (13)
Débit spécifique (m <sup>3</sup> /h/m)		0,61 (23)	0,33 (2)
Profondeur des venues d'eau 1	21 (33)	19 (15)	4,5 (2)
P. V. E. 2			
P. V. E. 3			
Réactivité (ohm.cm)			
Hauteur d'eau dans les altérations	23 (93)	23 (58)	17 (5)

(214) nombre de forages de chaque échantillon.

## GUINÉE (conakry)

Valeurs moyennes

GRA	SCH
59 (8)	64 (45)
28 (8)	16 (41)
31 (8)	47 (41)
6,4 (7)	13 (41)
41 (7)	45 (38)
56 (4)	54 (33)
59 (2)	59 (23)

## NIGER

Valeurs moyennes

Géologie	GRA	GDD	SCH	DOL	GNF
Profondeur du forage	58 (200)	53 (29)	48 (130)	45 (17)	49 (12)
Profondeur du niveau statique	17 (152)	11 (20)	12 (119)	13 (13)	14 (12)
Épaisseur d'altération	36 (29)		23 (14)		
Pénétration dans le socle	25 (29)		26 (14)		
Débit (m <sup>3</sup> /h)	2,5 (146)	2,4 (19)	5,3 (118)	1,8 (10)	1,8 (10)
Débit spécifique (m <sup>3</sup> /h/m)	0,76 (143)	0,86 (19)	1,87 (313)	0,64 (10)	0,51 (10)
Profondeur des venues d'eau 1	10 (158)	6 (21)	6 (117)	22 (13)	20 (12)
P. V. E. 2	36 (37)	35 (3)	38 (15)	30 (12)	36 (9)
P. V. E. 3		50 (3)			35 (2)
Réactivité (ohm.cm)	5928 (129)	2075 (12)	3645 (64)	3639 (13)	2231 (9)
Hauteur d'eau dans les altérations	20 (23)				

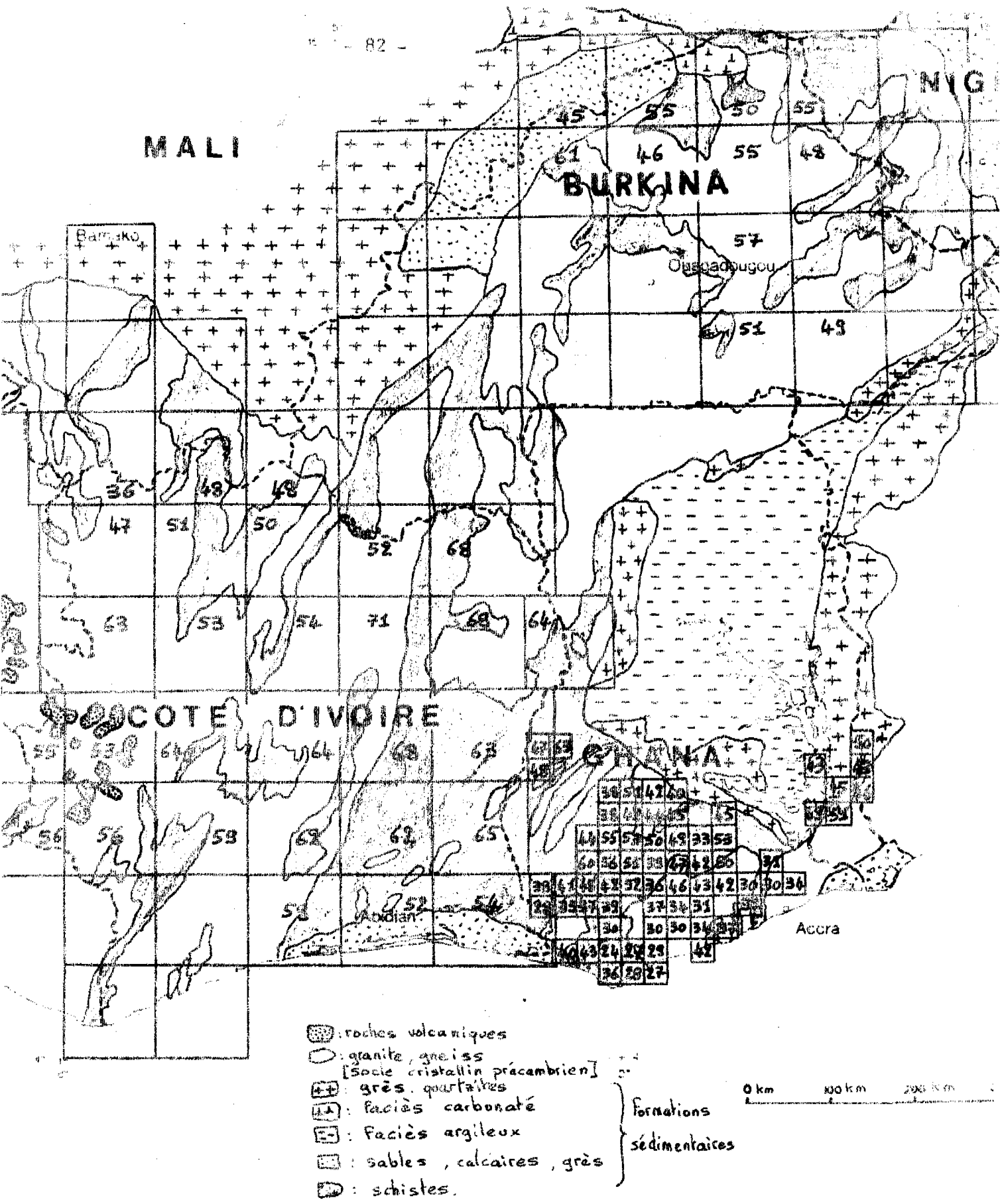
(200) nombre de forages de chaque échantillon.

RESULTATS GENERAUX DE L'ANALYSE STATISTIQUE

Toutes formations géologiques confondues

Paramètre \ Pays	BURKINA FASO	COTE D'IVOIRE	GHANA Sud	MALI	GUINEE	NIGER	Moyenne
Profondeur du forage	51	56	37	56	61	50	52
Profondeur du niveau statique	17,5	11,5	6,5	7	-	13,5	11
Epaisseur d'altération	20	18	20	26	22	29,5	22,5
Pénétration dans le socle	31,5	45	17	29,5	39	25	31
Débit (m <sup>3</sup> /h)	2,5	4,8	2	3,7	10	2,7	4,2
Débit spécifique (m <sup>3</sup> /h/m)	0,45	0,4	-	0,4	-	0,9	0,53
Profondeur des venues d'eau 1	17	16,8	-	20	43	13	25
P. V. E. 2	40	48,5	-	-	55	35	44
P. V. E. 3	44	-	-	-	59	45	49
Résistivité (ohm.cm)	2340	4957	6400	-	-	3100	4200
Hauteur d'eau dans les altérations	11	11	16	20	-	20	15,6





CARTE DE PROFONDEUR MOYENNE DES FORAGES

Figure : 20

- Granite - Granito-gneiss et roches acides (Granodiorite)
- Schistes - Phyllites.

#### V.4.2 Répartition des niveaux statiques

Le niveau statique observé dans un ouvrage représente l'état de pression du milieu fracturé qui est capté par l'ouvrage.

La répartition des niveaux statiques montre pour l'ensemble des formations géologiques un approfondissement de niveaux à mesure que l'on s'approche de la zone sahélienne : Ghana Sud : 6 m ; Côte-d'Ivoire : 11 m ; Niger : 13,5 m ; Nord Burkina : 15 m.

L'approfondissement des niveaux piézométriques vers les zones septentrionales constitue une tendance générale qui doit néanmoins être modulée par quelques cas particuliers :

- La zone de bordure de la plaine du Gondo, au N-E du BURKINA présente des niveaux statiques profonds qui témoignent d'un drainage des eaux du socle par les sables et formations carbonatées sédimentaires de la plaine du Gondo.

- La zone schisteuse de la boucle du Cacao, en Côte-d'Ivoire présente un approfondissement des niveaux statiques contrastant avec les faibles profondeurs, observées dans les mêmes formations au Ghana.

#### V.4.3 Répartition des débits spécifiques

Les débits spécifiques sont voisins de 0,5 m<sup>3</sup>/h/m. On a vu que le paramètre est fortement influencé par la méthode et la procédure d'essai de débit de sorte qu'il ne reflète que partiellement les caractéristiques hydrauliques du milieu fissuré.

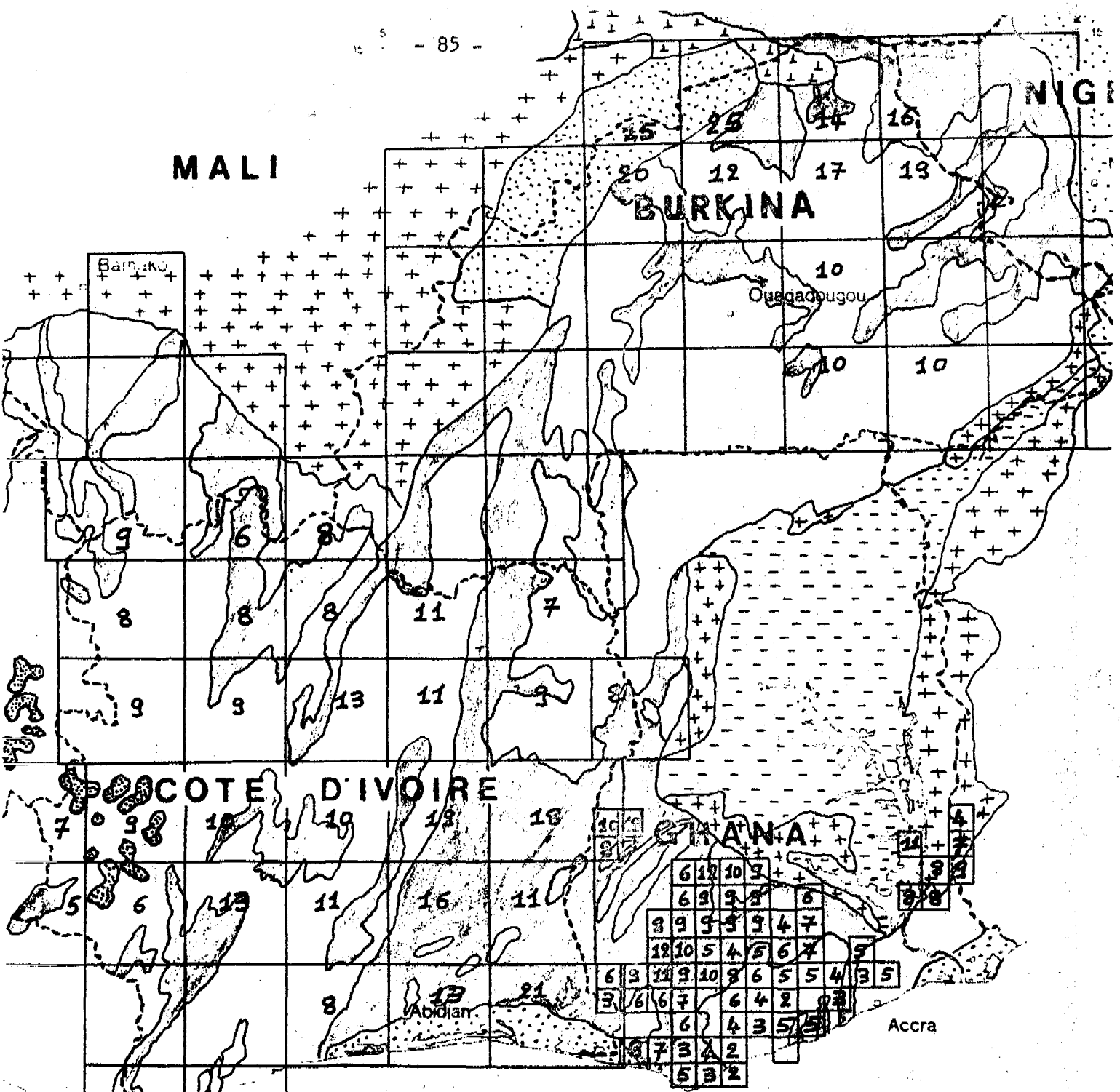
Néanmoins, il apparaît une tendance aux fortes valeurs de débit spécifique dans les formations granitiques à granito-gneissiques.

Il faut remarquer certaines valeurs particulières (0,9 m<sup>3</sup>/h/m sur la feuille n° 9 au BURKINA et 0,1 m<sup>3</sup>/h/m sur la feuille n° 7 en COTE-D'IVOIRE) dues à un échantillon constitué par un nombre de forages insuffisant.

#### V.4.4 Les épaisseurs d'altération et épaisseurs mouillées des altérations

La carte de valeurs moyennes d'épaisseurs d'altération, toutes géologies confondues, par feuille au 1/200.000ème (figure 23) montre qu'il n'existe pas de relation significative entre la latitude de la zone concernée et l'épaisseur d'altération.

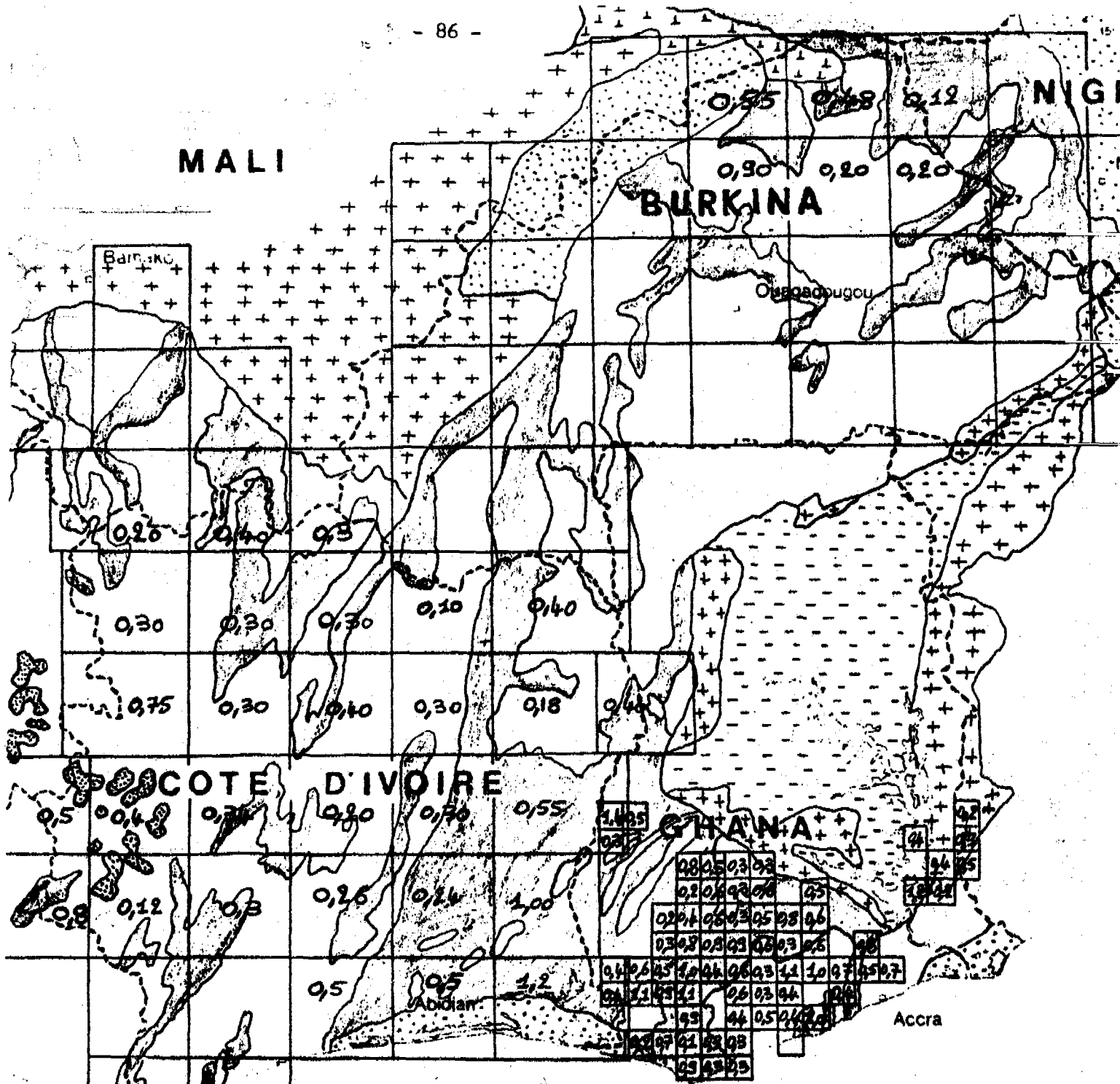
En ce qui concerne le paramètre de hauteur mouillée dans les altérations, la répartition de ce paramètre (figure 24) montre que la majorité des cas, la hauteur d'eau est suffisante pour envisager la réalisation d'ouvrages captant les altérations. Il apparaît néanmoins des secteurs où la réalisation de puits dans les altérations ne s'avère pas possible et notamment dans la partie centrale de la Côte-d'Ivoire (feuille au 1/200.000ème n° 12 et 19).



- : roches volcaniques
  - : granite, gneiss  
[Socle cristallin précambrien]
  - : grès, quartzites
  - : faciès carbonaté
  - : faciès argileux
  - : sables, calcaires, grès
  - : schistes.
- } Formations  
sédimentaires

0 km      100 km      200 km

CARTE DE PROFONDEUR DU NIVEAU STATIQUE : VALEURS MOYENNES



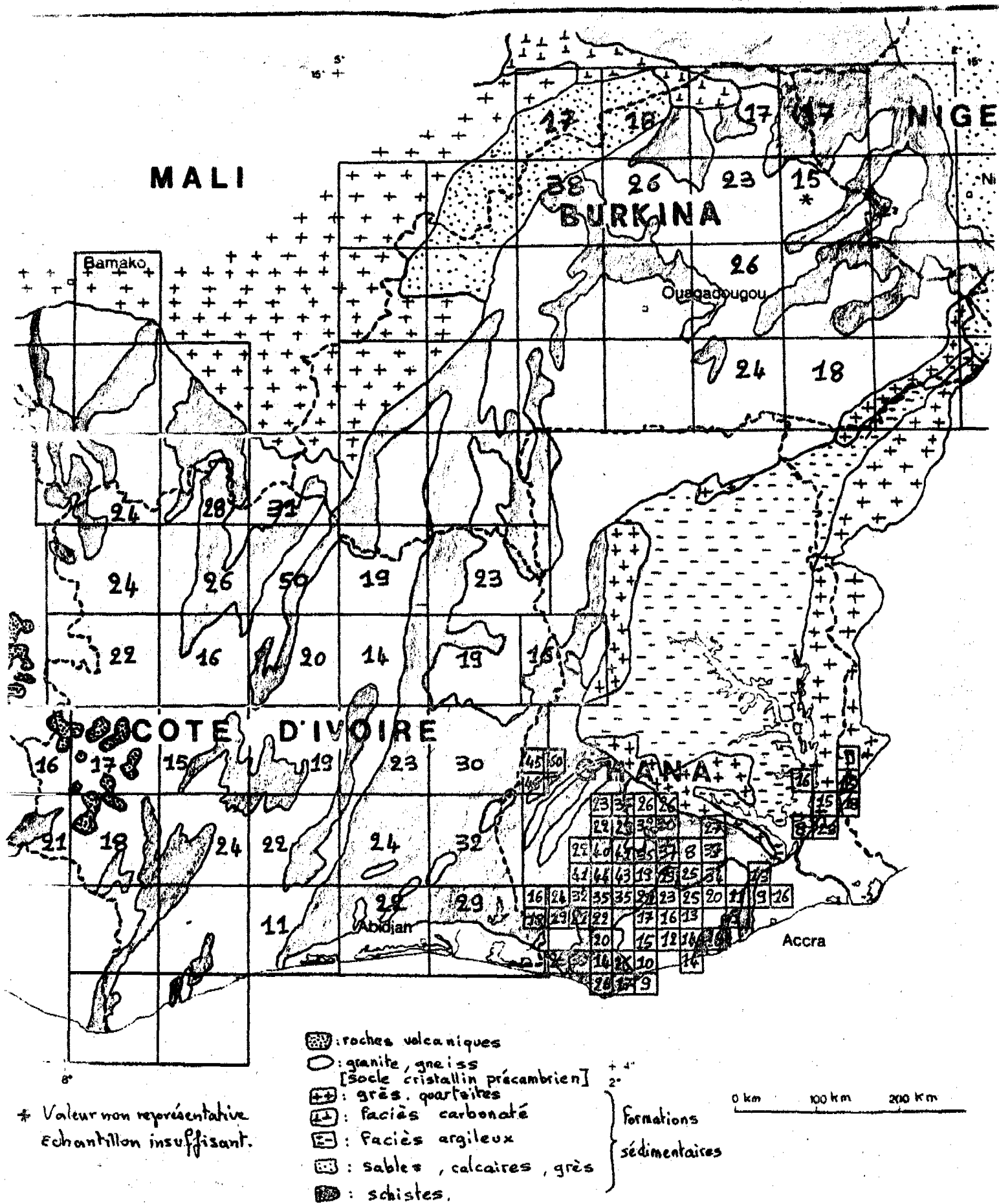
- ⊞ : roches volcaniques
- ⊞ : granite, gneiss  
[socle cristallin précambrien]
- ⊞ : grès, quartzites
- ⊞ : faciès carbonaté
- ⊞ : faciès argileux
- ⊞ : sables, calcaires, grès
- ⊞ : schistes.

Formations  
sédimentaires

0 km 100 km 200 km

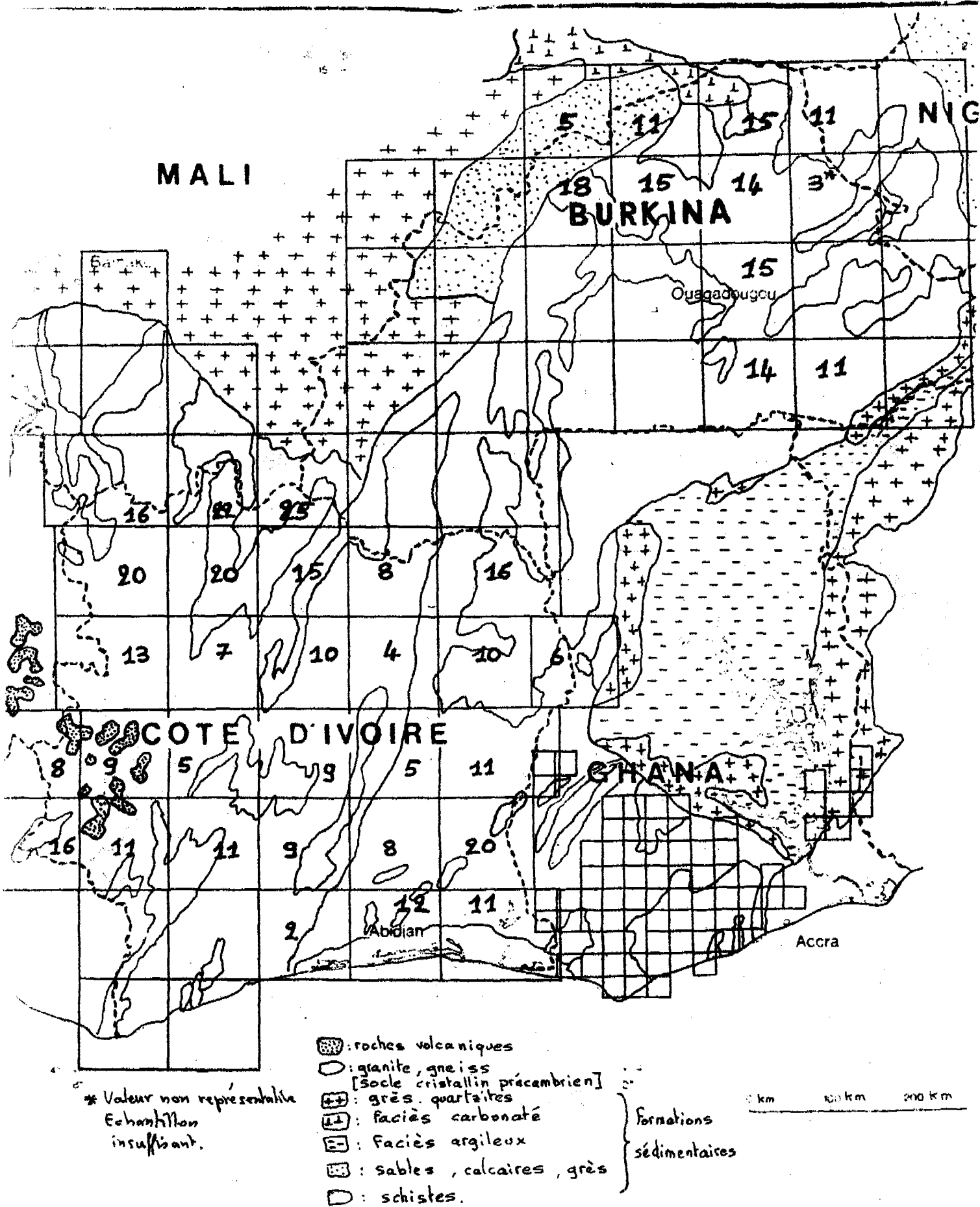
CARTE DES DEBITS SPECIFIQUES MOYENS

Figure : 22



EPAISSEUR D'ALTERATION

Figure : 23



EPAISSEUR D'ALTERATION MOUILLEE

Figure : 24

#### V.4.5 Corrélation entre paramètres de forages (tableau 28)

Une étude des corrélations entre le débit spécifique de l'ouvrage et l'un des trois paramètres suivants :

- Epaisseur d'altération
- Pénétration dans le socle
- Hauteur d'eau dans les altérations

montre que :

- Aucune relation n'est établie entre l'épaisseur d'altération et la productivité du niveau fracturé.

- On note une corrélation très souvent négative entre la productivité (débit spécifique du niveau fracturé et la pénétration dans le socle). Cette constatation traduit la stratégie habituelle des campagnes de forages en zone de socle. Cette stratégie consiste à forer jusqu'à l'obtention d'un débit fixé dans la majorité des marchés entre 0,5 et 1 m<sup>3</sup>/h. Cette corrélation négative traduit en quelque sorte la poursuite inutile de la foration des ouvrages lorsque les conditions hydrogéologiques s'avèrent défavorables.

- Aucune relation n'est établie entre la hauteur d'eau dans les altérations et le débit spécifique de l'ouvrage captant les niveaux fracturés. Cette relation reflète le mécanisme du système aquifère, à savoir que lors de l'exploitation de l'ouvrage captant les niveaux fracturés, la fonction conductrice du système est mise en jeu. La fonction capacitive des altérations susjacentes d'autant plus importante que la hauteur des altérations mouillées est importante, n'est mise en jeu qu'à partir d'un certain temps de pompage. On a vu que ce temps de réaction est très variable et très souvent supérieur aux durées habituelles de pompages d'essais habituellement effectués dans le cadre des programmes d'hydraulique villageoise (qui constituent l'ensemble des programmes étudiés dans la présente analyse statistique).

Une relation doit exister entre ces deux paramètres. Elle pourrait être mise en évidence en étudiant le résultat des essais de pompage de longue durée (réalisés dans le cadre du projet "Milieu fissuré" ERGM/Aquater au BURKINA) dépassant une durée de 48 heures.

Une analyse spécifique effectuée au Ghana Sud a démontré, dans les régions 3 et 4 que cette relation existe (coefficient de corrélation de l'ordre de 0,63 ) (cf. tableaux 29 et 30).



GRAPHIQUE DE FREQUENCES - ZONE GRANITO-GNEISSIQUE

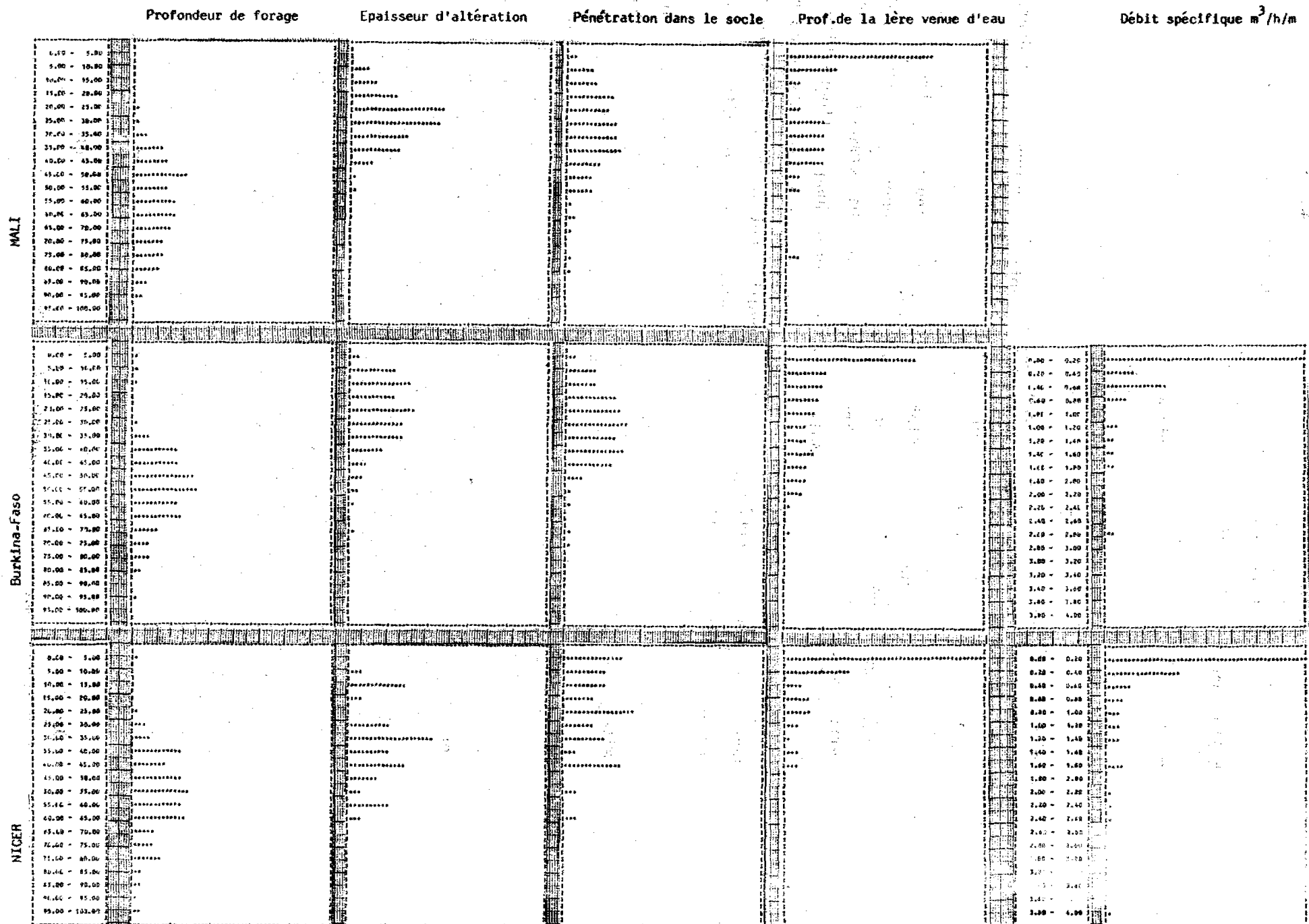


Tableau 27.9

GRAPHIQUE DE FREQUENCES - ZONE GRANITO-GNEISSIQUE

Profondeur de forage

Epaisseur d'altération

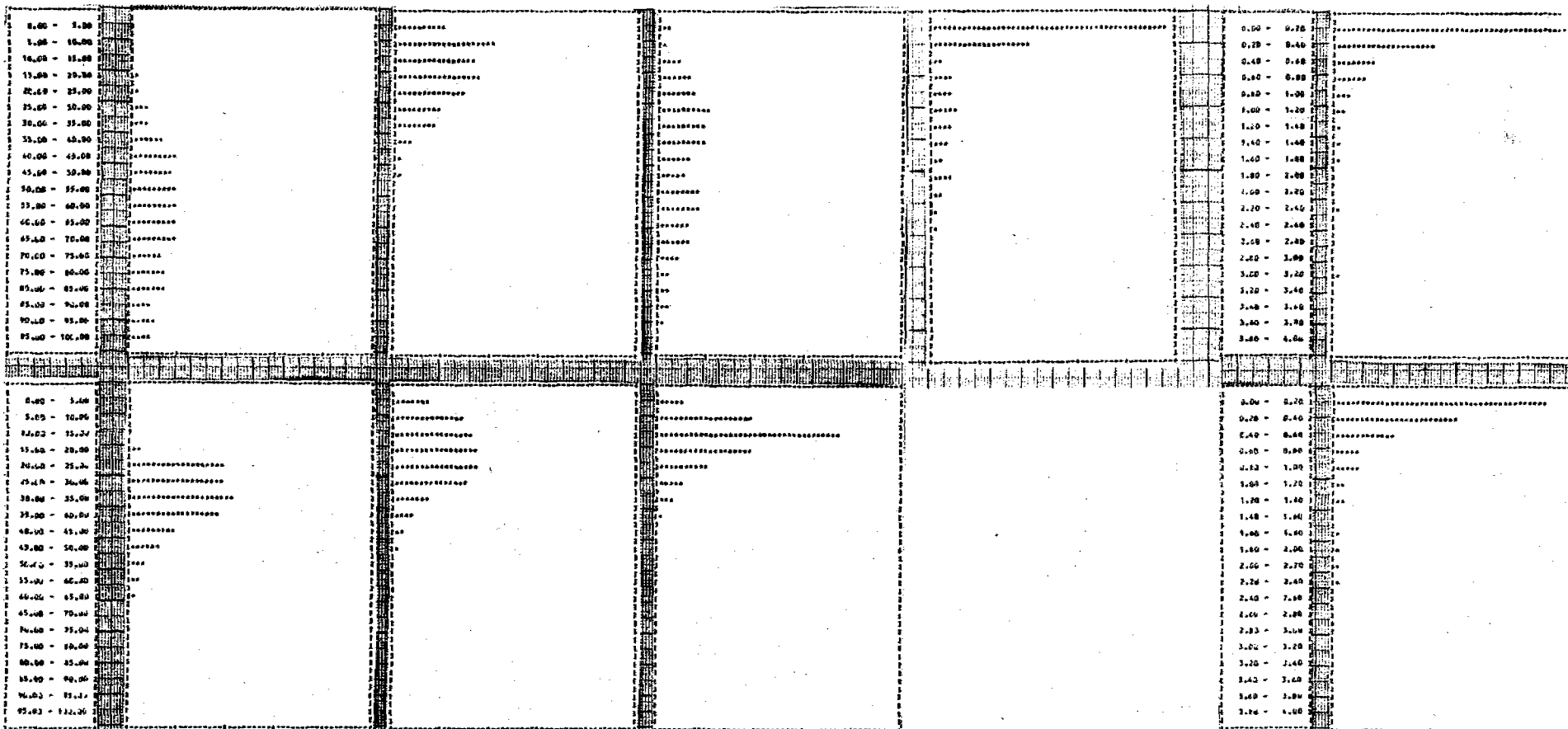
Pénétration dans le socle

Prof. de la lère venue d'eau

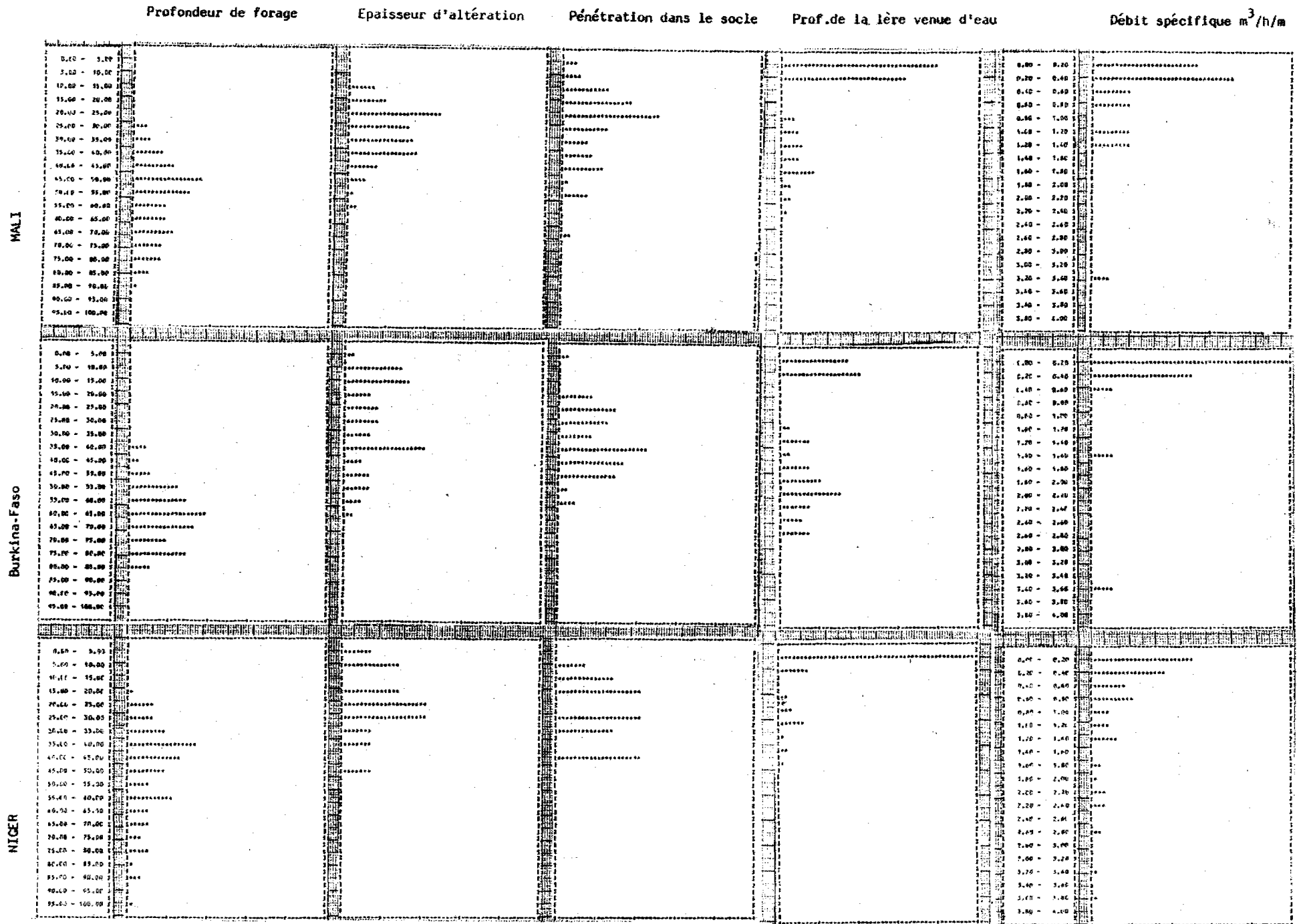
Débit spécifique m<sup>3</sup>/h/m

COTE D'IVOIRE

CHAMA-SUD



GRAPHIQUE DE FREQUENCES - ZONE SCHISTEUSE



GRAPHIQUE DE FREQUENCES - ZONE SCHISTEUSE

Profondeur de forage

Epaisseur d'altération

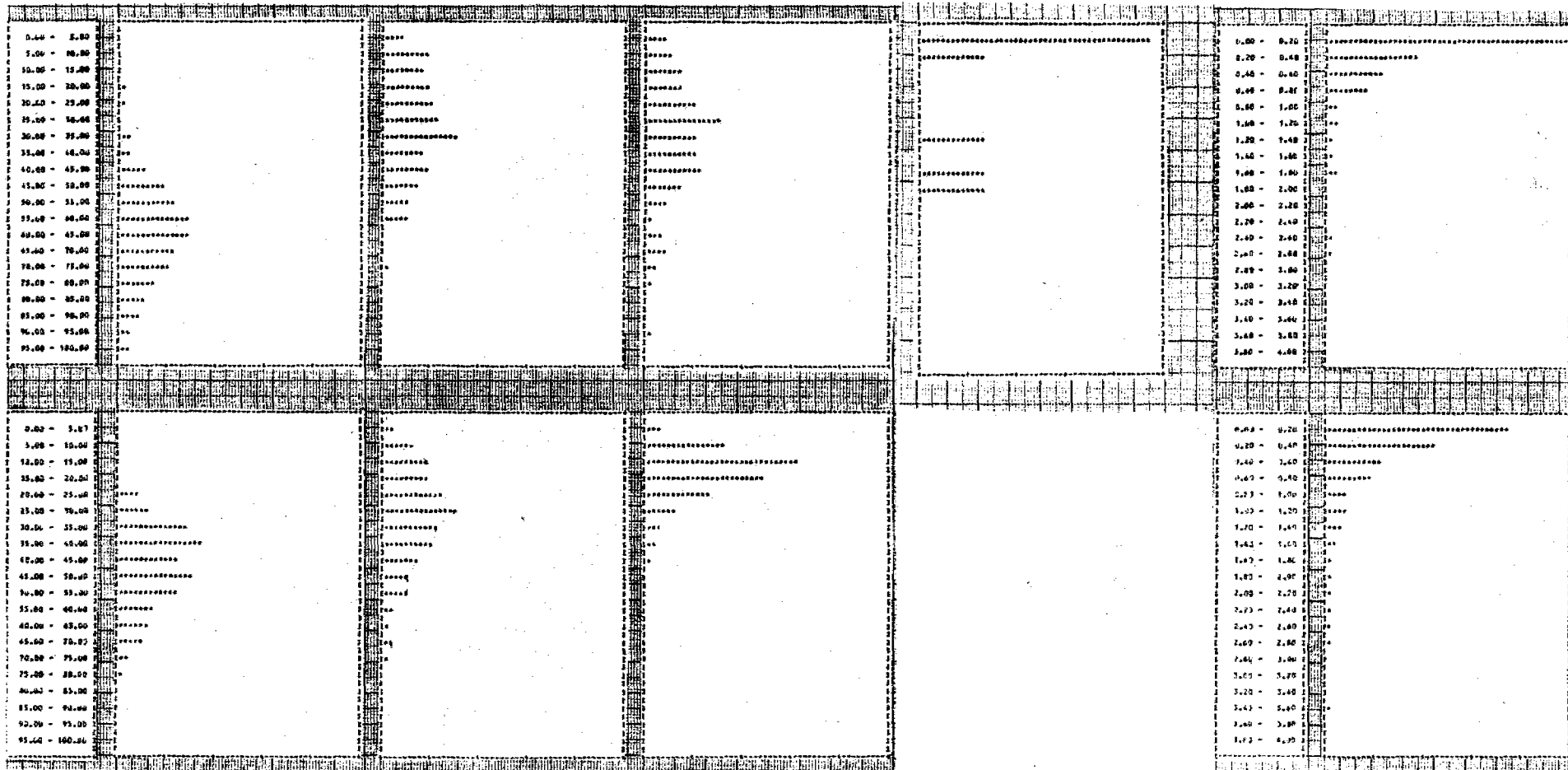
Pénétration dans le socle

Prof.de la lère venue d'eau

Débit spécifique m<sup>3</sup>/h/m

COTE D'IVOIRE

GHANA - SUD



ANALYSE STATISTIQUE DANS LE BOUCLIER CRISTALLIN OUEST AFRICAIN

Etude de corrélation

COTE-D'IVOIRE

DEBIT SPECIFIQUE	G E O L O G I E					
	GRA	GDD	SCH	DOL	GNE	DIO
Epaisseur d'altération	0,05	-0,44*	-0,05	-0,63	-0,35	0,21*
Pénétration dans le socle	-0,18	-0,35*	-0,05	-0,03	-0,24	-0,61*
Hauteur d'eau dans l'altération	0,00	-0,18	0,06	-0,03	-0,20	-0,71

GHANA Sud

DEBIT SPECIFIQUE	G E O L O G I E					
	GRA	GDD	SCH	DOL	GNE	DIO
Epaisseur d'altération	-0,17	-0,22	-0,05	0,11	-0,12	-0,16
Pénétration dans le socle	-0,07	-0,06	-0,17	-0,19	-0,09	-0,10
Hauteur d'eau dans l'altération	-0,17	-0,21	-0,04	0,21	-0,08	-0,12

MALI

DEBIT SPECIFIQUE	G E O L O G I E		
	GRA	SCH	DOL
Epaisseur d'altération	-0,36	-0,21	-1
Pénétration dans le socle	-0,06	0,15	1
Hauteur d'eau dans l'altération	-0,37	-0,26	1

\* Echantillon non représentatif.  
Taille insuffisante (<10).

0,37 : Coefficient de corrélation  
entre débit spécifique et  
l'un des trois paramètres.

NIGER

DEBIT SPECIFIQUE	G E O L O G I E	
	GRA	SCH
Epaisseur d'altération	-0,04	-0,37
Pénétration dans le socle	-0,12	-0,46
Hauteur d'eau dans l'altération	0,11	-0,5

BURKINA

DEBIT SPECIFIQUE	G E O L O G I E	
	GRA	SCH
Epaisseur d'altération	-0,12	-0,27
Pénétration dans le socle	-0,32	-0,15
Hauteur d'eau dans l'altération	0,03	-0,20

RESULTATS DU TRAITEMENT STATISTIQUE  
(Par région, toutes géologies confondues)

GHANA : Sud

- Valeurs moyennes et coefficients de corrélation -

	Régions	1	2	3	4
	Paramètres				
Nombre de forages		109	1918	1142	347
Hauteur d'Eau dans les Altérites HEA m.		33	12	6	-6
Profondeur des Venues d'Eau PVE m.		54	43	37	45
Epaisseur d'Altération Ep.A m.		52	27	20	15
Profondeur Niveau Statique PNS m.		19	15	15	22
Débit Q m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>		1,2	1,8	1,3	1,6
Rabattement m.		3	6	4	6
Débit spécifique Qspé m <sup>2</sup> h <sup>-1</sup>		0,63	0,22	0,11	-0,01
Teneur en Fe (mg/l)		0,03	0,63	0,32	0,32
Teneur en NO <sub>3</sub>		1,9	2,6	2,5	2,3
Teneur en Cl.		15	19	43	39
Teneur en Mn.		0,49	0,26	0,26	0,50
P.N.S. / Ep. A.		0,39	0,15	0,10	0,06
P.V.E. / Ep. A.		0,90	0,47	0,74	0,35
P.V.E. / Q.spé.		-0,28	-0,07	-0,14	-0,35
/ Q		0,30	0,27	0,39	0,46
Q.spé./Pénétration dans le socle		-0,20	-0,11	-0,36	-0,38
H.E.A. / Q.spé.		0,27	0,45	0,63	0,65
Ep. A. / Q.spé.		-0,17	0,04	0,13	0,06
Teneur en Fe / Teneur en Mn		0,30	0,30	0,25	0,70
P.N.S. / Teneur en NO <sub>3</sub>		-0,36	-0,14	-0,21	-0,25
Pénétration dans le socle		3	16	17	29

RESULTATS DU TRAITEMENT STATISTIQUE

GHANA-Nord : par géologie, toutes régions confondues

- Valeurs moyennes et coefficients de corrélation -

GEOLOGIE	SCH	PHY	PEG	GRA	GNE	GDD	GAB	DIO
Nombre de forages	347	101	20	1298	106	298	19	32
Profondeur des forages	27	35	23	25	26	24	20	22
Profondeur niveau statique	8	8	7	7	7	7	6	7
Débit : Q	1,3	2,7	1,3	2,0	1,7	1,6	1,5	1,5
Rabattement :	7	8	5	7	7	5	7	5
Débit spécifique : Q.spé.	0,43	0,48	0,58	0,47	0,43	0,55	0,35	0,46

Coefficients de corrélation

Hauteur d'eau = Pr - PNS/P.N.S.	-0,10	-0,15	0,01	-0,21	-0,21	-0,15	-0,38	-0,2
Profondeur / Hauteur d'eau	0,87	0,94	0,89	0,90	0,94	0,87	0,85	0,91
P.N.S. / Q. spé.	0,05	-0,11	0,13	0,07	0,12	0,12	0,50	0,05
Hauteur d'eau / Q. spé.	-0,24	0,00	-0,13	-0,10	-0,16	-0,07	-0,45	0,16
Profondeur / Q. spé.	-0,20	-0,04	-0,05	-0,07	-0,12	-0,01	-0,20	0,18
Q /	0,19	0,25	-0,42	0,30	0,53	0,09	0,74	-0,16
Profondeur / P.N.S.	0,40	0,20	0,45	0,24	0,12	0,35	0,15	0,20

Les forages ne concernent que la couche d'altérites.

à abaque (S) ...

du Inconnu, ...

## VI/ PROPOSITIONS D'ACTIONS COMPLEMENTAIRES

arrêté, ...

A l'issue de ce bilan des connaissances acquises en zone de socle cristallin du bouclier Ouest africain, il apparaît indispensable de recommander des actions qui pourraient être mises en oeuvre par les services nationaux ou les bureaux de contrôle et surveillance des travaux.

### VI.1 MISE EN PLACE D'UN RESEAU PIEZOMETRIQUE

On a vu aux chapitres précédents que les conditions climatiques déficitaires ont provoqué, dans la zone sahélienne, une baisse généralisée du niveau des nappes. Cette baisse est d'autant plus marquée que l'aquifère a une capacité limitée et donc sensible aux recharges aléatoires. Différentes approches ont été déjà entreprises soit par les services nationaux, soit par des organismes sous-régionaux (CEAO - CIEH), pour mettre en place un réseau piézométrique de surveillance de la ressource.

Dans le cas de la présente étude, le réseau devra concerner les zones de socle cristallin. Le problème du réseau piézométrique va se poser pour chaque pays à deux niveaux :

#### VI.1.1. Mise en place du réseau

-> La mise en place du réseau de surveillance. Ce réseau sera défini à partir d'ouvrages non utilisés mais positifs (débit inférieur au débit de réception) ou d'ouvrages spécialement réalisés à cet effet. Le nombre de points d'observation constituant le réseau sera fonction :

. de la superficie de l'ensemble de la zone de socle cristallin ;

. de la variété des formations géologiques. On a vu dans l'étude que, sur le plan du comportement hydraulique, on pourrait regrouper les formations géologiques sous trois familles distinctes : granites et granito-gneiss, schistes, roches vertes et amphibolites ;

. des conditions géomorphologiques et climatiques. Généralement deux cas doivent être adoptés : Zone de vallée proche du cours d'eau et zone d'interfluves (plateaux).

Un découpage par zone climatique est à envisager :

$P < 200 \text{ mm}$  ;  $200 < P < 500 \text{ mm}$  ;  $500 < P < 1000 \text{ mm}$  ;  $P > 1000 \text{ mm}$ .



Compte tenu de ces différentes contraintes, on peut proposer la répartition suivante.

: Pays	: Nombre	: Pays(*)	: Nombre	:
: BURKINA	: 100	: LIBERIA	: 50	:
: NIGER-Liptako	: 120	: GHANA	: 150	:
: MALI-Sud	: 150	: SIERRE LEONE	: 30	:
: COTE D'IVOIRE	: 150	: GUINEE Conakry	: 70	:
:	:	:	:	:

Le détail du calcul est donné au tableau 31.

#### VI.1.2 Le suivi du réseau piézométrique

Il doit être assuré par les services nationaux. Le système des mesures doit être adapté au régime des pluies.

- . Régime tropical : 1 saison sèche, 1 saison des pluies :
  - + 3 mesures en saison sèche
  - + 2 mesures en saison des pluies.

- . Régime équatorial : 2 saisons sèches, 2 saisons des pluies :
  - + 2 mesures pour chaque saison sèche
  - + 3 mesures pour chaque saison des pluies.

Dans le cas du suivi des réseaux nationaux, il est possible d'envisager l'installation d'une balise de surveillance ARGOS en relation avec une station de réception à déterminer ( AGRYMET à Niamey ou en Europe ...).

#### VI.2 NORMALISATION DES PROCEDURES ET D'INTERPRETATION D'ESSAIS DE DEBIT DES AQUIFERES DISCONTINUS

On a vu que les procédures d'essais de débit appliquées dans le cadre des opérations de forage sont variées. Cette variété présente deux inconvénients majeurs :

- . Les pompages de courte durée (1 à 3 h) sont mal adaptés à l'estimation des capacités hydrauliques du milieu fracturé et n'abordent pas la connaissance des mécanismes hydrauliques (effets de limite ou de drainage temporaire).

---

(\*) Pays non membres du CIEH.

PROPOSITION DE RESEAUX PIEZOMETRIQUES NATIONAUX  
EN ZONE DE SOCLE CRISTALLIN

Pays	Superficie de socle (*)	Zone (**) climatique	Variété (**) géologique	Nombre de points d'eau
BURKINA	0,25	3	3	100
NIGER	0,32	2	3	120
MALI (Sud)	0,43	2	3	150
COTE-D'IVOIRE	0,30	3	3	200
LIBERIA	0,12	2	3	50
GHANA	0,23	3	3	150
SIERRA LEONE	0,05	2	3	30
GUINEE Conakry	0,23	2	3	70

(\*) Millions de km<sup>2</sup>.

(\*\*) Nombre

. La comparaison des résultats à une échelle régionale est délicate. C'est notamment le cas de la comparaison des débits spécifiques dont le calcul est basé sur les valeurs de débits et rabattements. Or ces données sont fournies suivant des procédures variées (les temps de pompage sont différents, les rabattements ne sont pas stabilisés ou estimés, parfois même non fournis - cas des pompages à l'Air Lift).

Dans le cas des essais de débit sur puits, une méthode a été élaborée par le CIEH pour estimer le débit d'exploitation du puits en tenant compte de son diamètre, de la date de l'essai par rapport au début de la saison sèche, de la durée de la saison sèche et des variations (connues ou estimées) de niveau piézométrique. Il serait également utile de mettre au point et proposer aux services nationaux une méthode normalisée d'essai de débit dont l'interprétation tienne compte du caractère anisotrope du milieu fracturé (vulgarisation des méthodes élaborées par Papadopoulos/Cooper et Gringarten/Witherspoon).

### VI.3 DEFINITION DE CRITERES HYDRAULIQUES DU MILIEU CRISTALLIN

Dans le but d'aboutir à une comparaison des différentes unités hydrogéologiques et à l'identification de zones favorables à une exploitation (cas de l'hydraulique urbaine à semi-urbaine), il serait utile de définir des critères indispensables aux connaissances des capacités du socle.

Parmi ces critères, il apparait nécessaire de retenir :

+ au niveau d'un secteur d'étude ou de l'ensemble d'un programme de forage :

. l'indice de productivité =  $I_1$

$$I_1 = \frac{\text{débit spécifique} \times \text{taux de succès}}{\text{profondeur totale moyenne des forages}}$$

. l'indice d'exploitabilité =  $I_2$

$$I_2 = \frac{\text{Débit spécifique}}{\text{Niveau statique (*)}}$$

(\*) De préférence en fin de saison sèche.

Une telle zonation a mis en évidence, dans le Nord Burkina, des zones très favorables à fort indice d'exploitabilité (0,1 à 0,2) contrastant avec des valeurs très défavorables (0,01).

+ au niveau de chaque ouvrage :

. Le débit spécifique défini dans des conditions bien précises (temps de pompage fixé ou à rabattement pseudo-stabilisé). Ce paramètre présente l'avantage d'être plus significatif que la transmissivité, compte tenu de l'anisotropie hydraulique du milieu fracturé.

. Les caractéristiques des venues d'eau : profondeurs, variations des vitesses d'avancement, variations de la résistivité moyenne de l'eau. On a vu à l'issue de l'analyse des données de forage, que ces paramètres sont très hétérogènes : une seule venue d'eau est signalée.

. Le contact altération/socle doit être défini avec d'avantage de précisions. La détermination de cette profondeur a lieu sur des critères subjectifs liés à une appréciation délicate du contact dans le cas où l'on ne dispose pas de sondages électriques permettant de préciser cette valeur. Il est recommandé dans ce cas d'équiper les machines de forages, d'enregistreurs de vitesses d'avancement.

#### VI.4 ANALYSE STATISTIQUE COMPLEMENTAIRE

Dans le cadre d'une étude statistique à réaliser sur la base de données fournies par un programme d'hydraulique villageoise en zone de socle, il conviendrait d'entreprendre les analyses suivantes :

##### VI.4.1. Etude de la répartition géographique des variables

Afin d'effectuer un lissage des valeurs de paramètre, dans le cas de fortes valeurs, on peut effectuer une cartographie du logarithme de la valeur (par exemple celle du débit spécifique) et se rapprocher ainsi de la médiane.

Les paramètres fondamentaux à cartographier et les résultats que l'on peut espérer à la suite de la présente étude générale sont :

- Profondeur des forages : Bien que ce paramètre soit fortement influencé par des critères contractuels, la répartition des profondeurs respecte une loi log normale. Cette loi a déjà été mise en évidence en Côte-d'Ivoire dans les formations birrimiennes et éburnéennes et, hors de la zone d'étude, dans les formations cristallines du Togo.

. débit des ouvrages : La répartition de ce paramètre dont la valeur est faussée par la méthode adoptée pour l'estimation du débit, et par la nature même du débit que l'on annonce, suit aussi une loi normale. Notons également que ces valeurs de débit sont biaisées par le fait que l'on arrête le forage à une valeur supérieure ou égale au débit de réception.

. Orientation des linéaments. Ce paramètre peut être représenté par 9 classes d'angles de 0 à 180° en exprimant l'intervalle de confiance limite (par exemple 80 %) à accorder à ces pourcentages.

#### VI.4.2 Analyse globale de la probabilité de succès

Prédétermination du débit et de la profondeur de succès.

L'intérêt de cette analyse consiste à prédéterminer la profondeur à laquelle on obtiendra un succès, c'est-à-dire au moins égal à une certaine valeur.

Si l'on arrive ainsi à calculer avec suffisamment de précision la profondeur de succès, il est possible de définir une stratégie d'implantation de façon à sélectionner les sites les plus favorables.

Pour analyser les facteurs de succès on dispose de variables qui constituent les données de forages parmi lesquelles certaines sont connues à l'avance (situation géographique, géologie, pluviométrie...) d'autres en cours de foration (venues d'eau) et une dernière catégorie après exécution de l'ouvrage (débit, profondeur de niveau...). De ces variables, on en déduit des variables transformées comme le nombre de venues d'eau à une profondeur donnée (par exemple 30 m).

L'utilisation d'une variable fournie en cours de foration peut permettre d'estimer la profondeur de succès des ouvrages. Cette variable significative semble être constituée par le nombre de venues d'eau dans les 30 premiers mètres de profondeur du forage.

La profondeur de succès de l'ouvrage est liée à cette variable significative prépondérante et à d'autres variables confluentes telles que :

- . le nombre de venues d'eau à une profondeur (30 m)
- . la longueur du linéament
- . le type de linéaments (croisés ...)
- . le type de recouvrement
- . la pluviométrie
- . la lithologie
- . les travaux géophysiques préalables

L'application de ce type d'analyse permettrait d'optimiser les programmes de forage en réduisant le coût moyen par succès.

L'application de cette analyse de corrélation multiple appliquée sur un échantillon de 300 forages au Togo a montré que la prédétermination de la profondeur de l'ouvrage est acceptable et que l'intervalle de confiance est de 80 %. L'erreur relative n'a pas excédé 27 %.

L'optimisation suivant la méthode de Rosebrock de l'équation de prédétermination de la profondeur de succès a permis d'ajuster automatiquement les coefficients des variables et de la constante de façon à réduire le coût de 4,4 %.

Par cette méthode, un ouvrage est effectué jusqu'à une profondeur minimale de 30 m. A cette profondeur, compte tenu du nombre de venues d'eau et des autres variables, on décide ou non la poursuite des travaux.

Cette méthode constitue un outil de décision et d'optimisation des travaux de forage. Il semble néanmoins indispensable de disposer de plus d'une centaine de forages pour qu'il puisse avoir une influence significative.

#### VI.5 MISE AU POINT D'UN CANEVAS-TYPE DE SYNTHÈSE DE DONNÉES FOURNIES PAR LES PROGRAMMES DE FORAGE

La présente étude s'est heurtée à des problèmes d'hétérogénéité dans la qualité des données.

Cette hétérogénéité est due :

+ Au niveau variable des informations. Ces données sont fournies par les rapports d'exécution (rapport de chantier, rapport de travaux de surveillance, tableaux récapitulatifs). Dans ce cadre, le manque de certaines données nuisent à l'exécution d'études systématiques (par exemple : absences fréquentes des valeurs de résistivité, de venues d'eau ; imprécision dans la détermination des faciès géologiques).

+ Au manque de normes adoptées par les bureaux d'études ou les services chargés du suivi des travaux de forages. Cette hétérogénéité rend délicate la comparaison de certains paramètres tels que le débit spécifique valeur qui est déduite de deux valeurs influencées par les critères de pompage (durée, mode de pompage...).

Ces constatations impliquent la nécessité d'imposer aux services et bureaux chargés du suivi des travaux, un document guide destiné à l'élaboration des rapports d'exécution des programmes.

Laissant la liberté aux bureaux concernés d'adapter leur rapport d'exécution à la spécificité du programme suivi, le document guide doit énumérer des paramètres jugés indispensables à une réflexion de synthèse à un niveau régional.

BIBLIOGRAPHIE SECTORIELLE

GÉOPHYSIQUE /

- GEOCONSULT : - Note sur la méthode magné-tellurgique. Le sondage électro-magnétique et le sondage radio-magneto-tellurgique. 1980.
- JONG, S.L. de. : - Expérimentation de méthodes électromagnétiques appliquées à la recherche des eaux souterraines en terrain de socle cristallin en Haute-Volta. Dans bulletin de liaison du CIEH n° 44, mars 1981.
- DEMBELE, Karim : - Contribution des méthodes géophysiques à la reconnaissance des aquifères semi-continus en milieu fissuré. Dans bulletin de liaison du CIEH, n° 51, décembre 1982.
- C.I.E.H. : - Utilisation des méthodes géophysiques pour la recherche d'eau dans les aquifères discontinus. Paris, 1984. VIII - 164 p., annexes. Rapport BURGEAP.
- ARLAB : 1980 : - Les recherches d'eau dans le socle africain. Apport de la géophysique.
- M. BRION 1976 : - L'étude du phénomène de l'anisotropie électrique appliquée en milieu carbonaté fracturé. Thèse 3ème cycle.

HYDROGÉOLOGIE. MALI /

- B.A.D. : - Étude des eaux souterraines du Mali et compilation des données. Abidjan, 1979.
- TRAVI, Y. et GUIRAUD, R. : -Présence d'un aquifère généralisé dans les formations gréseuses, précambriennes de la région de SAN (Mali). Rôle de la fracturation majeure dans les écoulements souterraines. Dans bulletin de liaison du CIEH, n° 50, septembre 1982.
- PNUD. : - Exploitation des eaux souterraines au Mali. Conclusions et recommandations du projet. [s.l., 1964]. Pagination multiple, tabl.

HYDROGÉOLOGIE. GHANA /

- Amuzu, A.Y. : - The quality of ground water in the Accra plains of Ghana. Accra, Water Resources Research Unit, 1978. 8 p. I. I. AKIVI 1980 : Etude géochimique et isotopique de quelques aquifères du Ghana : calcaires et granites.
- D.C. International Drilling Consultants 3000 well. : - Drilling Program in southern and Central Ghana. Vol. II Village Maps. GWSC.
- WARDROP and ASSOCIATES LTD : 1980 : - Final hydrogeological report for drilling program 1974-1979. GHANA NORD.



HYDROGEOLOGIE. BURKINA /

- AUTORITE DES AMENAGEMENTS DES VALLEES DES VOLTA : - Etudes hydrogéologiques 1979-1980. /Ouagadougou, IWACO, 1980/.
- B.R.G.M. : - Hydraulique villageoise dans l'ORD du Sahel : Rapport intérimaire. /Orléans (France), BRGM, 1980/.
- AUTORITE DES AMENAGEMENTS DES VALLEES DES VOLTA ; - Etude des eaux souterraines dans la vallée de la BOUGOURIBA. Rapport technique. /s.l./, AVV/PNUD, 1978-1979.
- B.R.G.M. : - Mission hydrogéologique villageoise dans les régions de Djibo, Aribinda, Sebba (Haute-Volta) : Rapport de prospection géophysique par méthode électrique. Orléans (France), BRGM / Département Géophysique, 1982.
- IWACO/BV. : - Alimentation en eau potable de dix centres secondaires. Etudes hydrogéologiques. Ouagadougou, IWACO, 1982. 10 volumes.
- B.R.G.M. - DIRECTION DE L'HER : - Hydraulique villageoise dans l'ORD du Sahel. Haute-Volta. Deuxième phase. Orléans /France/, 1983.
- IWACO/BV : - Etudes hydrogéologiques 1980-81 /Ouagadougou, IWACO/AVV. s.d./.
- IWACO/BV : 1983 : - Etudes hydrogéologiques 1981-1982. Aménagement des Vallées des Volta (A.V.V.).

HYDROGEOLOGIE. COTE-D'IVOIRE /

- BURGEAP/Renardet Engineering : - Projet de développement des régions cotonnières : Etudes d'implantation et surveillance des travaux de 570 points d'eau. (2 vol.). 1979.
- GEOMINES/Côte-d'Ivoire. Direction Centrale de l'Hydraulique : - Manuels pratiques à l'usage de l'hydraulique villageoise. Montréal, GEOMINES LTEE. 1982. 2 tomes.
- " : - Inventaire hydrogéologique de la Côte-d'Ivoire appliqué à l'hydraulique villageoise. HYDROGEO 1982 : Rapport final du projet d'hydraulique villageoise 4ème FED en Côte-d'Ivoire.

HYDROGEOLOGIE. NIGER /

- B.R.G.M. : - Hydraulique villageoise dans le Liptako (Niger). Exécution de 136 forages et mise en place de 110 pompes à motricité humaine. Orléans, BRGM, 1981. 5 fasc.
- " : - Projet 1000 forages. Résultats géophysiques : zones de Zinder et Maradi (Niger). Orléans, BRGM/Département Géophysique, /1982/. 14 p., graph. + annexes h.t.
- NIGER. DIRECTION DES INFRASTRUCTURES HYDRAULIQUES : - Projet d'hydraulique villageoise dans la région du Liptako de la République du Niger. /Ouagadougou, IWACO/, 1983. volumes.

- IWACO/BV. : - Projet d'hydraulique villageoise dans la région du Liptako. Ouagadougou, IWACO, 1983. 7 tomes.
- C.I.E.H. : 1983 : - Evaluation des projets d'hydraulique villageoise au NIGER.
- B.R.G.M. : - Programme d'hydraulique villageoise du Conseil de l'Entente au Niger. Campagne géophysique dans les régions du Liptako, de Gouré et de Maradi. Orléans (France), BRGM, 1983. 2 volumes.
- " : - Projet 1000 forages. Analyse de résultats d'une campagne d'hydraulique villageoise au Niger. Orléans (France).

#### HYDROGEOLOGIE. GUINEE CONAKRY /

- S.N.A.P.E. : - Rapport d'activité de la campagne 1982-1983.

#### RESSOURCES EN EAU DE L'AFRIQUE DE L'OUEST ET CENTRALE /

- C.I.E.H. : - Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Atlas de photointerprétation. Vol. 3, GEOHYDRAULIQUE.
- BURGEAP : - Essais de débits simplifiés sur puits : application à l'évaluation du débit d'exploitation des ouvrages dans les régions à substratum cristallin d'Afrique tropicale. Paris, BURGEAP, 1982.
- CEFIGRE : - Synthèse des connaissances sur l'hydrogéologie du socle cristallin et cristalloyellien, et du sédimentaire ancien de l'Afrique de l'Ouest. /Sophia-Antipolis (France), CEFIGRE/, 1983.
- SAWADOGO, Silminoaga : - Contribution de la télédétection à l'étude de la fracturation. Application à l'hydrogéologie du socle en milieu intertropical. (Haute-Volta). Orléans (France, Université d'Orléans, 1982).
- C.I.E.H. : 1978 : - L'eau souterraine dans les roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Tome 1. GEOHYDRAULIQUE.
- C.I.E.H. : 1979 : - L'eau souterraine dans les roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Tome 2. GEOHYDRAULIQUE.
- CIEH/BURGEAP : 1983 : - Le forage d'eau. Matériel et Techniques mis en oeuvre en Afrique de l'Ouest et du Centre. Publication du Ministère français des relations extérieures Coopération et Développement.
- BURGEAP : 1978 : - L'équipement des villages en puits et forages dans les Etats ACP. d'Afrique. CCE. DGD.
- C.I.E.H. : 1976 : - Notice et cartes de planification des ressources en eau souterraine des Etats Membres du CIEH de l'Afrique Soudano-Sahélienne. BRGM.

- C.I.E.H. : 1979 : - Notice et cartes de planification des ressources en eau. Côte-d'Ivoire, Ghana, Togo, Bénin. BRGM.
- C.I.E.H. : 1967 : - Etude statistique des forages et carte hydrogéologique des régions à substratum cristallin et métamorphique en Afrique Occidentale. BRGM.
- B.R.G.M. : 1982 : - Interprétation des pompages d'essai en milieu fissuré aquifère.

CONFERENCES - COLLOQUES /

- C.I.E.H. : 1983 : - Compte rendu de la cinquième Conférence Africaine des Techniques d'Exploitation des Eaux Souterraines (CATEES).
  - B.R.G.M. : 1982 : - Colloque sur les milieux discontinus en hydrogéologie. Communications. Jubilé G. Castany. Orléans 16-17/11/82.
  - UNESCO : 1983 : - Symposium International sur les méthodes et matériel permettant de rechercher des systèmes d'eaux souterraines.  
- MIGS - Hollande.
-

ANNEXES

Fiche signalétique de programmes de forage  
réalisés dans le bouclier ouest africain

---

**I Généralités :**

Nom du projet : Hydraulique villageoise dans la région du Liptako  
Pays : Niger  
Région : Liptako  
Financement : Fonds d'entraide et de Garantie des Empruntés du  
Année : 1983. Conseil de l'Entente / Pays Bas.

**II Résultats**

Nombre de forages : 127  
Nombre de forages positifs : 94  
Taux d'échec : 26% (Roche filonienne : 25%, granite 50%).  
Profondeur moyenne : 50 m  
Aquifère capté : roche filonienne (19%); granite (53%); schiste (28%)  
Niveau aquifère : Zone fracturée  
Critère de sélection des ouvrages : 0.5 m<sup>3</sup>/h

**III Prospection préliminaire**

Photointerpretation : 1/60.000 de 1975 + cartes photogéologiques  
Géophysique : électrique et électromagnétique  
Enquête hydrogéologique : reconnaissance de terrain

**IV Mise en production des ouvrages**

Developpement : soufflage 1h Air lift : 1h  
Essai de débit : 8h descente , 8h Remontée

**V Equipement**

Tubage : PVC 113/125 mm  
Superstructure: margelle  
Type de pompe Vergnet 4C1 et 4C2

**VI Montage financier**

Coût total du projet :  
Coût du forage positif : 3.881.000 F CFA  
Coût de l'ouvrage positif :  
(toutes prestations comprises)

Fiche signalétique de programmes de forage  
réalisés dans le bouclier ouest africain

-----

**I Généralités :**

Nom du projet : Hydraulique villageoise dans le dépt. du Sahel (1ère phase)  
Pays : BURKINA FASO (HAUTE VOLTA)  
Région : Sahel  
Financement : Fonds d'Aide et de Coopération (FAC) République Française  
Année : 1981

**II Résultats**

Nombre de forages : 190  
Nombre de forages positifs : 130  
Taux d'échec : 33,25%  
Profondeur moyenne : 54,17m  
Aquifère capté : 76,3% de granite et 23,7% vulcano-sédimentaire et Sédi.  
Niveau aquifère : Zone fracturée  
Critère de sélection des ouvrages : 0,5m<sup>3</sup>/h

**III Prospection préliminaire**

Photointerprétation : photo aériennes 1/50.000  
Géophysique : sondages et traînés électriques  
Enquête hydrogéologique : cartes géologiques topographiques au  
1/200.000, 1/500.000 1/1.000.000

**IV Mise en production des ouvrages**

Développement : 30' pour le nettoyage et 2h30 pour le développement  
Essai de débit : débit constant pendant 6h à l'électropompe immergée

**V Equipement**

Tubage : PVC 112 / 125 mm.  
Superstructure : margelle et antibourbier  
Type de pompe : Hydropompes Vergnet

**VI Montage financier**

Coût total du projet : 490.000.000 FCFA  
Coût du forage positif : 2.226.000 FCFA  
Coût de l'ouvrage positif : 3.730.000 FCFA  
(toutes prestations comprises)

Fiche signalétique de programmes de forage  
réalisés dans le bouclier ouest africain

-----

I Généralités :

Nom du projet : Hydraulique villageoise dans l'ORD du Sahel 1ère et 2ème phase  
Pays : Burkina Faso  
Région : Sahel  
Financement : FAC République Française  
Année : 1983

II Résultats

Nombre de forages : 219  
Nombre de forages positifs : 164  
Taux d'échec : 25% (Schistes:13%, granite  
Profondeur moyenne : 48,6  
Aquifère capté : Granite, schiste, Roches basiques  
Niveau aquifère : Zone fracturée  
Critère de sélection des ouvrages : 0,5m<sup>3</sup>/h

III Prospection préliminaire

Photointerpretation : 1/50.000ème  
Géophysique : Sondages et trainées électriques  
Enquête hydrogéologique : Enquête de terrain

IV Mise en production des ouvrages

Developpement : 2h Air lift  
Essai de débit : Débit constant pendant 6h. 2h de Remontée.

V Equipement

Tubage : PVC 112/125mm  
Superstructure: Margelle  
Type de pompe : Vergnet 4C1 et 4C2

VI Montage financier

Coût total du projet : 583.899.000 FCFA  
Coût du forage positif : 2.138.000 FCFA  
Coût de l'ouvrage positif : 3.546.000 FCFA  
(toutes prestations comprises)

Fiche signalétique de programmes de forage  
réalisés dans le bouclier ouest africain

---

**I Généralités :**

Nom du projet :  
Pays : 760 points d'eau  
Région : BOUNA - BOUAKE . Cote d'Ivoire.  
Financement : FED (4ème)  
Année : 1982

**II Résultats**

Nombre de forages : 889.  
Nombre de forages positifs : 760.  
  
Taux d'échec : 25%  
Profondeur moyenne : 67 m  
Aquifère capté :  
Niveau aquifère : granites, schistes  
Critère de sélection des ouvrages : 1m<sup>3</sup>/h

**III Prospection préliminaire**

Photointerpretation : oui.  
Géophysique : non.  
Enquête hydrogéologique : oui.

**IV Mise en production des ouvrages**

Developpement : Air lift  
Essai de débit : 3 paliers de débit pendant 6h

**V Equipement**

Tubage : Captage PVC5" Charpente de pompage: PVC 8"  
Superstructure:  
Type de pompe : ABI-VERGNET

**VI Montage financier**

Coût total du projet : 1.705.000.000 FCFA  
Coût du forage positif : 2.077.000 FCFA  
Coût de l'ouvrage positif : 2.250.000 FCFA  
(toutes prestations comprises)



Fiche signalétique de programmes de forage  
réalisés dans le bouclier ouest africain

-----

**I Généralités :**

Nom du projet : Boucle du Cacao  
Pays : COTE D'IVOIRE  
Région : EST - COTE D'IVOIRE  
Financement : B S I E  
Année : 1974-1977

**II Résultats**

Nombre de forages : 1102  
Nombre de forages positifs : 1015

Taux d'échec Granite 16,9 ; Schiste 12,2  
Profondeur moyenne : Granite 62m ; Schistes 64,5  
Aquifère capté : Schistes et granites  
Niveau aquifère : Niveau fracturé  
Critère de sélection des ouvrages : 1m<sup>3</sup>/h

**III Prospection préliminaire**

Photointerpretation : oui.  
Géophysique : non.  
Enquête hydrogéologique : oui.

**IV Mise en production des ouvrages**

Developpement : Air lift  
Essai de débit : 6h en trois paliers de 2h.

**V Equipement**

Tubage : PVC 124/140mm  
Superstructure: Margelle  
Type de pompe : Pompe Vergnet

**VI Montage financier**

Coût total du projet : 4.046.866.000 FCFA  
Coût du forage positif : 3.676.250 FCFA  
Coût de l'ouvrage positif : 3.987.060 FCFA  
(toutes prestations comprises)

Fiche signalétique de programmes de forage  
réalisés dans le bouclier ouest africain

-----

**I Généralités :**

Nom du projet :  
Pays : COTE D'IVOIRE  
Région : Biankouma - Danane - Man - OUEST -  
Financement : CCCE  
Année : 1983

**II Résultats**

Nombre de forages : 890  
Nombre de forages positifs : 778  
  
Taux d'échec : 12,6%  
Profondeur moyenne : 61,85m.  
Aquifère capté : Granite  
Niveau aquifère : Zone fracturée  
Critère de sélection des ouvrages : 1m<sup>3</sup>/h

**III Prospection préliminaire**

Photointerpretation : oui.  
Géophysique : non.  
Enquête hydrogéologique : oui.

**IV Mise en production des ouvrages**

Developpement : Air lift 4h  
Essai de débit : 3 paliers de débit. Durée totale 6h.

**V Equipement**

Tubage : PVC  
Superstructure: Margelle  
Type de pompe : ABI. ASM.

**VI Montage financier**

Coût total du projet : 1.339.571.000 FCFA  
Coût du forage positif : 1.381.068 FCFA  
Coût de l'ouvrage positif : 1.721.810 FCFA  
(toutes prestations comprises)

Fiche signalétique de programmes de forage  
réalisés dans le bouclier ouest africain

---

**I Généralités :**

Nom du projet : LIPTAKO 130 forages  
Pays : NIGER  
Région : LIPTAKO  
Financement : CCCE  
Année : 1981

**II Résultats**

Nombre de forages : 136  
Nombre de forages positifs : 110  
  
Taux d'échec : 19  
Profondeur moyenne : 50  
Aquifère capté : Granites  
Niveau aquifère : Aquifère fracturé  
Critère de sélection des ouvrages : 0,5m<sup>3</sup>/h

**III Prospection préliminaire**

Photointerpretation : oui.  
Géophysique : non.  
Enquête hydrogéologique : oui.

**IV Mise en production des ouvrages**

Developpement : Air lift 4 heures  
Essai de débit : 4 paliers de 4 heures.

**V Equipement**

Tubage : PVC 110 - 125 mm  
Superstructure: Margelle  
Type de pompe : Pompe Vergnet

**VI Montage financier**

Coût total du projet : 369.896.500 F CFA  
Coût du forage positif : 2.621.000 FCFA  
Coût de l'ouvrage positif : 3.362.000 FCFA  
(toutes prestations comprises)

Fiche signalétique de programmes de forage  
réalisés dans le bouclier ouest africain

---

I Généralités :

Nom du projet : Hydraulique villageoise Yatenga Comoé  
Pays : Burkina Faso (Haute Volta)  
Région : Yatenga et Comoé  
Financement : F E D  
Année : 1981

II Résultats au 30-6-84

Nombre de forages : 485  
Nombre de forages positifs : 309

Taux d'échec 36% (granite 28%; Schiste 31%; grès 21%, RV 20%)  
Profondeur moyenne : 45,70m (49,6 granite; 62,5m schiste; 44,2m grès;  
Aquifère capté : granite schiste - grès - 48,2 m R. Verte)  
Niveau aquifère : altération et zone fracturée  
Critère de sélection des ouvrages :

III Prospection préliminaire

Photointerpretation : oui.  
Géophysique : non.  
Enquête hydrogéologique : oui.

IV Mise en production des ouvrages

Developpement :  
Essai de débit : 3 paliers de 1h et essai de 24h.

V Equipement

Tubage : forage petit diamètre PVC 110mm, en grand diamètre PVC 150mm  
Superstructure:  
Type de pompe :

VI Montage financier

Coût total du projet : 3.450.000 ECU soit 1.179.900.000 FCFA  
Coût du forage positif : 2.490.000 FCFA  
Coût de l'ouvrage positif :  
(toutes prestations comprises)

Fiche signalétique de programmes de forage  
réalisés dans le bouclier ouest africain

---

**I Généralités :**

Nom du projet : Mandiana  
Pays : Guinée Conakry  
Région : NE- Guinée  
Financement : FED  
Année : 1983

**II Résultats**

Nombre de forages : 42  
Nombre de forages positifs : 37  
  
Taux d'échec : 12%  
Profondeur moyenne : 60 m  
Aquifère capté : schiste  
Niveau aquifère : zone fracturé  
Critère de sélection des ouvrages :

**III Prospection préliminaire**

Photointerpretation : oui  
Géophysique : non  
Enquête hydrogéologique : oui

**IV Mise en production des ouvrages**

Developpement : air-lift  
Essai de débit : air-lift

**V Equipement**

Tubage : 4 1/2"  
Superstructure: dalle cimentée  
Type de pompe :

**VI Montage financier**

Coût total du projet :  
Coût du forage positif : 3.420.000 FCFA  
Coût de l'ouvrage positif :  
(toutes prestations comprises)

Fiche signalétique de programmes de forage  
réalisés dans le bouclier ouest africain

-----

**I Généralités :**

Nom du projet : 3000 well drilling programme  
Pays : Ghana  
Région : sud du pays  
Financement : KfW/R.F.A.  
Année : 1978 - 1983

**II Résultats**

Nombre de forages : 3897  
Nombre de forages positifs : 3001  
  
Taux d'échec : 23%  
Profondeur moyenne : 37 m  
Aquifère capté : granite, schiste  
Niveau aquifère : zone fracturée  
Critère de sélection des ouvrages : 0,8 à 0,3 m<sup>3</sup>/h

**III Prospection préliminaire**

Photointerpretation : oui  
Géophysique : non  
Enquête hydrogéologique : oui

**IV Mise en production des ouvrages**

Developpement : air-lift  
Essai de débit : 3 h air-lift

**V Equipement**

Tubage : 4"  
Superstructure: dalle cimentée  
Type de pompe : Moyno, India Mark II

**VI Montage financier**

Coût total du projet : 9,15.10<sup>9</sup> FCFA  
Coût du forage positif :  
Coût de l'ouvrage positif : 3,060,000 FCFA  
(toutes prestations comprises)

Fiche signalétique de programmes de forage  
réalisés dans le bouclier ouest africain

-----

I Généralités :

Nom du projet : groundwater supply project  
Pays : Ghana  
Région : Upper region  
Financement : CIDA  
Année : 1974 - 1981

II Résultats

Nombre de forages : 4079  
Nombre de forages positifs : 2388  
  
Taux d'échec: 41%  
Profondeur moyenne : 27 m  
Aquifère capté : granite, schiste  
Niveau aquifère : alteration  
Critère de sélection des ouvrages : 1 m<sup>3</sup>/h

III Prospection préliminaire

Photointerpretation : oui  
Géophysique : oui  
Enquête hydrogéologique : oui

IV Mise en production des ouvrages

Developpement : air-lift  
Essai de débit : 1 h, air-lift

V Equipement

Tubage : 4"  
Superstructure: dalle cimentée  
Type de pompe : Moyno

VI Montage financier

Coût total du projet :  
Coût du forage positif :  
Coût de l'ouvrage positif :  
(toutes prestations comprises)

CARACTERISTIQUES DES PROJETS DE FORAGES  
RECENSES POUR L'ANALYSE STATISTIQUE

P A Y S	Intitulé du projet	Nombre de forages*	Secteur géographique du pays
MALI	HELVETAS	215	Mali Sud - BOUGOUNI
BURKINA	ORD du Sahel 1ère phase	54	Nord du pays. Gorom.
	ORD du Sahel 2ème phase Yatenga - Comoé	46 124	Gorom. - Aribinda Nord-Ouest et Sud-Ouest.
	UNICEF	84	Centre-Est.
GHANA	Water Supply Project C.I.D.A. Upper Region 3000 WELL GWSC	2680 3000	Nord Ghana / BOLGATANGA Centre et Sud du pays.
	GUINEE	Nord-Est du pays	8
NIGER	1000 forages. Volet "Liptako"	360	LIPTAKO. S-W
	Entente/Pays Bas	126	
COTE-D'IVOIRE	Synthèse de différents projets	488	Tout le territoire
LIBERIA	Rural Water Programme	204	Centre et Nord

\* Utilisés dans le cadre de l'étude statistique.



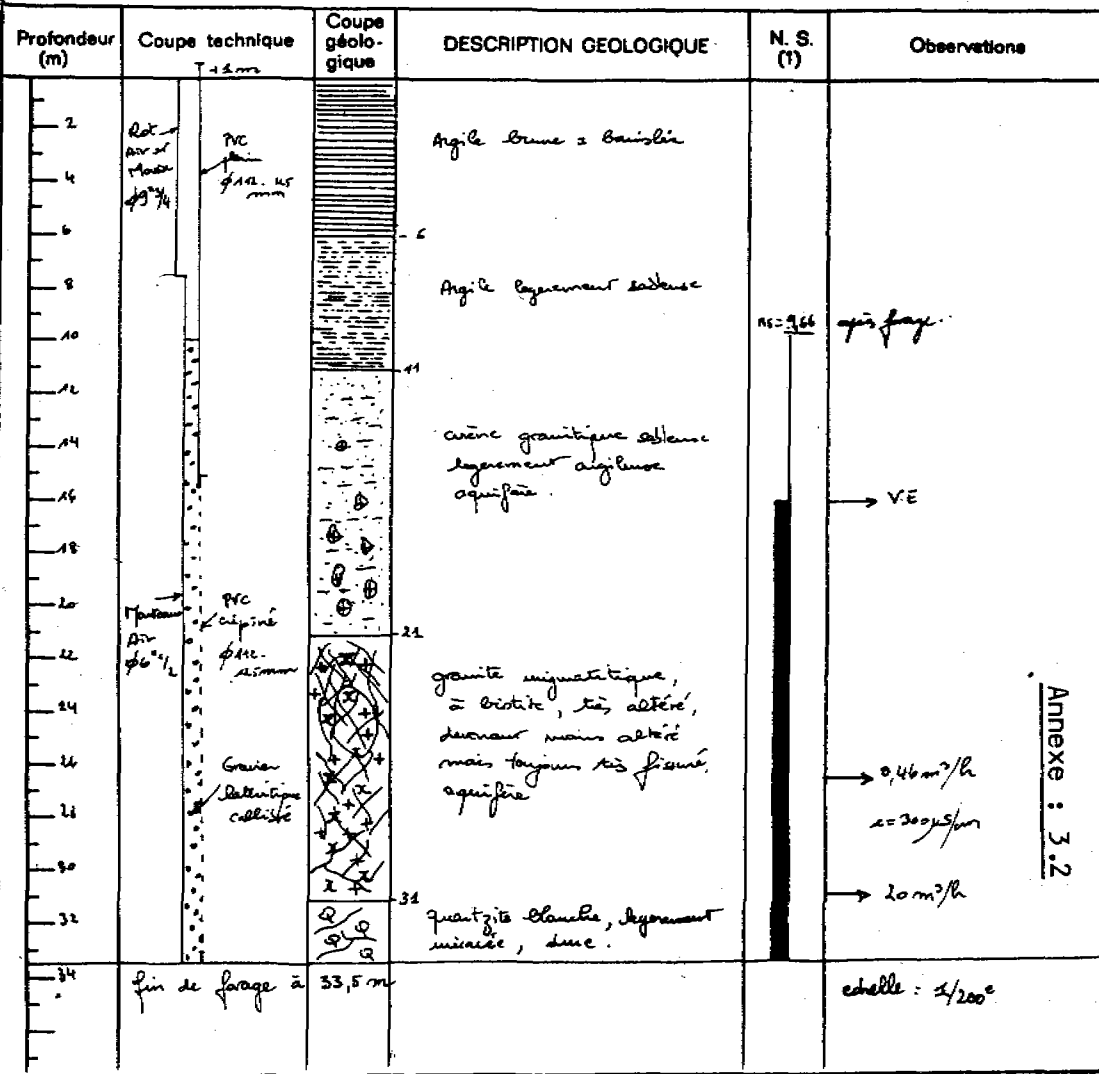
N° provisoire : 6  
Sous-Préfecture : Djibo  
Canton :  
Village : Baura  
Lieu dit :  
Photo aérienne n° 439

Longitude : x = 69.7  
Latitude : y = 1584.3  
Cote sol : z = 280m  
Carte 1/200.000 : Djibo  
Mission : 74 HVD

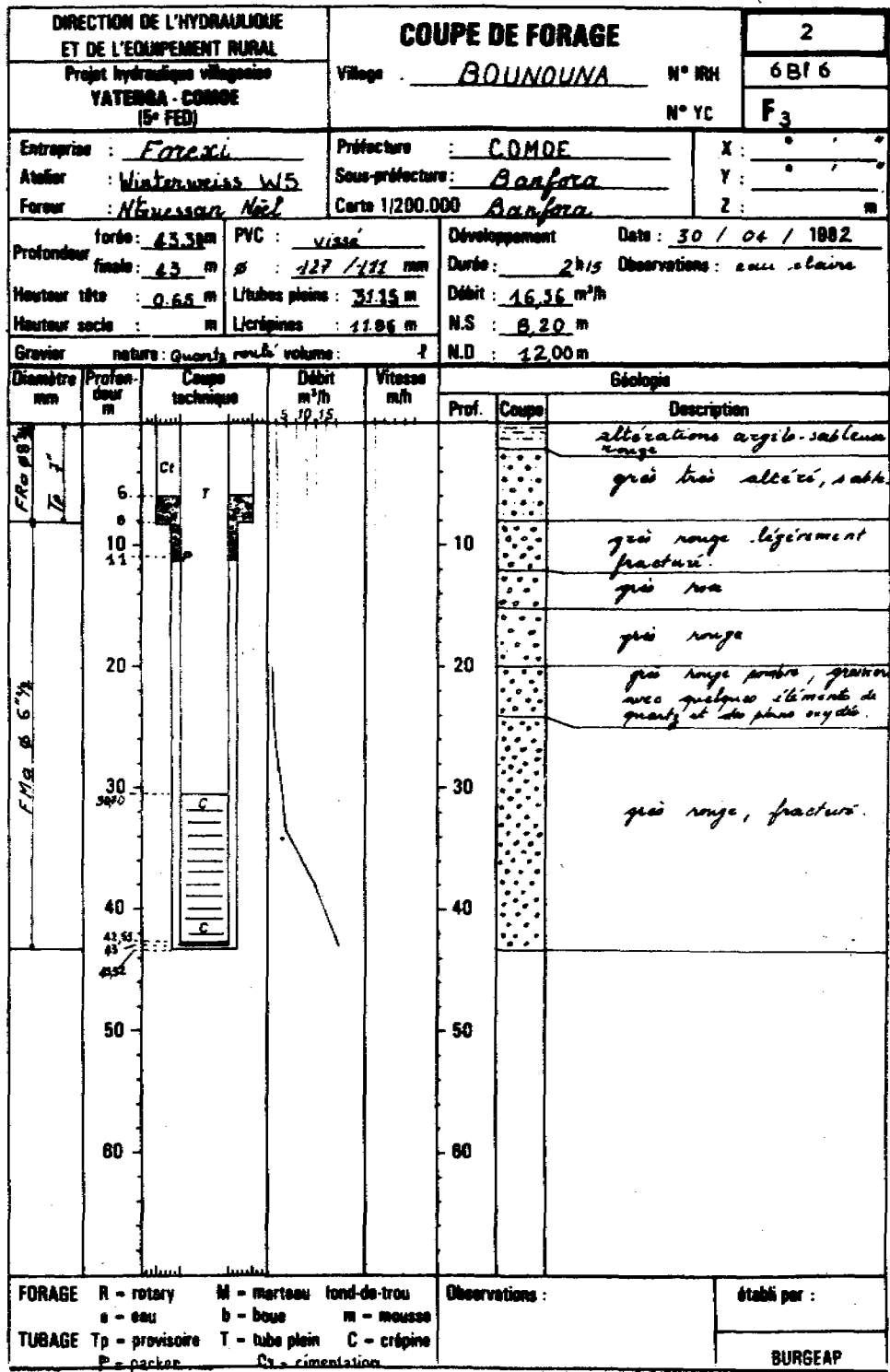
Financement : FAC  
Propriétaire :  
Maître d'œuvre : H.E.R. (BRGM)  
Entreprise : FOMINUS  
Type de machine : I.R. T460  
Sondeur : R. Meers

Date du début des travaux : 26-04-82  
Date de la fin des travaux :

Massif filtrant : nature : *gravier latéritique*  
granulométrie : 2-5mm  
Equipement : PVC φ 112 - 125m



Annexe : 3.2



**FORAGE : I 135**

Projet de Forage : **HELVETIAS - De N. à E.**

Village : **Féréteou**

Forage : **Sokoura F**

Date : **14 au 15 Décembre 1983**

Année : **1983**

Coordonnées : **x - 3° 25'**  
**y - 9° 42'**  
**z - 360 m**

Photo : **UMDP 38**  
**N° 58-59**

Travaux commencés le **14 81** achevés le **24 81** profondeur totale **77 m**

Preneur : **A VOLVER** Méthode de forage : **Marteau lourd de trou**

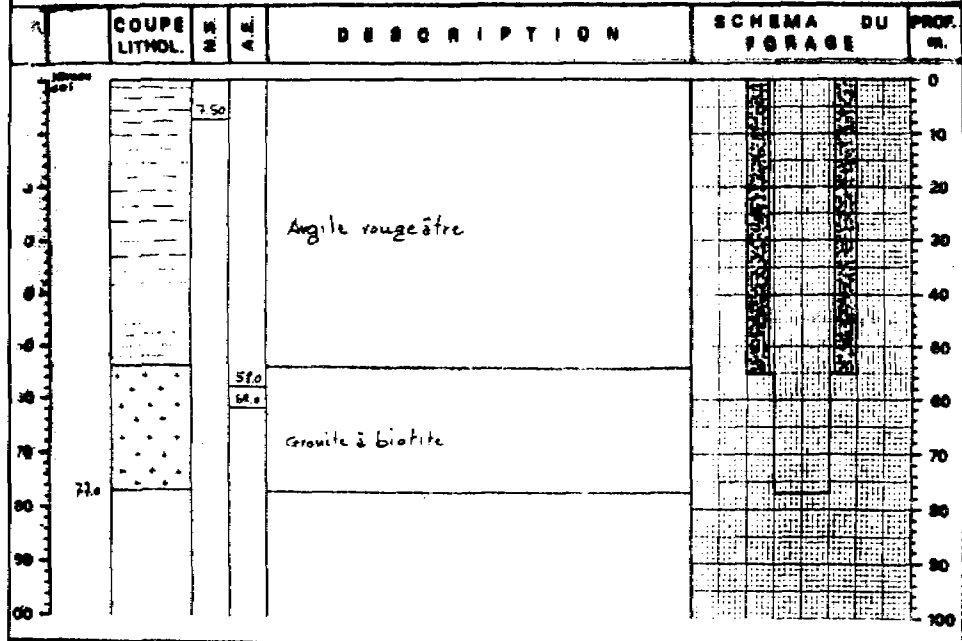
Age : **Plein de 0 à 55 m p 175/200**

Nombre de pompes installées : **2 ABI-Verones+ hybrides**

Fondateur d'installation : **30 et 33 m** Diamètre de la margelle : **2 x 1.5 m**

Arrivée d'eau : **58 et 62 m** N.S. (niveau statique) : **7.50 m**

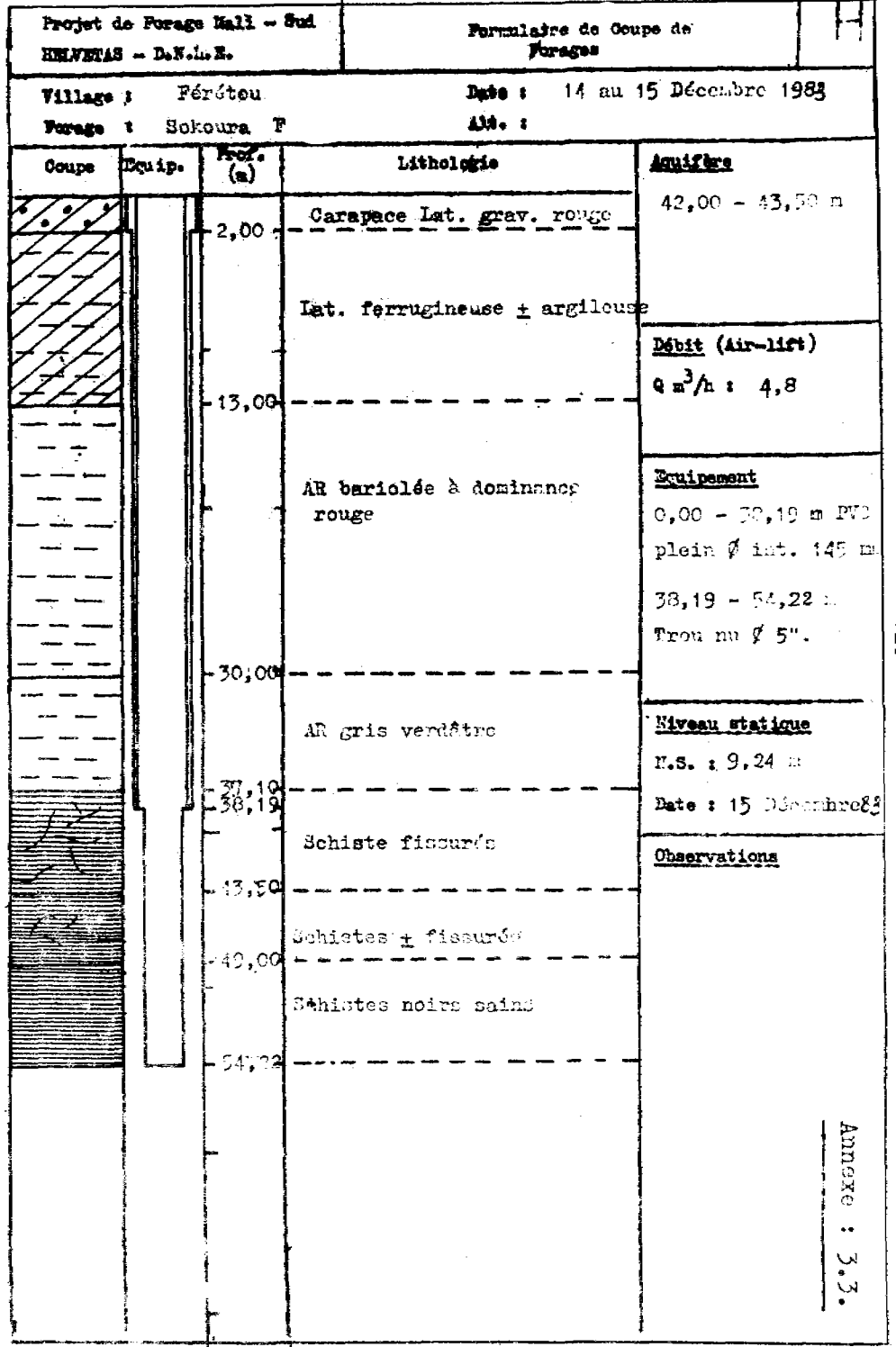
Palier de pompage	1° Palier	2° Palier	3° Palier
Q =	10 m <sup>3</sup> /h	20 m <sup>3</sup> /h	30 m <sup>3</sup> /h
As =	12.15 m	27.17 m	41.89 m



Notes : **0-55 m Tout venant** Forage : **0-55 m p 9 1/2**

**55-77 m Socle non équipé en P.V.C.** **55-77 m p 6 1/2**

Annexe : 3.4

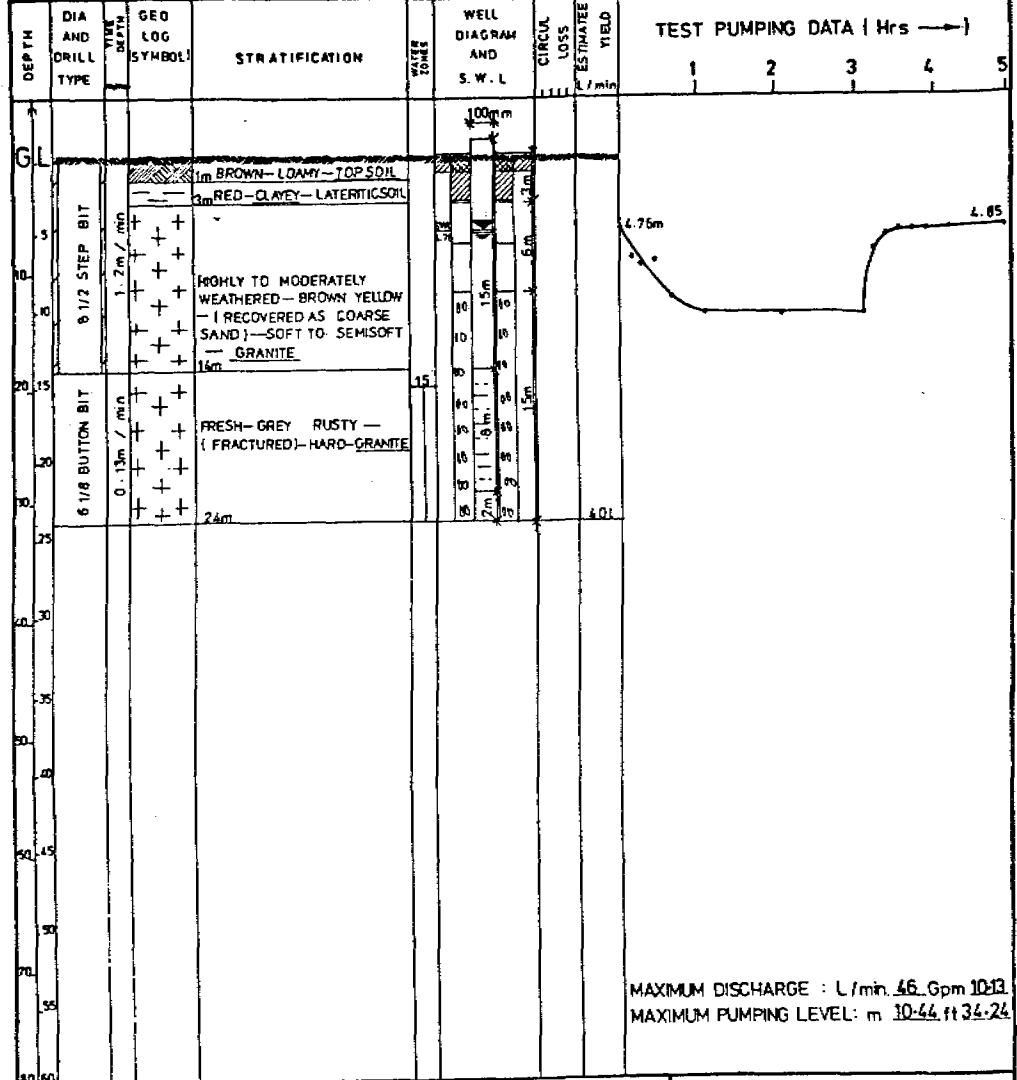


Annexe : 3.3.

INTERNATIONAL DRILLING CONSULTANTS **DC** COMPLETE WELL RECORD

PROJECT: 3000 WELL DRILLING PROGRAMME (1<sup>ST</sup> PHASE)  
 CLIENT: GHANA WATER AND SEWERAGE CORPORATION  
 DRILLING CONTRACTOR: PRAKLA SEISMOS Geomechanik

WELL No. 56 / F / 66 - 1  
 VILLAGE ODUMCHIRE  
 ALT/NAME ODUMYERE  
 REGION EASTERN  
 GRID 5 51N / 0 32 W



DATE DRILLING STARTED 5-4-82      HAND PUMP INSTALLATION: TYPE/MAKE INDIA MARK 11

DATE INSTALLATION COMP. 6-4-82      INSTALLED DEPTH 18.0m

TYPE OF DRILL RIG PRAKLA      NO. OF DROP PIPES 6 DIA 1 1/2"

DEPTH OF WELL 24m      LENGTH OF H PIPE DIA

DEVELOPED ON 14-4-82      DIA. OF PUMP ELEMENT AND CYLINDER 64 mm 2 1/2 inc

PUMPING TEST ON 15-4-82      DATE INSTALLED 21-6-82

CONCRETE PAD SIZE TYPE A      DATE ACCEPTED 28-8-82

2.20m x 1.20m ON 17-4-82

CHLORINATED ON 15-4-82

15-4-82 CHEMICAL ANALYSIS  
 PH 5.74 COLOUR APHA 0  
 TEMP 27.5 °C EC 400.0 U/mhos/cm  
 TOTAL HARDNESS (CaCo3) 58.0 mg/L  
 ALKALINITY (CaCo3) 60.0 mg/L  
 TOTAL IRON 0.50 mg/L  
 NITRATE (NO3-N) 11.5 mg/L  
 CHLORIDE -- mg/L Mn 0.80 mg/L

Annexe 3.6

Water Supply Project, C.I.D.A.,  
 Upper Region, Ghana

SHEET 440 (continued) DISTRICT GANU - SANEU

VILLAGE	WELL NUMBER	DATE COMPLETED	WELL DEPTH (m)	DISCHARGE (L/min)	MAX. PUMPING LEVEL (m)	TYPE	REMARKS	DATE	DP1	DP2
Bushorba	440E-1	14-12-74	UNSP	40.4 - 120.72	4	PVC	Decomposed Granite	5.37	8	24
Bushorba	440E-2	15-12-74	UNSP	40.2 - 110.8	4	PVC	Poorly Decomposed Grey Granite	5	8	20
Bushorba	440E-3	8-1-75	UNSP	40.5 - 105.8	4	PVC	Moderately Decomposed Hornblende Granodiorite	3.3	20	27
Bushorba	440E-4	17-12-75	UNSP	50-50	4	PVC	Moderately Decomposed Granite Gneiss	7.6	25	41
Bushorba	440E-5	18-12-74	UNSP	66.5-66.7	4	PVC	Partially Decomposed Granite Gneiss	5	8	18
Tabrags	440E-6	21-12-74	UNSP	37.1-87.3	4	PVC	Moderately Decomposed Granodiorite	8.5	20	20
Tabrags	440E-7	4-1-75	UNSP	53.6-74	4	PVC	Moderately Decomposed Granodiorite	6.5	20	20
Tabrags	440E-8	8-1-75	UNSP	30.5-30.8	4	PVC	Moderately and Partially Decomposed Granodiorite	8	8	17
Tabrags	440E-9	6-1-75	UNSP	58.5-76.7	4	PVC	Moderately Decomposed Granodiorite	5	24	40
Tampac	440E-10	6-1-75	UNSP	54.7-75	4	PVC	Moderately Decomposed Granite	3.8	24	20
Binalabogoo	440E-11	6-1-75	UNSP	67.1-87.3	4	PVC	Moderately Decomposed Granodiorite	7	23	28
Binalabogoo	440E-12	7-1-75	UNSP	51.2-72.3	4	PVC	Moderately Decomposed Biotite Granodiorite	3.1	20	41
Belchalego	440E-13	7-1-75	UNSP	78.3-99.3	4	PVC	Moderately Decomposed Granite	3.5	23	20

SHEET 440 (CONTINUED) DISTRICT GANU - SANEU

VILLAGE	WELL NUMBER	DATE COMPLETED	WELL DEPTH (m)	DISCHARGE (L/min)	MAX. PUMPING LEVEL (m)	TYPE	REMARKS	DATE	DP1	DP2
KILSABULIGA	440E-14	11-1-75	UNSP	67-87	4	PVC	PARTIALLY DECOMPOSED GRANITE	2.9	20	41
KILSABULIGA	440E-15	12-1-75	UNSP	68-86	4	PVC	Moderately Decomposed REGION GRANITE	2.8	27	27
KUSABIA	440E-16	14-1-75	UNSP	46-66	4	PVC	Moderately Decomposed Quartzite	4.6	11	10
KUSABIA	440E-17	15-1-75	UNSP	73-93	4	PVC	Moderately Decomposed Hornblende Granodiorite	3.76	20	20
KUSABIA	440E-18	15-1-75	UNSP	67-77	4	PVC	Moderately Decomposed RICH PULSTONE	3.3	19	27
KUSABIA-SUMI	440E-19	16-1-75	UNSP	73-93	4	PVC	PARTIALLY DECOMPOSED HORNBLende GRANODIORITE	2.9	24	46
MAWEDIGA	440E-20	11-2-75	UNSP	54-76	4	PVC	PARTIALLY DECOMPOSED SOLEHITE GNEISS	4.8	25	46
MAWEDIGA	440E-21	12-2-75	UNSP	61-71	4	PVC	Moderately Decomposed Hornblende Granodiorite	8.6	18	20
MOBE	440E-22	13-2-75	UNSP	84-84	4	PVC	Moderately Decomposed Hornblende Granodiorite	3.2	20	27
MABIRI	440E-23	28-3-76	UNSP	73-94	4	PVC	Moderately Decomposed NITRATE GRANITE	4	10	40
NADOMA	440E-24	17-10-74	UNSP	60-60	4	PVC	Moderately Decomposed Granite	5	19	16
SANBORA	440E-25	8-12-74	UNSP	37-57	4	PVC	Moderately Decomposed Granodiorite	5	5	17
TAPPAE NATHINA	440E-26	8-12-74	UNSP	60-80	4	PVC	Moderately Decomposed Granite	3	27	18

Annexe 3.5

ETUDE HYDROLOGIQUE DU DOUCLIER OUEST AFRICAINE

INVENTAIRE DES OUVRAGES

PAYS : Cote d'Ivoire

FORAGE	NO. CARTE	P	NS	EP	PNS	QE	RAB	OSP	PVE			RES	GEOL	
									1	2	3			
121	ZOUAN HOUNIEN	21	80.4		24.0	56.4								GRA
122	ZOUAN HOUNIEN	21	59.5	2.9	5.7	53.8	23.00	25.10	0.92	59				GDB
123	OCHOUPLEU	21	62.5	7.5	23.9	38.6				60			4348	SCH
124	GLEPLEU	21	45.0	5.7	27.4	17.6	1.60	10.30	0.16	32.0	36.0		10561	GRA
125	GOUANIOU	21	31.5	4.1	14.0	17.5	2.00	10.70	0.19	18.0	22.0		5517	AMP
126	GOULALEU	21	49.5	11.1	25.3	24.2				31.0	47.0		4607	GDB
127	GUIAMPLEU	21	51.5	6.0	28.1	23.4	3.30	12.60	0.26	48			5260	AMP
128	TOULEPLEU	21	43.5	3.5	16.5	27.0	6.00	9.00	0.67	18.0	21.0			GRA
129	TOULEPLEU	21	63.0	3.8	16.0	47.0	4.20	8.00	0.52	30.0	46.0			GNE
130	BLOLEOUIN	21	12.0	5.7						6.0				
131	BLOLEOUIN	21	70.5	2.0	21.0	49.5								GRA
132	BLOLEOUIN	21	79.8	3.4	10.8	69.0				9.0				GRA
133	BLOLEOUIN	21	12.0	3.1	7.0	5.0	3.80			9.0	12.0			GRA
134	BLOLEOUIN	21	45.0		12.5	32.5	12.00			27				GRA
135	BLOLEOUIN	21	25.9	3.2	7.3	18.6				12				GRA
136	BIANKOUMA	16	45.0	5.5	7.0	38.0	12.00	18.50	0.65	11.0	29.0			GRA
137	BIANKOUMA	16	72.0		12.0	60.0								GRA
138	BIANKOUMA SOEURS	16	58.5	16.1	22.5	36.0	6.60	11.60	0.57	56			2218	GRA
139	BLACOUIN	16	67.5	11.6	17.1	50.4	4.60	19.00	0.24	60			1275	GRA
140	BLACOUIN	16	19.0		10.0	9.0								GRA
141	PLACOUIN	16	27.0		1.0	26.0	25.00	16.60	1.51	10			4990	GRA
142	BOFESSO	16	83.6		5.8	77.8								GRA
143	BOFESSO	16	69.8		13.1	56.7								GRA
144	BOFESSO	16	60.3	3.9	7.6	52.7	2.20	28.10	0.08	50.0	53.0			GRA
145	DINGOUIN	16	31.5	6.1	15.0	16.5	3.20	18.00	0.18	26.0	29.0		5026	GRA
146	DINGOUIN	16	63.0	11.8	5.2	57.8	1.00	20.10	0.05	46.0	60.0		4268	GRA
147	GAN II	16	81.0		15.2	65.8								GRA
148	GAN I	16	67.5	1.4	14.0	53.5	0.80	9.00	0.09	19			2076	GRA
149	GAN I	16	81.0		10.6	70.4								GRA
150	GAN II	16	27.0	6.8	9.0	18.0	5.00	10.90	0.46	14.0	24.0		5334	GRA

P : PROFONDEUR TOTALE (M)  
 NS : NIVEAU STATIQUE (M)  
 EP : EPAISSEUR D'ALTERATION (M)  
 PNS : PENETRATION DANS LE SOCLE (M)  
 QE : DEBIT D'ESSAI (M\*\*3/H)

RAB : RABATTEMENT (M)  
 OSP : DEBIT SPECIFIQUE (M\*\*3/H/M)  
 PVE : PROFONDEUR DES VENUES D'EAU (M)  
 RES : RESISTIVITE (OHMCM)  
 GEOL : GEOLOGIE

EXEMPLE DE FICHE D'INVENTAIRE DES OUVRAGES  
 UTILISES POUR L'ANALYSE STATISTIQUE

## TERMES DE REFERENCE

Evaluation des données de base pour l'approvisionnement en eau des zones rurales en terrain cristallin du bouclier Ouest Africain

- Evaluation hydrogéologique des résultats de projets d'hydrauliques

### Préambule

Dans le cadre de la Décennie de l'eau, de nombreux programmes de puits et de forages ont été exécutés afin de répondre à l'urgence des besoins.

Une grande partie de ces programmes concerne le bouclier cristallin Ouest Africain.

Afin de mieux concevoir les programmes futurs, il convient d'entreprendre une collecte et une synthèse des données acquises dans le domaine de la connaissance des ressources en eau du bouclier Ouest Africain.

Le présent projet permettra d'établir des propositions concernant la mise en oeuvre des méthodes de prospection (photointerprétation, géophysique), les techniques d'exploitation des eaux souterraines, la recherche de solutions alternatives (captage de source, galeries drainantes).

### I. INTRODUCTION

#### II. CONDITIONS NATURELLES

##### II.1. Les conditions climatiques

Les paramètres climatiques (pluviométrie, température, évaporation, évapotranspiration) seront représentés sur des cartes schématiques en format 42 X 29,7 cm.

II.2. Les conditions géologiques. On distinguera les formations géologiques du bouclier Ouest Africain (granites anciens, granites tarditectoniques, schistes, dolérites, quartzites).

##### II.3. Les conditions morphologiques et tectoniques.

A partir des données de télédétection et de cartes topographiques, on délimitera les bassins versants des principales rivières, le réseau de fracturations et le modelé d'érosion.

### III. ANALYSE DES RESULTATS DE PROJETS

#### III.1. La méthode de collecte des données

- Elaboration d'une fiche synthétique du projet.
- Mise au point d'un tableau récapitulatif des données acquises par chaque forage dans le cadre du projet.

### III.2. Programmes exploitant les formations d'altération

- Les méthodes de prospection et d'implantation.
- Les méthodes d'exécution des ouvrages.
- Les caractéristiques hydrauliques du milieu altéré.  
Les données acquises seront représentées dans certains cas sous forme de cartes en faisant figurer : par secteurs géographiques :
  - . Les épaisseurs moyennes d'altération.
  - . Les profondeurs de niveau statique.
  - . Les profondeurs moyennes des ouvrages.
  - . La répartition des débits spécifiques.
  - . Les variations de niveau piézométrique.
- Les taux d'échecs et la cause des échecs.
- Les méthodes d'essais de débit.
- La qualité chimique des aquifères d'altération.
- Les coûts des ouvrages.

### III.3. Programmes exploitant le socle cristallin fracturé

- Les méthodes de prospection et d'implantation.
- Les paramètres intervenant dans la connaissance du milieu fracturé :
  - . Relation géologie / productivité.
  - . Relation épaisseur d'altération / productivité.
  - . Relation fracturation / productivité.
  - . Type de fracturation : longueur, orientation.
  - . Les profondeurs de forage.
  - . Les profondeurs de venue d'eau.
  - . Les débits. On expliquera les débits exceptionnels observés.
  - . Les profondeurs de pénétration dans le socle.
- Les variations de niveau piézométrique.
- Les taux d'échec et la nature des échecs (forage arrêté prématurément, exploitation d'une fracture secondaire sur interfluve).
- Les différentes méthodes d'essai de débit.
- La qualité chimique.
- Les coûts des ouvrages.

### III.4. La recherche de solutions alternatives

Dans des conditions géologiques et climatiques favorables, le puits ou le forage peuvent être remplacés par des solutions plus adaptées. On recensera des différentes solutions adaptées dans le cadre des programmes : captage de sources, réalisation de galeries drainantes, captage de nappe d'inferoflux par drains horizontaux. On effectuera une analyse critique de ces différents procédés de captage.

#### IV. CONCLUSIONS ET PROPOSITIONS

L'étude devrait aboutir à une meilleure connaissance sur les capacités hydrauliques des différents types d'aquifères du bouclier cristallin Ouest Africain, et permettre une meilleure conception des programmes d'hydraulique : profondeur d'ouvrages, débits, ... On définira les domaines d'application des différentes méthodes de prospection (télétection, géophysique, ...). En fonction des ouvrages types à réaliser, on définira les différentes méthodes d'exploitation.

Des solutions alternatives seront proposées dans des régions où l'exploitation des eaux souterraines ne peut être effectuée par puits et forages habituels.

On proposera des solutions destinées à protéger les ouvrages contre l'agressivité des eaux.