

UNIVERSITE D'ORLEANS

T H E S E

présentée à

U.E.R. SCIENCES FONDAMENTALES ET APPLIQUEES

par

Silminoaga SAWADOGO

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR DE 3^{ème} CYCLE

Spécialité : Matières premières minérales et énergétiques

Option : Hydrogéologie et télédétection

CONTRIBUTION DE LA TÉLÉDÉTECTION À L'ÉTUDE DE LA FRACTURATION.
APPLICATION À L'HYDROGÉOLOGIE DU SOCLE EN MILIEU
INTERTROPICAL (HAUTE-VOLTA)

Soutenue le 11 juin 1982 devant la Commission d'examen

MM. F. LELONG

Président

J. CHARVET

J.C. CRUETTE

M. GUY

A. MARTIN

J.Y. SCANVIC

}
Examineurs

A mon pēre,
Tinga SAWADOGO.

- AVANT-PROPOS -

Il m'est agréable, avant de présenter ce travail, de remercier tous les établissements et organismes qui ont contribué à sa réalisation. Je pense tout particulièrement au Centre Régional de Télédétection de Ouagadougou (C.R.T.O.) et au Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale (G.D.T.A.) pour l'aide matérielle et scientifique qu'ils m'ont apportée. Je pense également à certains membres associés du G.D.T.A. (B.R.G.M., C.N.E.S. et I.F.P.) ainsi qu'à l'Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (O.R.S.T.O.M.) qui m'ont ouvert chaleureusement l'accès à leurs laboratoires.

Je voudrais leur exprimer ainsi qu'à leur personnel respectif ma profonde gratitude.

Il m'est également agréable de remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire par leur collaboration, leur compétence, leur soutien et leurs conseils.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur F. LELONG, Professeur à l'Université d'Orléans, qui a bien voulu m'accueillir dans son laboratoire d'hydrogéologie. Malgré ses occupations multiples, Monsieur LELONG a su toujours se montrer disponible à mon égard et m'a toujours accueilli très cordialement. A Monsieur le Professeur LELONG, qui n'a pas ménagé son temps pour suivre ce travail et qui me fait l'honneur de présider le jury, je tiens à exprimer ma reconnaissance sincère et mes vifs remerciements.

J'adresse mes remerciements sincères à Monsieur J.C. PION, Maître de Recherches à l'O.R.S.T.O.M. et expert-géologue au C.R.T.O., pour avoir accepté de suivre ce travail sur le terrain. Son expérience du terrain dans mon pays, son amitié franche m'ont été d'un appui précieux. Je lui exprime ma sincère reconnaissance pour sa totale disponibilité à tout moment.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur J. CHARVET, Professeur à l'Université d'Orléans, avec qui j'ai eu des discussions

fructueuses en analyse structurale et qui a accepté d'être membre du jury.

Je tiens à remercier très sincèrement Monsieur J.Y. SCANVIC, Ingénieur photogéologue au BRGM, Chef-Adjoint de la division photogéologie et télédétection, qui a accepté de suivre ce travail et dont j'ai pu bénéficier de l'expérience en photogéologie et en télédétection. Que Monsieur SCANVIC, qui a par ailleurs accepté d'être membre du jury, trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

A Monsieur M. GUY, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs (E.N.S.P.M.) et responsable de l'enseignement de la télédétection au sein du G.D.T.A., qui a accepté de participer au jury, j'exprime ma sincère reconnaissance.

Je remercie vivement Monsieur J.C. CRUETTE, Maître de Recherches à l'ORSTOM et responsable du Bureau de Télédétection de cet organisme de recherches, pour m'avoir permis de suivre un stage de traitement numérique des images dans son bureau et pour avoir accepté de faire partie du jury.

Que Monsieur A. MARTIN, Ingénieur-géologue au BRGM et Chef de Département à l'agence d'études de géologie appliquée à l'étranger du BRGM, trouve ici ma profonde reconnaissance pour avoir accepté d'être membre du jury.

Ma vive reconnaissance va à Monsieur Ph. DUTARTRE et à Monsieur Y. GROS, ingénieurs géologues structuralistes au BRGM et spécialistes de la fracturation du socle, qui m'ont apporté leur soutien dans l'interprétation de mes résultats.

J'adresse aussi mes remerciements aux responsables des projets du C.R.T.O. : Messieurs J. MALACAMP (Aménagement), R.HAGEN (Foresterie), R. SERRIERE (Formation) et surtout J. SORENSON (Labo-photo) qui s'est toujours montré disponible pour le tirage des images.

A mes collègues, D. ASSOUMA, B. DUMAZET, M. KOUDA, dont j'ai apprécié les relations amicales, j'adresse ma sincère reconnaissance.

Je m'en voudrais d'oublier Mesdames FERRAND et HUE, infatigables et dévouées secrétaires du Laboratoire de Géologie Appliquée, qui n'ont pas ménagé leur temps pour permettre la frappe dans les délais de ce mémoire. Je leur exprime mes sincères remerciements.

Que ma femme B. Irène et ma fille G. Clémence-Olivia trouvent ici le réconfort nécessaire qui leur a manqué durant mon séjour en France. Je les remercie sincèrement pour leurs encouragements sans cesse renouvelés.

Que tous ceux, dont j'ai omis de citer les noms et qui ont apporté leur concours de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements.

S O M M A I R E

	Page
<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>Première Partie - GENERALITES -</u>	4
<u>Chapitre I - LES CARACTERISTIQUES DU MILIEU</u>	5
I - Cadre physique	5
1.1. Relief	5
1.2. Climat	6
1.3. Végétation	9
II - Aperçu géologique	10
2.1. Les formations du socle	11
2.2. Les formations superficielles	14
2.3. Essai de chronologie	18
2.4. Tectonique	19
III - Géomorphologie	20
3.1. L'altération	20
3.2. Les unités géomorphologiques	25
3.3. L'eau souterraine dans les altérites	35
IV - Conclusion sur le chapitre I	40
<u>Chapitre II - INTRODUCTION A L'ETUDE DE LA FRACTURATION</u>	41
I - Notion de fracture	41
1.1. Introduction	41
1.2. Différentes sortes de fractures	41
1.3. Définition	42
II - Origine des fractures	42
2.1. Les fractures primaires du granite	43
2.2. Polygones de fracturation dans les granites	45
2.3. Les fractures liées au socle métamorphique	52

III - Fracturation et circulation d'eau souterraine	54
3.1. Conditions d'existence des eaux souterraines	54
3.2. Ouvertures des fractures	56
3.3. Caractéristiques du milieu fissuré	59
3.4. Structure de l'aquifère fissuré	61
IV - Conclusion sur le chapitre II	63
<u>Conclusions sur la partie I</u>	64
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">Deuxième Partie - LES METHODES D'ETUDE -</div>	65
<u>Chapitre I - LA TELEDETECTION</u>	66
I - Définitions	66
II - Bases physiques de la télédétection	67
2.1. Rappels	67
2.2. Le rayonnement électromagnétique	68
2.3. Les ondes utilisées en télédétection	69
2.4. L'émission du rayonnement électromagnétique	69
2.5. L'énergie mesurée	75
III - Acquisition des données de télédétection	75
3.1. Les photographies aériennes	75
3.2. Les images radiométriques	76
IV - Landsat et l'étude des ressources terrestres	77
4.1. Les caractéristiques des satellites Landsat	77
4.2. Les capteurs Landsat	77
4.3. Les données Landsat	80
V - Etude de l'image satellite	81
5.1. Introduction	81
5.2. Choix de l'image	82
5.3. Interprétation des documents bruts	85
VI - Les images traitées	97
6.1. Introduction	97
6.2. Traitement des données	97
6.3. Interprétation des images traitées	101
VII - Conclusion sur le chapitre I	101

<u>Chapitre II - LA PHOTOGRAPHIE AERIENNE</u>	102
I - Introduction à la photogéologie	102
1.1. Facteurs d'interprétation	102
1.2. Apport des photographies aériennes	103
II - Exploitation des photographies aériennes	104
2.1. Données acquises	104
2.2. Interprétation	105
2.3. Implantation du forage	110
III - Conclusion sur le chapitre II	112
<u>Chapitre III - LA GEOPHYSIQUE</u>	113
I - Introduction	113
II - Méthodes géophysiques - Principes	114
2.1. Les méthodes électriques	114
2.2. Les méthodes sismiques	119
2.3. Les autres méthodes géophysiques	121
III - Application des méthodes géophysiques en Afrique Occidentale	122
3.1. Les méthodes électriques	123
3.2. Les autres méthodes géophysiques	127
IV - Autres techniques employées en prospection électrique	128
4.1. Sondages pluridirectionnels	128
4.2. Traîné en double ligne	128
4.3. Remarques	128
V - Conclusion sur le chapitre III	129
<u>Conclusions sur la partie 2</u>	130
Troisième Partie - LES RESULTATS	131
<u>Chapitre I - PRESENTATION DES RESULTATS</u>	132
I - Introduction	132
1.1. Objectifs de l'étude	132
1.2. Remarques sur la méthode	132

II - Zone de Tensobentenga	133
2.1. Cadre géographique et climatique	133
2.2. Cadre géologique et hydrogéologique	135
2.3. Analyse qualitative de la fracturation	137
2.4. Contrôle de terrain	140
2.5. Conclusion	147
III - Zone de Mogtedo	148
3.1. Justification du choix	148
3.2. Cadre géographique et climatique	149
3.3. Cadre géologique et hydrogéologique	150
3.4. Analyse de la fracturation	151
3.5. Etude de la petite fracturation à l'affleurement	169
3.6. Intérêt hydrogéologique des familles fracturales	179
3.7. Conclusion	180
IV - Zone de Pilimpikou	181
4.1. Introduction	181
4.2. Présentation de la zone	181
4.3. Analyse qualitative de la fracturation	184
4.4. Données géophysiques	194
4.5. Conclusion	199
V - Conclusion sur le chapitre I	199
<u>Chapitre II - DISCUSSION DES RESULTATS</u>	201
I - Introduction	201
II - Résumé des résultats	202
III - Généralisation	205
IV - Conclusion sur le chapitre II	208
<u>Conclusions sur la partie 3</u>	209
<u>CONCLUSIONS GENERALES</u>	210
<u>ANNEXE</u>	212
<u>LISTE DES FIGURES</u>	225
<u>LISTE DES TABLEAUX</u>	229
<u>LISTE DES PHOTOS</u>	230
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	231

I N T R O D U C T I O N

Très longtemps, les formations cristallines du socle, granites et roches métamorphiques, ont été considérées par les "chercheurs" d'eau comme des formations stériles. Les quantités d'eau qu'elles contiennent sont généralement faibles et se composent essentiellement de l'eau de constitution liée aux réseaux cristallins.

Mais depuis quelques années l'expérience acquise dans l'hydrogéologie de ces formations montre qu'elles peuvent, dans certaines conditions, renfermer des quantités exploitables d'eau "libre" capable de s'écouler gravitairement.

En effet, ces roches compactes et imperméables à l'état sain présentent une porosité et une certaine perméabilité secondaire à la faveur de la fracturation qui fragmente les massifs et de l'altération qui décompose la tranche superficielle. En simplifiant, on peut décrire les aquifères ainsi formés comme des couches poreuses, d'épaisseur irrégulière mais continue à forte capacité d'emménagement (tranche altérée) surmontant un réseau discontinu de fissures transmissif capable de drainer la couche poreuse (tranche fracturée et fissurée).

L'étude de ce réseau peut se faire directement au sol à l'affleurement mais dans les zones altérées couvertes de formations superficielles où les affleurements sont rares et sans relations réelles avec les structures originelles, différentes méthodes comme la photographie aérienne ou la géophysique permettent de les repérer. Avec l'avènement des techniques nouvelles de Télédétection, l'hydrogéologue dispose maintenant de nouveaux outils parmi lesquels il peut sélectionner le multispectral visible spatial. En effet, le caractère synoptique des images de satellites offre une vue beaucoup plus globale des ensembles structuraux, donc facilite le repérage des grands accidents tectoniques.

Le présent travail rentre dans ce cadre. Son objectif est la mise au point d'une méthodologie de l'utilisation de la télédétection pour la recherche de l'eau souterraine en région de socle sous climat tropical sec.

Cette recherche revêt deux aspects :

- un aspect immédiat : localiser les réseaux de fractures collectant les circulations d'eau souterraine de façon à obtenir dans les forages des débits assez importants (supérieurs à $1 \text{ m}^3/\text{h}$),
- un aspect général plus lointain : comprendre le fonctionnement des systèmes aquifères existant en terrain cristallin (géométrie, conditions d'alimentation, vitesses de transit, vulnérabilité aux pollutions, etc...).

Ce second aspect n'est pas inclus dans notre programme qui concerne essentiellement la recherche des drains.

Le choix des terrains d'application de cette étude en Haute-Volta se justifie par :

- l'implantation à Ouagadougou du Centre Régional de Télédétection,
- la situation en latitude du pays qui lui confère le type de climat tropical sec,
- la nécessité de multiplier les implantations de puits et forages pour répondre aux besoins en eau en toute saison et dans des conditions aussi économiques que possible (optimisation de la rentabilité des forages par une diminution du coût des études).

Ce travail comporte trois parties.

La première partie regroupe les généralités. Après un exposé des caractéristiques du milieu : géographie, géologie, géomorphologie, cette partie présente une étude bibliographique sur la fracturation.

Une seconde partie est consacrée à la présentation des méthodes indirectes d'étude de la fracturation (télédétection, photographies aériennes, géophysique). Un accent particulier a été mis sur la télédétection, acquisition des données, traitements informatiques, interprétation. La photographie aérienne et la géophysique, méthodes beaucoup plus usuelles, ne font l'objet que d'un développement sommaire.

Dans la troisième partie, les résultats obtenus et une discussion critique de ces derniers sont développés.

Cette étude s'insère dans le cadre des activités du Centre Régional de Télédétection de Ouagadougou. Elle a été menée dans le cadre du service "Conseil et Assistance" du C.R.T.O. et autant que possible en collaboration avec le programme d'hydraulique villageoise développé en Haute-Volta.

Les résultats obtenus restent partiels mais permettent de fonder de sérieux espoirs sur l'utilisation de la télédétection en géologie appliquée et en particulier en hydrogéologie.

PREMIERE PARTIE

G E N E R A L I T E S

Chapitre I - LES CARACTERISTIQUES DU MILIEU

I - CADRE PHYSIQUE

L'objectif n'est pas d'étudier de manière détaillée les caractéristiques physiques de la Haute-Volta. Cependant pour mieux comprendre ce travail, nous nous devons de signaler quelques traits du relief, du climat et de la géologie.

1.1. Relief

Pays continental, le modelé de la Haute-Volta est caractérisé par son uniformité et sa planéité. L'altitude moyenne ne dépasse guère 500 mètres.

C'est donc un pays très plat. Cependant on peut distinguer deux grands traits topographiques : une plaine centrale qu'encadrent deux plateaux latéraux.

a) La plaine centrale

Légèrement inclinée, la plaine centrale présente un paysage monotone formé d'une succession de croupes molles et de vallons. L'altitude moyenne est d'environ 300 mètres. Cette monotonie se rompt de temps en temps par la présence de chaos de boules (ou inselbergs) ou par la présence de buttes cuirassées.

La monotonie du paysage est également tranchée par des chaînes de collines dont la dénivellation par rapport à la plaine centrale n'excède pas 150 à 200 mètres.

Cette plaine et ces collines sont issues de l'érosion ancienne, de l'altération profonde puis d'une dissection du pédiment sur des formations granitiques et métamorphiques. Entourant cette plaine, apparaissent des régions tabulaires appelées plateaux.

b) Les plateaux

Ils s'élèvent au-dessus de la plaine centrale par l'intermédiaire d'un rebord auquel on donne généralement le nom de falaise.

Les plateaux se trouvent situés autour de la plaine centrale et apparaissent surtout :

- à l'Ouest : les grès de Bobo-Dioulasso
- au Nord : les grès du système nigérien
- au Sud-Est: les grès du système voltaïen.

1.2. Climat

De par sa situation en latitude, la Haute-Volta est dotée d'un climat tropical sec à deux saisons bien contrastées :

- une saison humide, plus ou moins longue (2 à 4 mois dans l'année), caractérisée par l'accroissement des précipitations, des températures diurnes en baisse et des vents dominants du Sud à Sud-Ouest. C'est la période des cultures.
- une saison sèche, très longue au Nord du pays (9 à 10 mois), qui se caractérise par une absence totale de précipitations, des températures diurnes fortes et des vents dominants de direction Nord-Est-Sud-Ouest (type alizés).

a) Mouvements de l'air

Deux masses d'air sont à l'origine des saisons en Haute-Volta :

- un flux d'air sec du secteur Nord-Est à Est en provenance de l'anticyclone saharien. Le vent qui l'accompagne est l'harmatan, frais et desséchant. Il est généralement chargé de poussière.
- un flux d'air humide du Sud-Ouest à Sud (la mousson) venant de l'anticyclone austral ou anticyclone de Sainte-Hélène.

La zone de rencontre de ces deux masses d'air s'appelle le Front intertropical (F.I.T.) (fig. 1).

Aux mois de mars-avril, le FIT commence sa remontée vers le Nord. La mousson guinéenne, à l'origine des pluies, envahit progressivement le pays.

En octobre, le FIT amorce sa descente vers le Sud, la mousson disparaît au profit des vents du secteur Nord-Est.

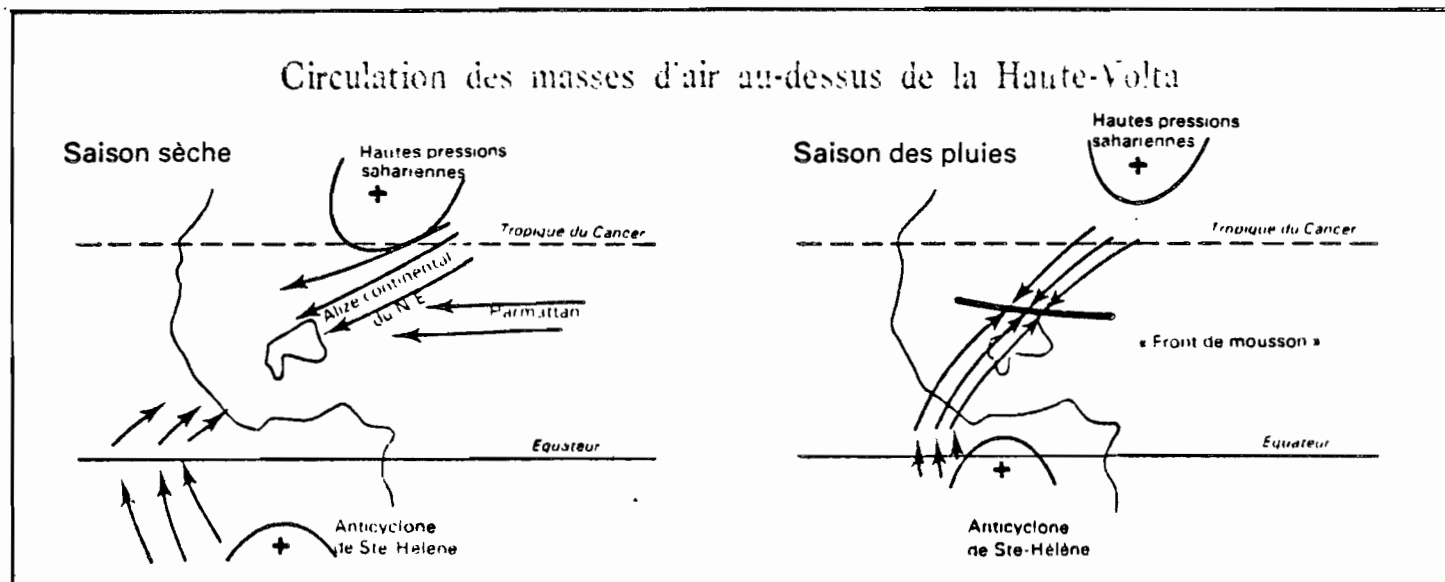


Fig. 1 - Mouvements de l'air.
(Extrait d'Atlas, J.A. 1975)

b) Zones climatiques

Ce schéma simplifié très général de l'évolution des masses d'air permet de comprendre le caractère du climat à deux saisons contrastées. Cependant il doit être nuancé. L'uniformité de ce mécanisme n'exclut pas une certaine variété et on peut distinguer en Haute-Volta trois zones climatiques (fig. 2).

- * La zone sud-soudanésienne - Dans cette zone les précipitations moyennes annuelles sont supérieures à 1000 mm et s'étalent sur environ 5 mois de l'année.
- * La zone nord-soudanésienne, comprise entre les isohyètes 1000 mm et 650 mm. Les précipitations diminuent vers le Nord et la saison pluvieuse est plus courte.
- * La zone sahélienne se situe au Nord de l'isohyète 650 mm. La saison humide est de très courte durée, 2,5 à 3 mois dans l'année. C'est la zone la plus touchée par la sécheresse, phénomène aggravé par une intense évaporation.

Bien que la Haute-Volta présente trois zones climatiques assez distinctes, les précipitations ont partout une inégale répartition annuelle : 80 % des pluies tombent durant les mois de Juin, Juillet, Août.

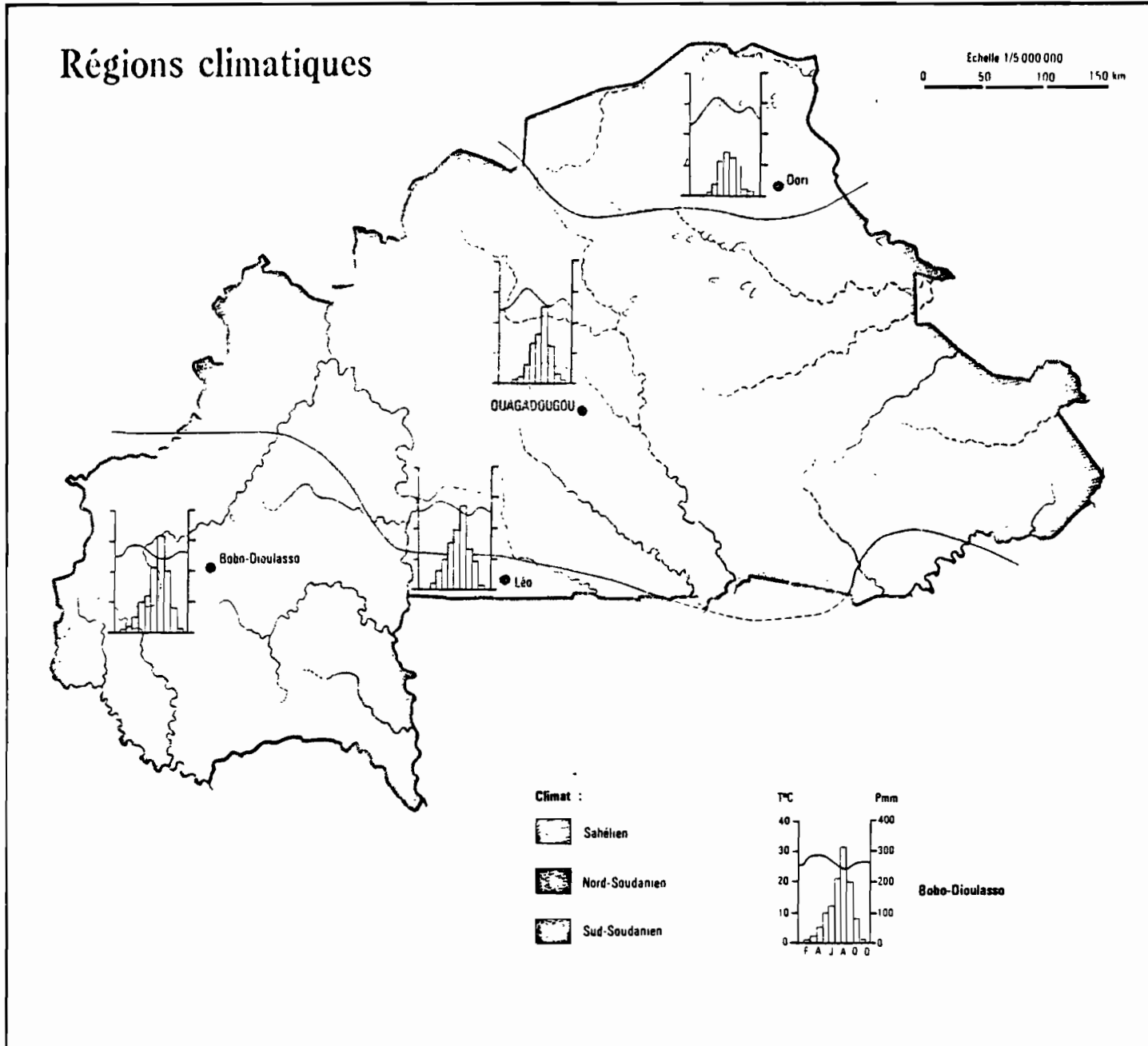


Fig. 2 - Zones climatiques de la Haute-Volta.
(Extrait d'ATLAS J.A., 1975).

D'autre part, la répartition des pluies est très localisée géographiquement sous forme d'orages dispersés.

c) Autres facteurs climatiques

* Les températures - Les températures présentent des variations annuelles importantes :

- une période fraîche s'étalant de Novembre à Février et de Juillet à Août. C'est la période des températures les plus basses. Elles descendent rarement au-dessous de 8°C.

- une période très chaude de Février à Juin et de Septembre-Octobre. Les températures peuvent atteindre 45° en Avril.

* L'évapotranspiration - L'évapotranspiration annuelle (ETP) présente de fortes variations. On peut donner quelques valeurs à titre indicatif, pour chaque zone climatique :

- zone sud-soudanésienne : 1920 à 2350 mm annuels

- zone nord-soudanésienne : 2070 à 2870 mm annuels

- zone sahélienne : jusqu'à 3360 mm annuels.

* L'insolation - L'insolation annuelle atteint la moyenne de 2600 heures pour la zone sud-soudanésienne, 3000 heures pour la zone centrale et 3500 heures pour la zone sahélienne.

L'humidité atmosphérique diminue au cours de l'année. De 80 % en Octobre dans le Sud, elle tombe à 20 % en Février-Mars.

1.3. Végétation

En télédétection les formations végétales présentent un grand intérêt. En effet, la radiance spectrale enregistrée par le capteur est très influencée par la végétation lorsque le taux de couverture dépasse 30 %.

En Haute-Volta, la répartition des formations végétales en bandes sensiblement parallèles aux isohyètes atteste de l'influence prépondérante du climat.

On peut observer quelques variations de cette répartition du Sud vers le Nord du pays :

- une diminution de la taille et de la densité des arbres du Sud vers le Nord,
- une augmentation de la strate herbacée vers le Nord,
- l'apparition ou la disparition de quelques espèces végétales spécifiques à une zone climatique.

La formation végétale dominante est la savane. Mais celle-ci offre de grandes variétés dans l'ensemble de la Haute-Volta :

- à l'extrême Sud, on se trouve à la limite de la forêt claire. C'est une savane arborée presque continue. On y rencontre les forêts-galeries le long des cours d'eau.
- vers le centre, la population des ligneux diminue. C'est la savane clair-semée caractéristique du domaine nord-soudanéen.
- enfin au Nord, c'est le domaine sahélien caractérisé par une disparition des arbres au profit des buissons. C'est le domaine de la steppe.

C'est ainsi que l'on peut diviser le territoire de la Haute-Volta en trois grands domaines végétatifs sensiblement confondus aux zones climatiques.

Cette répartition ne tient compte que des conditions climatiques sur la végétation naturelle. On doit noter que cette végétation se trouve en constante dégradation par l'action de l'homme (cultures, élevage, feux de brousse), entraînant un "dénudement" de la surface. Cette mise à nu de la surface influence l'alimentation des nappes par accroissement du ruissellement et une diminution de l'infiltration (ROOSE E., 1980 ; ROOSE, LELONG et COLOMBANI, 1982).

L'influence de l'homme est surtout sensible au centre, zone fortement peuplée et au Nord où l'élevage est l'activité principale.

II - APERCU GEOLOGIQUE

Les données géologiques précises sur les pays de l'Afrique Occidentale sont rares, ce qui est le cas de la Haute-Volta. Souvent ces données sont fragmentaires, non centralisées, ce qui a pour conséquence une dispersion de l'information.

Toutefois, les études réalisées en Haute-Volta (DUCELLIER, 1963 ; MARCELLIN, 1971 ; BESSOLES, 1977) montrent une géologie monotone peu variée.

Deux grands ensembles géologiques se rencontrent en Haute-Volta :

- les formations du socle cristallin,
- les formations sédimentaires de couverture.

Pour les besoins de l'étude, nous ne parlerons ici que des formations du socle cristallin.

2.1. Les formations du socle

Inclus dans la dorsale du Man du "craton ouest-africain" (fig. 3), le socle en Haute-Volta se compose d'une part de formations granitiques et migmatitiques et d'autre part de formations volcano-sédimentaires généralement schisteuses appelées aussi Birrimien.

a) Les granites

Les granites constituent l'essentiel du socle de la HAUTE-VOLTA. On classe ces granites soit :

- en fonction de leur appartenance à une unité géologique bien définie,
- en fonction de leur âge et de leur composition,
- en fonction de leur reprise par une orogénie précambrienne.

Nous pouvons distinguer alors :

* Les granites et migmatites antébirrimiens (fig. 4 et 5)

Les granites et migmatites indifférenciés recouvrent de grandes superficies. Ils se présentent sous forme de ride au Sud-Ouest et se transforment en un ensemble continu au centre et au Nord.

Les granites et migmatites indifférenciés constituent le socle antébirrimien sur lequel vont s'exercer les mouvements orogéniques birrimiens.

* Les granites du Birrimien

Ces granites couvrent aussi de grandes surfaces notamment au Nord du pays (fig. 4, 5). Ces roches englobent :

- des granites calco-alkalins,
- des granodiorites,
- des diorites quartzites,
- des syénites.

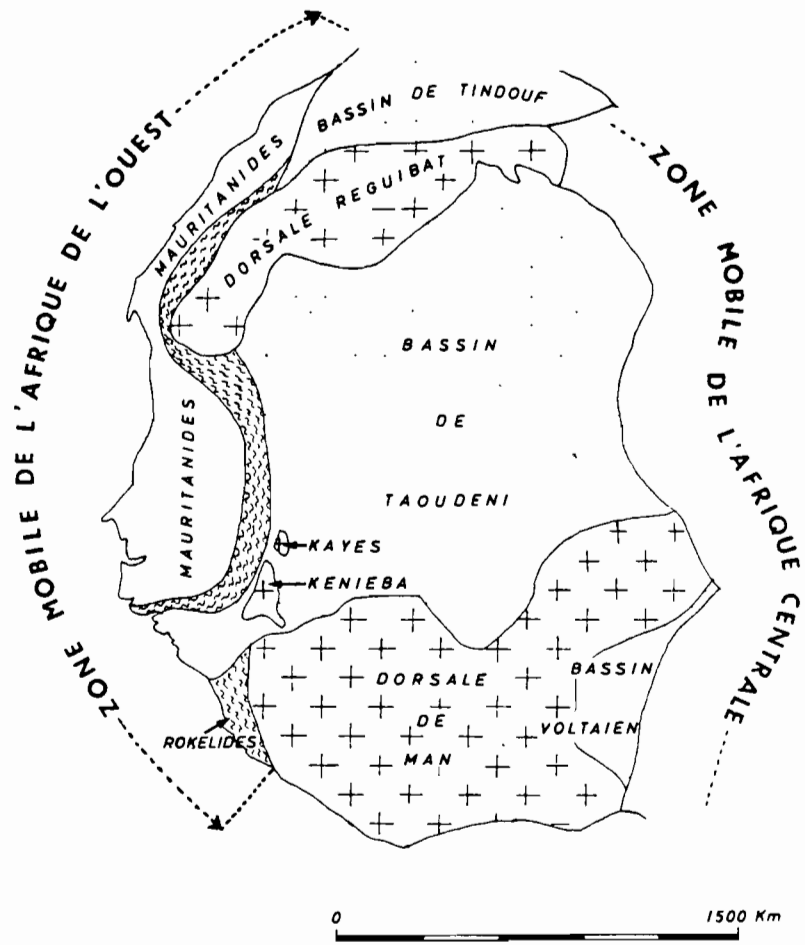


Fig. 3 - Le Craton ouest-africain.
(Extrait de BESSOLES, 1977)

On distingue deux types de granites d'après leur mode de gisement :

- granites concordants syntectoniques, c'est le "type Baoulé",
- granites discordants post-tectoniques ou "type Bondoukou".

Nous devons à BODIN L. (1951) un essai de classification plus détaillée de ces granites (tableau 1).

<i>Caractères</i>	<i>Type baoulé</i>	<i>Type Bondoukou</i>
Gisement..... Auréole..... Migmatites..... Composition du massif..	concordant développée intra-batholitiques hétérogène composite hétérogène endomorphe homogène (exceptionnellement)	discordant très réduite absentes homogène
Structure de la roche..... Texture de la roche..... Déformation de la roche.	grenue équigranulaire ou porphyroïde massive ou orientée cataclase avec ou sans recristallisation	grenue plagiomorphique massive traces
Type pétrographique dominant.....	granite monzonitique	granodiorite granite akéritique
Tendance chimique d'après la teneur en alcalins.....	potassico-sodique	sodique

Tableau 1 - Caractères des types de granites calco-alcalins (d'après BODIN L., 1951).

b) Les roches métamorphiques volcano-sédimentaires

Cet ensemble est généralement appelé Birimien. Le terme Birimien a été utilisé pour la première fois par KITSON (1928) pour désigner les formations de la Vallée de la Birrim au Ghana. Plus tard, ce terme va être repris et étendu à d'autres formations semblables en Afrique Occidentale.

Ces roches se sont déposées dans les fosses le long des sillons intracratoniques (fig. 4, 5). Leur classification diffère selon les géologues qui les ont étudiées et elle dépend de l'évolution du faciès des unités.

Ainsi BESSOLES (1977) y distingue deux types principaux :

- type I ou type de fosses profondes, se rencontre surtout au Sud et à l'Ouest du pays. Il se caractérise par un dépôt de roches volcaniques dont des faciès de type flyschoides.
- type II ou type de bassins peu profonds. Ces bassins se caractérisent par une absence de roches vertes et de formations flyschoides. Ces formations se sont déposées en bordure de bassins continentaux.

Ces grandes unités se subdivisent en sous-unités marquées surtout par des variations de faciès. DUCELLIER (1963) distingue dans le centre de la Haute-Volta les groupes suivants :

- le groupe de RIZIAM, correspond à des schistes et quartzites redressés. Ce groupe affleure abondamment dans la moitié centre et nord du pays.
- le groupe de DACOLA, se rencontre aussi dans le centre du pays. Il est formé de "roches vertes" surtout schistes amphiboliques. Les minéraux caractéristiques de ce groupe sont l'amphibole ou l'épidote, minéraux rares voire inexistants dans le groupe précédent.

Vers le Sud, MARCELLIN J. (1971) retrouve dans ce Birrimien des roches à tendance volcanique : métavolcanites et métasédiments. Ce sont des laves basiques ou neutres souvent à pillow-lavas.

Deux exemples de fosses intracratoniques sont donnés dans les figures 4 et 5. La première représente des sillons Nord-Sud étroits dans la partie méridionale de la Haute-Volta. La seconde figure représente l'arc birrimien de Kaya dans le centre du pays.

2.2. Les formations superficielles

La rareté des affleurements et la présence d'un manteau d'altération demeurent un obstacle à l'étude approfondie du socle cristallin de Haute-Volta.

Le manteau d'altération parfois très épais est souvent protégé par un ensemble cuirassé. Ces cuirasses latéritiques se rencontrent partout en Haute-Volta et sont plus épaisses et mieux conservées sur les roches volcano-sédimentaires. On rencontre très souvent des collines birrimiennes à sommet tabulaire cuirassé (photo 1).

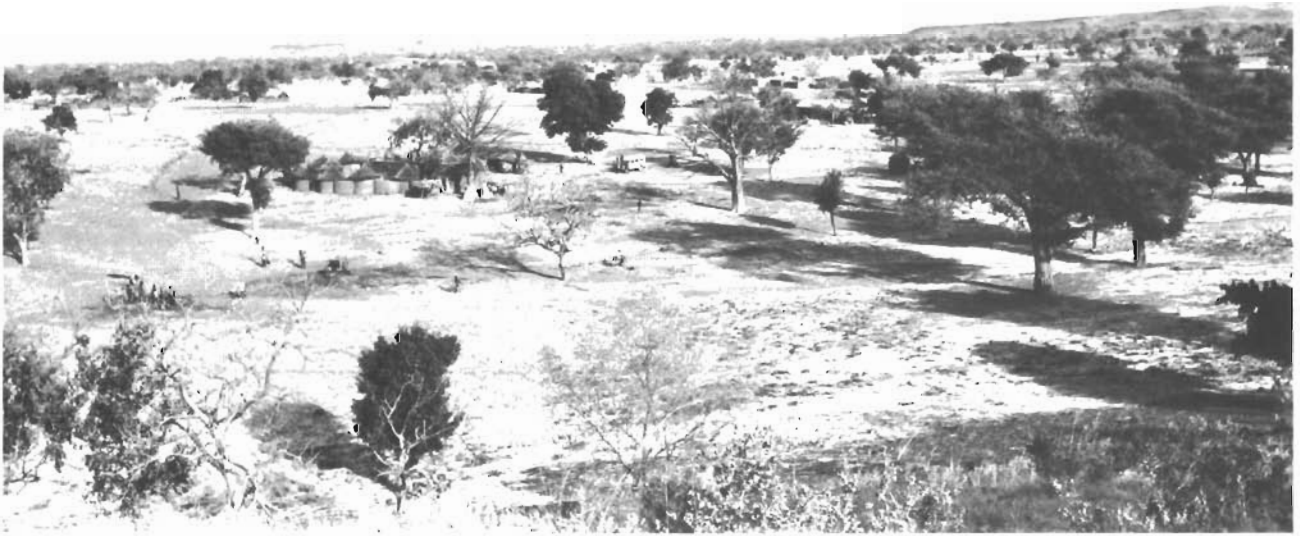


Photo 1 - (SAWADOGO)

Vue à l'horizon de zones birrimiennes schisteuses (Haute-Volta).

. On remarque les collines cuirassées à sommet plan légèrement incliné vers la droite.

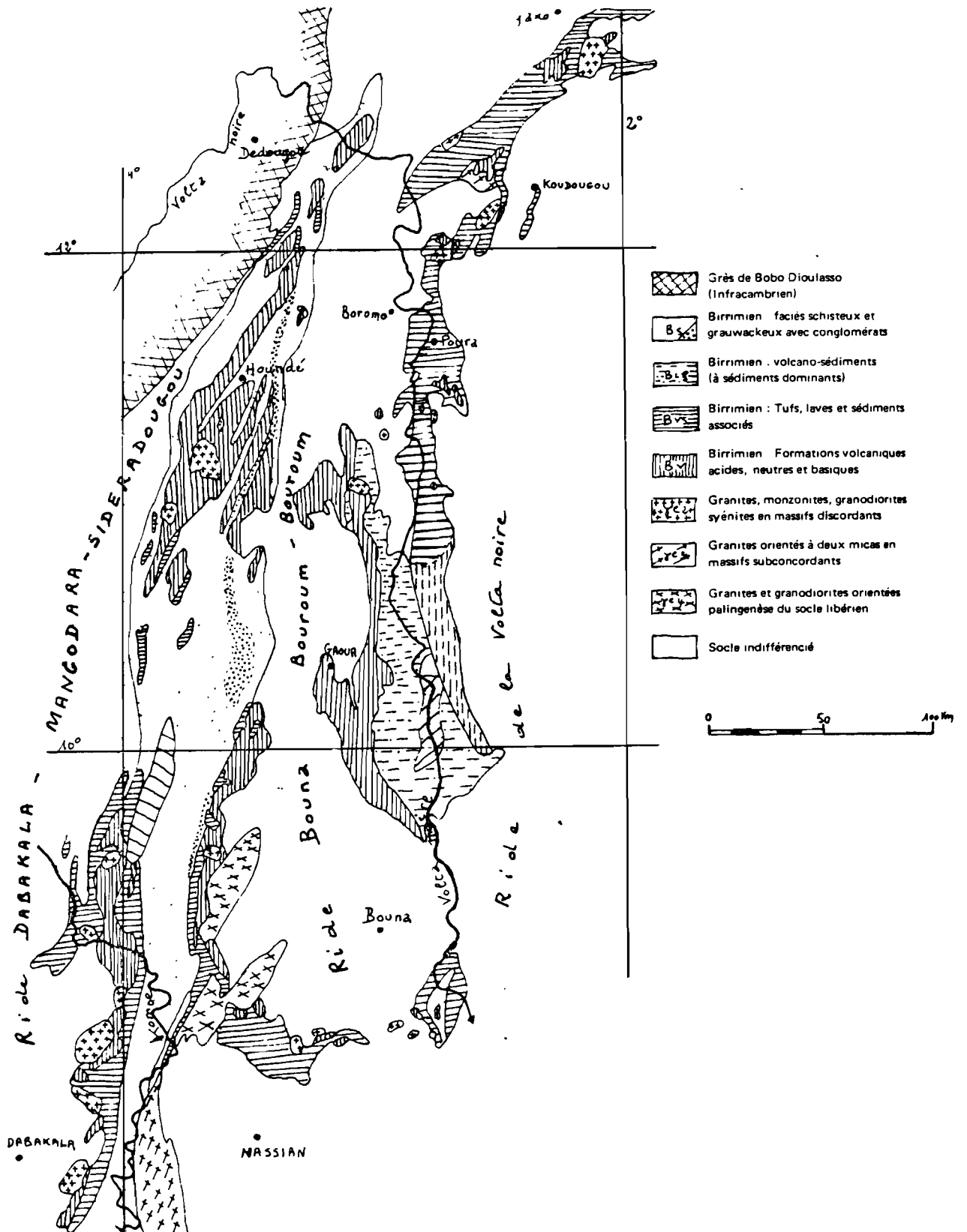


Fig. 4 - Les unités birrimiennes de type I (Gaoua-Poura, Hounde-Yako, Haute Comoe).
(D'après BLANCHOT et al., 1972).

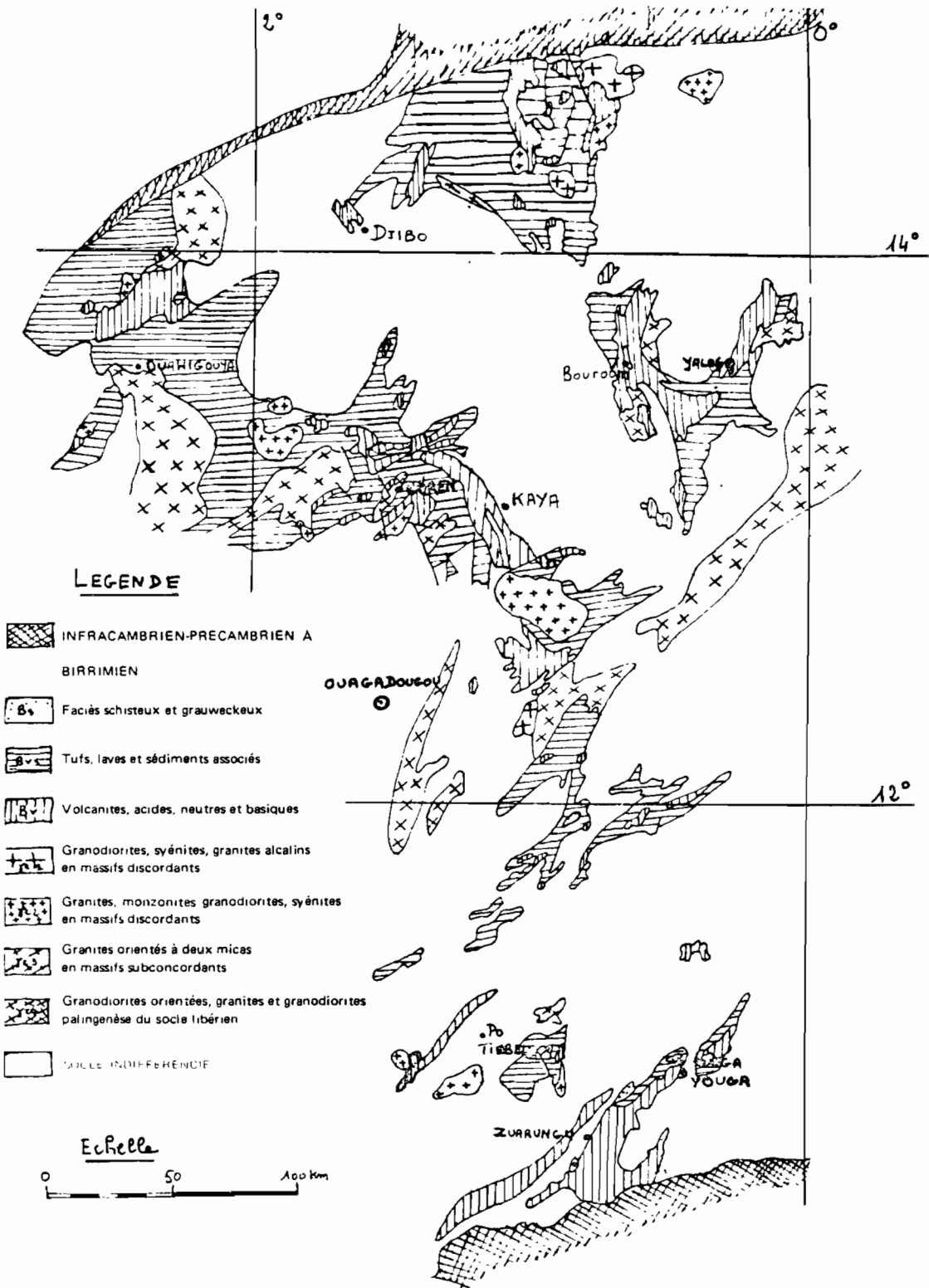


Fig. 5 - Unités birrimiennes de type II (Djibo, Kaya-Goren, Bouroum-Yalogo, Youga-Tiebele-Po).

(D'après BLANCHOT A. et al., 1972)

Les affleurements se présentent donc avec une grande rareté. Ce sont, pour les granites et migmatites, des boules dispersées, des dômes, des chaos. Pour les roches volcano-sédimentaires, ce sont des collines arrondies ou à sommet tabulaire et des arêtes de schistes et quartzites plus aigus.

Il existe également dans le Nord de la Haute-Volta des recouvrements sableux sous forme de cordons dunaires qui viennent masquer le socle cristallin.

2.3. Essai de chronologie

Pour établir un essai de chronologie, on peut s'appuyer sur les travaux de MARCELLIN J. (1971). Il ressort du tableau suivant que le socle voltaïque est très ancien, la mise en place des formations se terminant dès le Primaire (tableau 2).

ETAGE	OROGENIE	AGE M.A.	FORMATION
PRIMAIRE		250	<i>gabros-dolérites tholéitiques permians</i> (glaciation éocambrienne - tillites)
PRECAMBRIEN SUPERIEUR		600-500	contrecoup de l'orogénie panafricaine
		?	
PRECAMBRIEN MOYEN		1000	dépôt des sédiments du Précambrien supérieur
		21500-1400	<i>dyles doléritiques</i>
		1900	granites alcalins - syénites
		2000-1850	granite discordant type "Bondoukou"
	Système éburnéen	2100	plissement majeur métamorphisme du Birrimien granites concordants type "Baoulés"
	Birrimien supérieur		<i>sédimentation schistes birrimiens</i> et grès tarkwaïens
----- discordance -----			
PRECAMBRIEN INFÉRIEUR		2170	magmatisme grano-dioritique
		2300	<i>tufs et tephres</i> effusions volcaniques acides <i>roches sédimentaires basiques et neutres</i> effusions volcaniques basiques
		22500-2400	formation des sillons birrimiens
		±2700	métamorphisme et orogénie libérienne
	Système antébirrimien	23300-3000	sédimentation arkoses et marnes <i>magmatisme basique et acide</i>

Tableau 2 - Essai de chronologie du Précambrien de Haute-Volta méridionale (d'après MARCELLIN, 1971).

Depuis le Primaire, la Haute-Volta demeure dans une période de calme. Cela explique la monotonie du relief dans son ensemble.

2.4. Tectonique

La tectonique revêt dans notre étude une grande importance. En effet, c'est elle qui conditionne la mise en place des différentes fractures.

Il existe très peu de travaux dans ce domaine. On ne peut réellement étudier la tectonique sans se replacer dans le contexte du craton ouest-africain.

Nous citerons :

- les travaux de TAGINI, B. (1971), qui tentent de donner un schéma d'évolution du "géosynclinal éburnéen" et mettent en évidence les orientations des bassins birrimiens de Haute-Volta.
- les travaux et observations faites en Haute-Volta par HOTTIN G. et OUEDRAOGO D.F. (1975), TAHO A. (1976) et ENGALENC (1978).

Le socle voltaïque a connu deux cycles orogéniques qui ont mis en place des structures complexes et variées.

a) L'orogénie libérienne

L'orogénie libérienne a produit le bâti antébirrimien dont la tectonique est difficile à préciser. HOTTIN G. et OUEDRAOGO O.F. (1975) arrivent tout au plus à déceler localement dans les formations antébirrimiennes diversifiées de la moitié orientale du pays (Oudalan, Diapaga, Fada, N'Gourma), la persistance de grandes structures indépendantes de la répartition et des plissements des unités du système birrimien. Des structures synclinales, en général très complexes, sont signalées dans les gneiss de ces régions par ces auteurs.

Sur le reste du pays, les observations de structures relatives à l'Antébirrimien restent très rares.

b) L'orogénie éburnéenne

L'orogénie éburnéenne est mieux connue et a entraîné la formation des ensembles birrimiens.

Le cycle éburnéen débute par une phase de fracturation du bâti antébirrimien, formant ainsi des sillons dans lesquels va se déposer un ensemble volcano-sédimentaire puissant. Puis une phase tectonique précoce, suivie de la mise en place d'intrusions granodioritiques et tonalitiques datées de 2170 MA, clôture le cycle volcano-sédimentaire.

Le paroxysme de la tectonique éburnéenne se situe autour de 2000 MA et se manifeste par une phase tectono-métamorphique majeure associée et suivie par d'importantes manifestations magmatiques, syn, tardi à post-tectoniques, qui affectent l'ensemble des sillons.

Le cycle éburnéen se clôture par des phases de blastomylomitisation et de déformation ultimes généralisées. Cette phase va individualiser des zones fortement plissées dans les grands sillons surtout à l'Ouest du pays et l'apparition de nombreuses failles et rejeux de failles antérieures caractéristiques en particulier à l'Est du pays.

C'est une phase qui va jouer un rôle important dans la fracturation du socle.

Notons qu'en Haute-Volta, les structures birrimiennes ont une direction correspondant aux directions des sillons :

- une direction NNE-SSW dans l'Ouest du pays, qui subira une légère rotation au centre et à l'Est en une direction NE-SW.
- une direction N-S dans le Sud-Ouest (Gaoua-Poura).

Il faut remarquer que ce schéma structural est très simplifié et ne permet pas une reconstitution tectonique très poussée. Notons que l'importance de la fracturation du socle est signalée par de nombreux hydrogéologues.

L'étude en télédétection va nous aider à fournir une esquisse tectonique plus détaillée du socle cristallin de Haute-Volta.

III - GEOMORPHOLOGIE

3.1. L'altération

a) Introduction

La morphologie actuelle des paysages en Afrique intertropicale est le résultat de l'action combinée de l'altération et de l'érosion. Le premier est responsable du "pourrissement" des roches (action vive en cli-

mat chaud et humide : cas du climat équatorial) tandis que le second entraîne un démantèlement et une exportation des produits d'altération.

La prospection d'eau souterraine en région de socle : roches normalement imperméables, "aquifuges" comme en Haute-Volta, passe par la compréhension des phénomènes rendant parfois les roches "capacitives" et "transmissives". Ces phénomènes se résument dans ce cas à l'altération et à la fracturation.

Nous développerons ici l'altération et ses conséquences, un paragraphe étant consacré à la fracturation plus loin.

L'altération joue un rôle important dans les recherches d'eau car elle commence là où l'eau peut pénétrer dans la roche c'est-à-dire là où elle est le plus sensible. Elle peut être donc liée aux causes d'origine mécanique : c'est ainsi qu'une fracture sera le berceau de l'altération. Les cartes de fracturation et la géométrie des fractures seront ainsi à la base de la recherche des zones d'altération.

b) Les phénomènes d'altération

Les phénomènes d'altération sont particulièrement développés dans la zone intertropicale et ce, d'autant plus que les conditions ont été durablement chaudes et humides.

De nombreux travaux ont décrit les caractères morphologiques, minéralogiques et géochimiques des altérations (ou altérites) et des sols qui en dérivent (LENEUF, 1959 ; LELONG, 1969 ; TARDY, 1969 ; LEVEQUE, 1975 ; PION, 1979; LEPRUN, 1979).

* Le profil d'altération

De ces travaux, nous ne retiendrons que les aspects qui présentent un intérêt hydrogéologique.

Les processus d'altération du socle granito-gnéissique en climat tropical sont classiques. Ils donnent naissance à une couche d'altération dont le profil type est fourni par la coupe (fig. 6).

On peut distinguer grosso modo, de bas en haut sur cette coupe, trois niveaux principaux :

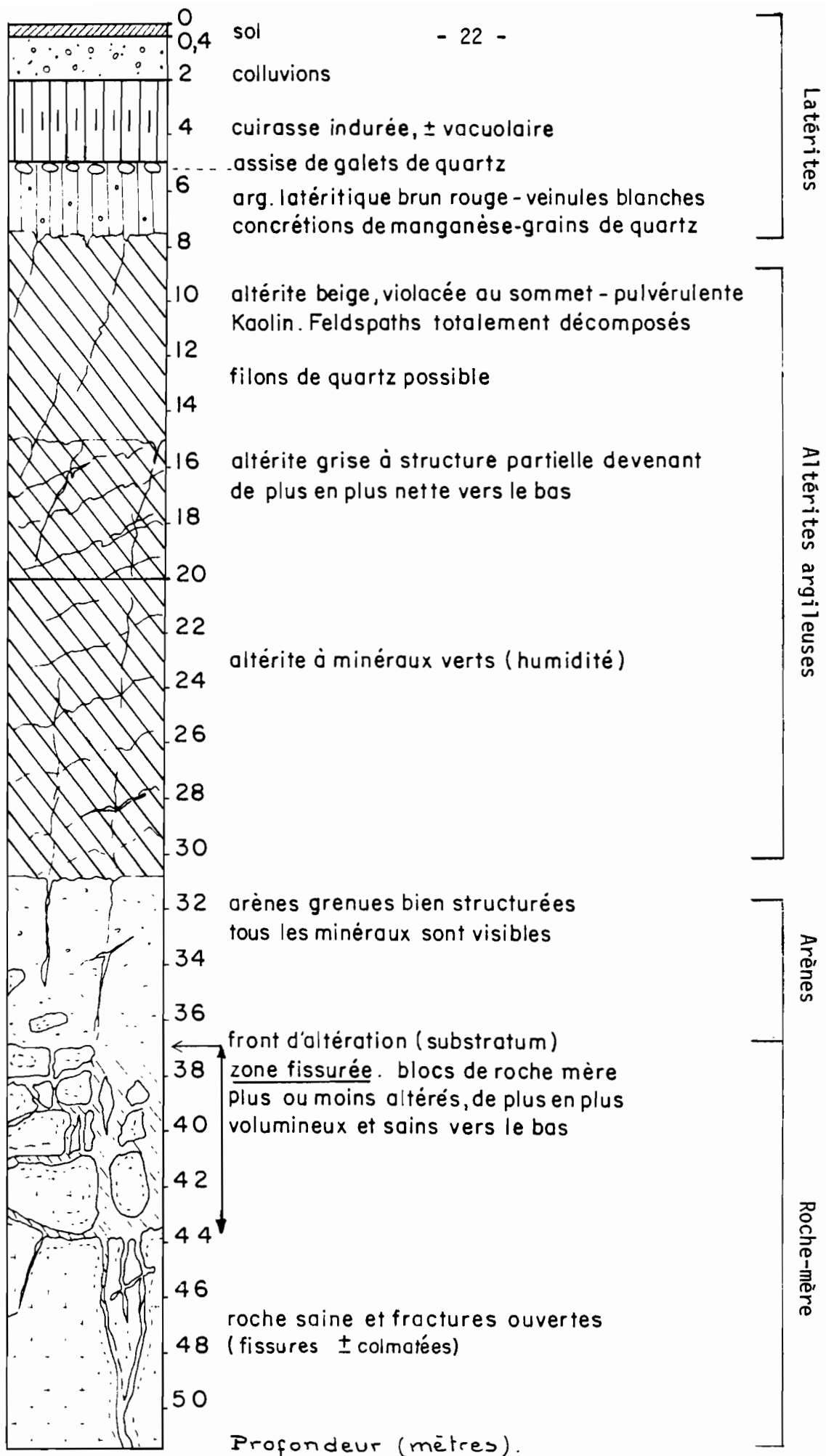


Fig. 6 - Profil type de l'altération (d'après ENGALENC, 1978).

- La roche-mère - C'est la zone de départ de l'altération. Elle comprend à la base la roche-mère surmontée d'une zone de fissures où l'eau peut pénétrer et circuler. Le long de ces fissures débute l'altération qui isole des fragments de roche au sein d'une gangue altérée grossière. Cette zone de fissures est elle-même surmontée par un niveau plus ou moins sableux où on peut retrouver encore la structure de la roche-mère. Les auteurs s'accordent à donner à ce niveau la dénomination "d'arènes". Cette tranche roche fissurée plus arènes, par sa constitution minéralogique et granulométrique, est susceptible de stocker de l'eau en quantité exploitable.
- Les altérites argileuses - Situées sous le niveau hydrostatique, ce niveau reçoit différentes appellations suivant les auteurs. LELONG (1969) le désigne sous le nom d' "arènes plastiques" tandis que LEPRUN (1979) l'appelle "lithomarge à texture conservée". Cet horizon comprend à la base un niveau argileux plus ou moins sableux où la structure de la roche-mère est encore conservée. Les minéraux primaires stables sont visibles et conservent leur structure originelle. Au-dessus, l'altération minérale s'achève et la structure de la roche-mère disparaît. Les argiles se transforment progressivement en kaolinite. L'épaisseur de ce niveau peut être considérable mais à cause de la quantité d'argiles qu'il renferme, ce niveau constitue un mauvais aquifère. Il peut jouer un rôle important dans l'alimentation des niveaux inférieurs.
- la zone latéritique se divise en niveau d'argiles latéritiques à la base plus ou moins épaisse. Ces argiles latéritiques, de couleur généralement mauve ou rouge à ocre, se développent au détriment des altérites argileuses. Parcourues par des canalicules, elles sont très riches en concentrations ferro-alumineuses. Ce niveau d'argiles latéritiques est couronné souvent par un horizon induré d'aspect pseudo conglo-mératique : la cuirasse latéritique. Celle-ci, d'aspect vacuolaire, est formée de nodules ferriques (1 à quelques centimètres de diamètre) englobés dans une pâte parfois bauxitique. La cuirasse, épaisse en région birrimienne, coiffe de nombreuses buttes qui dominent le paysage.

La zone latéritique peut constituer un bon aquifère, en particulier la cuirasse lorsqu'elle est ennoyée.

* La variabilité du profil d'altération

Le profil type de l'altération présente de nombreuses perturbations selon la nature de la roche-mère, le type de climat, selon la fracturation, etc... En particulier, son épaisseur est extrêmement variable. Nulle à l'aplomb des dômes rocheux, elle peut atteindre une dizaine à quelques dizaines de mètres. En moyenne elle atteint une quinzaine de mètres sur formations granito-gneissiques. Sur les formations birrimiennes, l'altération est généralement plus épaisse que sur les granites. Celle-ci peut atteindre plusieurs dizaines de mètres, en particulier sur les formations schisteuses.

Le facteur climatique joue également un rôle prépondérant dans le développement du phénomène d'altération. Le processus classique de l'altération est étroitement lié à la pluviosité (LELONG et al., 1977 ; TARDY, 1969 ; PION, 1979).

En climat tropical, l'altération se développe par hydrolyse de la roche. Les conditions climatiques actuelles de la Haute-Volta ne favorisent pas les phénomènes d'hydrolyse car on observe une nette tendance à l'aridité. La couverture d'altération observée actuellement est l'héritage d'épisodes beaucoup plus humides qui ont dû exister au Quaternaire.

Actuellement en Haute-Volta, on assiste surtout à un décapage des altérites. L'érosion joue un rôle déterminant surtout sur des zones où la végétation est dégradée ; cette dégradation pouvant être liée au climat de plus en plus aride ou simplement à l'action de l'homme. ROOSE et BIROT (1970) mesurent sur parcelle expérimentale des taux d'érosion élevés de l'ordre de 5 à 15 tonnes/km²/an sous végétation naturelle à GONSE et jusqu'à 270 tonnes/km²/an sur sol nu, soit une vitesse d'ablation de 0,27 mm/an.

L'érosion mécanique est donc très importante. Elle diminue lorsque la densité de la végétation augmente et aussi lorsque les pentes diminuent.

* La zone fracturée

Dans la zone fracturée, l'altération progresse plus vite par suite de la pénétration de l'eau. A l'intersection des plans de plusieurs fractures, les circulations d'eau sont plus actives et l'altération progresse sur une plus grande surface.

Au niveau de la maille de fracturation, l'altération favorisée par les fractures, progresse à la périphérie de la maille. Elle diminue progressivement vers le centre de la maille.

La progression de l'altération au niveau des fractures est donc plus rapide comme le montre la figure 7.

c) Modèle du relief

L'interaction des phénomènes d'altération et d'érosion est responsable de la répartition des altérites dans le paysage où alternent, selon les conditions lithologiques et topographiques, des zones à altérites et sols épais et des zones à substratum rocheux pratiquement affleurant (cf. photos 2 et 3).

Les coupes schématiques ci-jointes (fig. 8 et 9) illustrent des exemples assez fréquents de la répartition des altérations et des formations de surface dans le paysage.

De ces schémas, on peut tirer les indications suivantes :

- Les altérites sont souvent plus épaisses sous les interfluves et notamment les parties sommitales du relief, surtout en région granitique. En zone birrimienne, l'épaisseur maximale des altérations se rencontre sous les zones cuirassées.
- Les poches d'altérations qui semblent généralement situées à l'aplomb des zones fracturées sont distribuées de façon assez indépendante de la topographie.

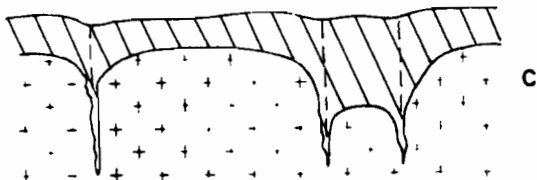
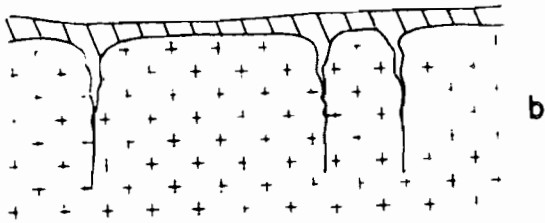
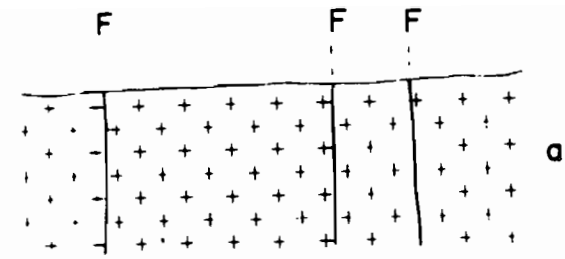
L'absence de correspondance entre la topographie du sol et la topographie du "front d'altération" a été confirmée par d'assez nombreuses mesures géophysiques (LELONG, 1963 ; HUOT, 1966).

3.2. Les unités géomorphologiques

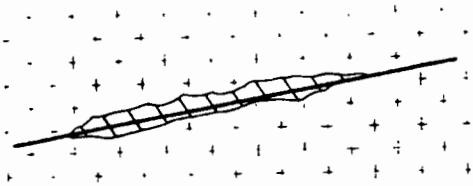
a) Introduction

La platitude du relief en Haute-Volta peut se justifier d'une part par la nature des roches-mères mais d'autre part par l'influence du climat.

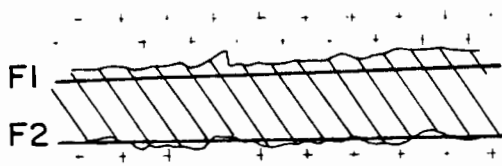
Des nombreuses études réalisées sur la morphologie des zones équatoriales et tropicales (CHOUBERT, 1957 ; HURAUULT, 1967 ; LELONG, 1969 ; ENGALENC, 1978), on arrive aux conclusions suivantes :



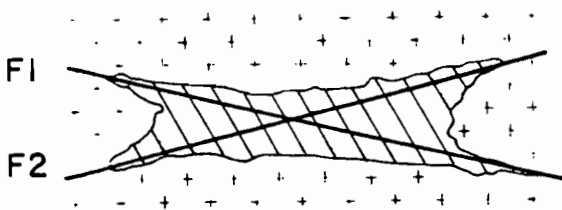
évolution de l'altération



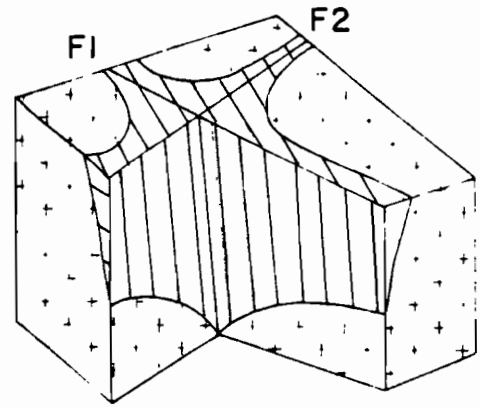
altération sur une fracture



couloir d'altération

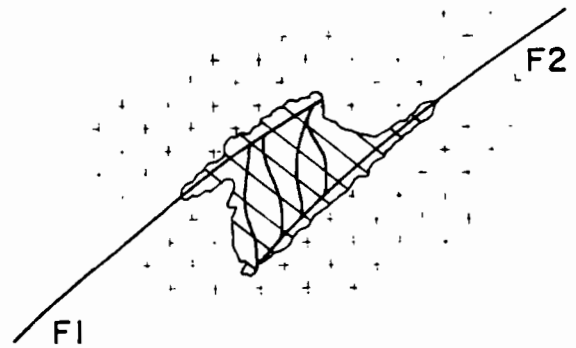


altération sur croisée de fractures

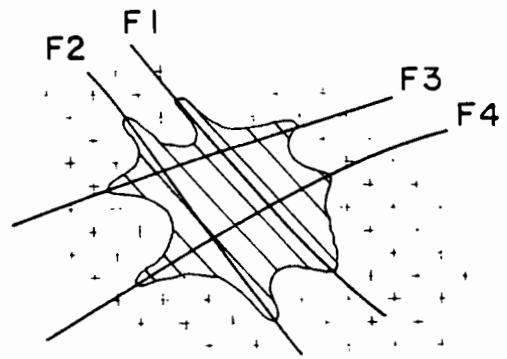


0 30 60 m.

altération à l'intersection de deux failles



altération de la zone de recouvrement de fractures en relais



altération d'une maille de fractures

Fig. 7 - Progression de l'altération au niveau des fractures. Zones préférentielles de l'altération. (D'après ENGALENC, 1975).

Photo 2 - (SAWADOGO)

Paysage caractéristique du socle granitique en Haute-Volta (région de Koupela-Tensobentenga).

Le relief est très plat. Les affleurements se présentent en boules disséminées dans l'altération. Habitat mossi à gauche.

Photo 3 - (SAWADOGO)

Paysage caractéristique des formations birrimiennes en Haute-Volta (Pilimpikou).

Les cuirasses sont bien conservées (à droite) et présentent un front orienté vers la colline de schistes amphiboliques (à gauche). Entre les deux s'est développée une dépression périphérique. Le relief est beaucoup plus accentué que sur les formations granito-gneissique (photo 2).

Photo 2



Photo 3



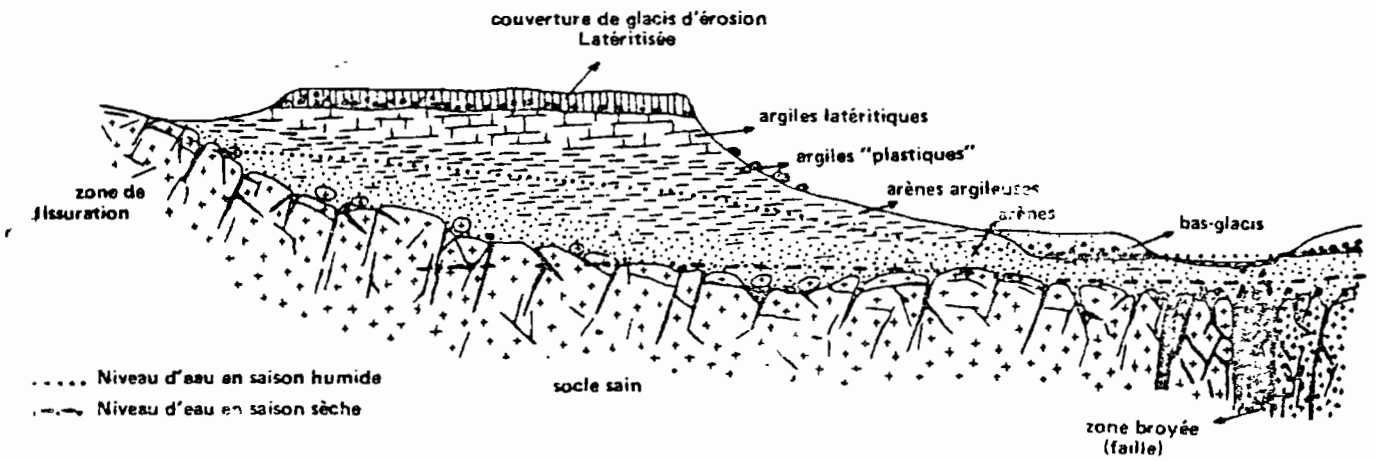


Fig. 8 - Distribution des altérites sur socle granito - gneissique. (d'après GUIRAUD, 1975)

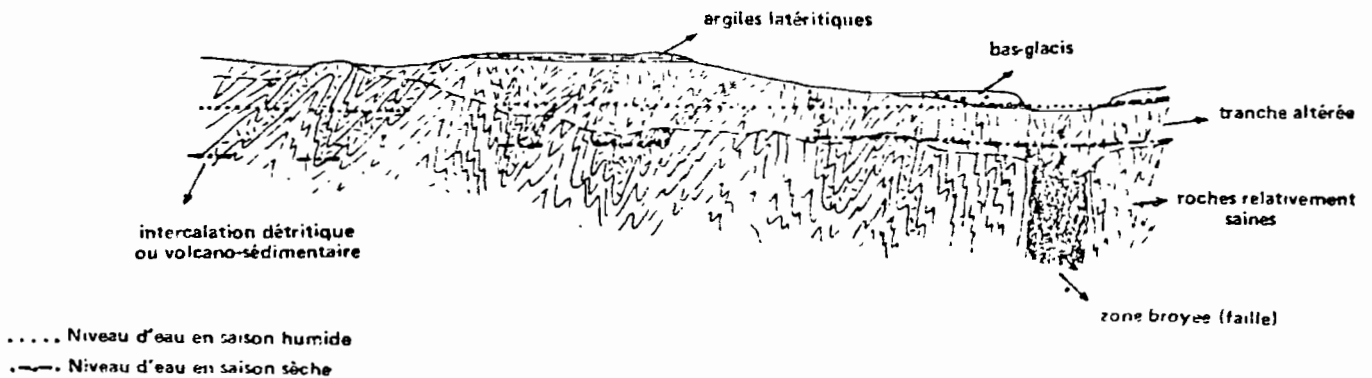


Fig. 9 - Distribution des altérites sur schistes birrimiens. (D'après GUIRAUD, 1975).

- La densité du réseau hydrographique est fonction de la pluviométrie. Celle-ci diminue dans les zones à faible pluviométrie.
- La longueur des versants augmente dans le même sens et on observe une diminution des pentes.

L'action combinée de l'altération et de l'érosion a entraîné la formation des grands traits morphologiques.

b) Les principales unités géomorphologiques

* Les interfluves

Les interfluves constituent les parties les plus hautes du paysage. Ils forment des collines aux formes molles dans les zones granitiques. Ces collines peuvent être soit surmontées d'une cuirasse (fig. 10). Quand cette cuirasse est démantelée, des inelbergs peuvent être mises à nu par l'érosion.

Les collines peuvent faire penser aux centres de maille qui sont peu fracturés, donc peu érodés. Quand la cuirasse est en place, on peut estimer que les altérites sont épaisses.

En région de birrimien, les interfluves présentent un relief beaucoup plus varié (fig. 10). Les cuirasses sont souvent conservées et l'épaisseur des altérites est forte sauf au droit des collines.

Les cuirasses se présentent sous forme de buttes à surface tabulaire dominant le paysage. D'aucuns pensent que ces buttes cuirassées représentent l'ancienne surface d'altération avant que l'érosion n'incise le relief (BIZE, 1966 ; CHOUBERT, 1967). La figure 11 représente la reconstitution du relief originel supposé.

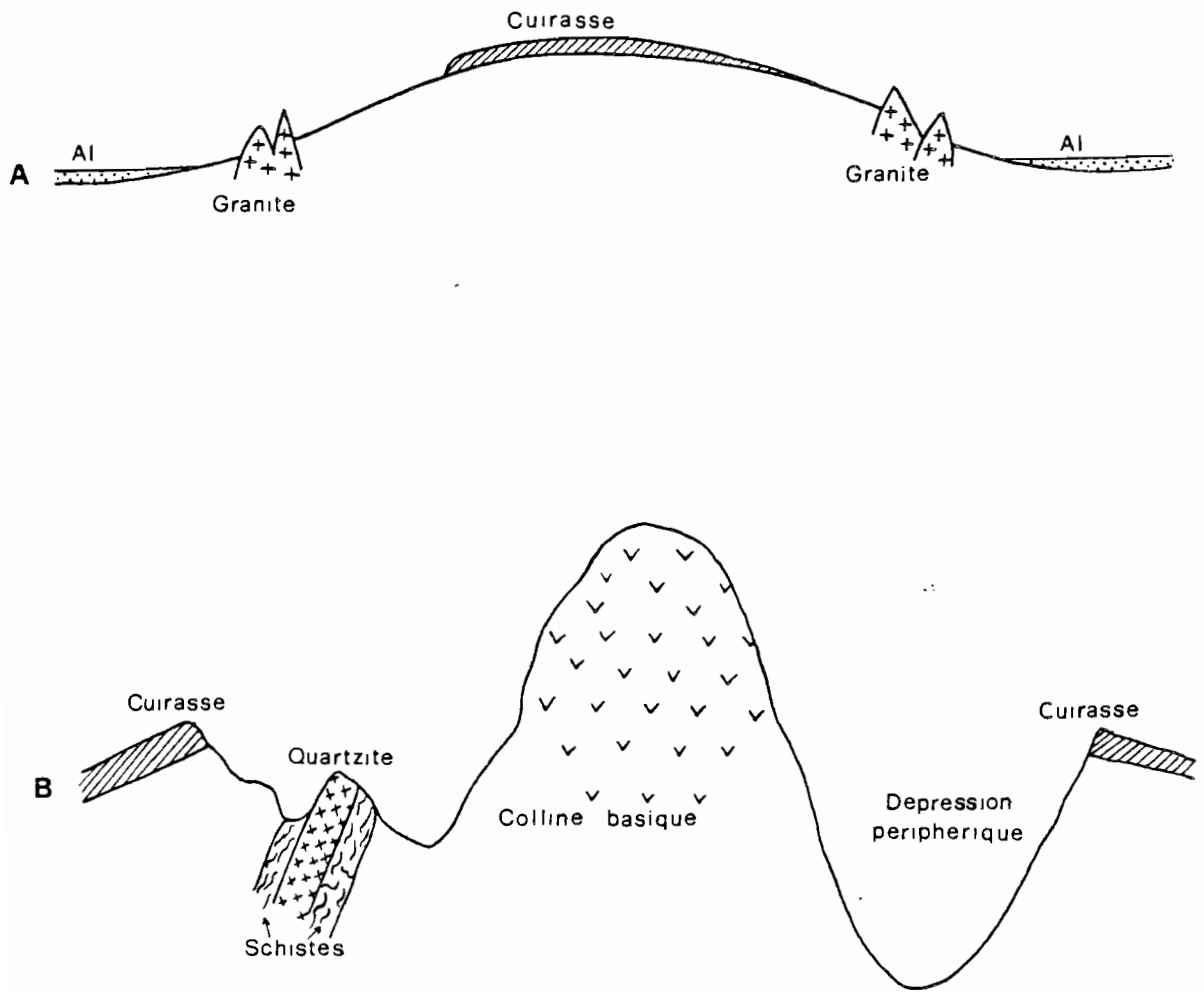
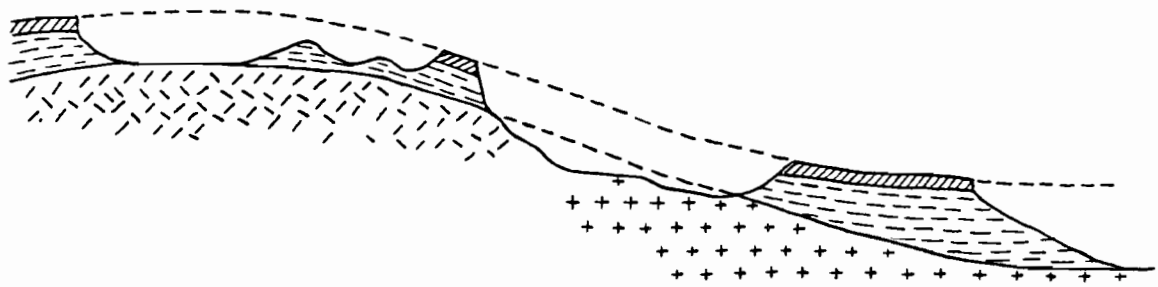


Fig. 10 - Modelé des interfluves.


A - Granito-gneiss


B - Série du Birrimien


(d'après PION, 1976)




Legende

 Roches basiques

 Cuirasse originelle

 Roches non basiques

 Cuirasse secondaire


 Sols ou colluvium

Fig. 11 - Reconstitution de la surface topographique originelle. (D'après BIZE, J., 1967).

* Les versants

Ce terme s'utilise pour désigner les raccords entre l'interfluve et les vallées. L'interfluve étant constitué de plusieurs niveaux de cuirasses appelés aussi glacis, le versant désigne non seulement la surface de raccordement entre deux glacis de niveau différent mais aussi entre le glacis et le marigot.

La pente des versants est souvent très faible (1 ‰ environ) dans les granites migmatitiques du centre de la Haute-Volta. Dans les parties hautes du versant, la pente est forte et cela favorise le ruissellement des eaux aux dépens de l'infiltration. Dans les parties basses, le versant est bordé par une vallée. Localement cette zone est sujette à des inondations et à des dépôts hydromorphes. On peut penser que dans ces zones l'infiltration est plus rapide.

L'épaisseur des altérites est variable sur les versants et des affleurements d'inselbergs rappellent l'inégale répartition des altérites.

* Les vallées

Dans les vallées, les altérites sont en moyenne peu épaisses mais elles sont recouvertes de sables (colluvions et alluvions).

Dans les régions de socle la fracturation est souvent responsable du tracé des vallées. HURAUULT (1967) soulignait déjà l'influence des diaclases sur le réseau hydrographique. ENGALENC (1978) remarque que la fracturation est très intense dans le socle et joue un rôle dans l'orientation du réseau hydrographique.

En fait, il semble que le réseau hydrographique s'implante de façon préférentielle sur les zones fracturées (fig. 12).

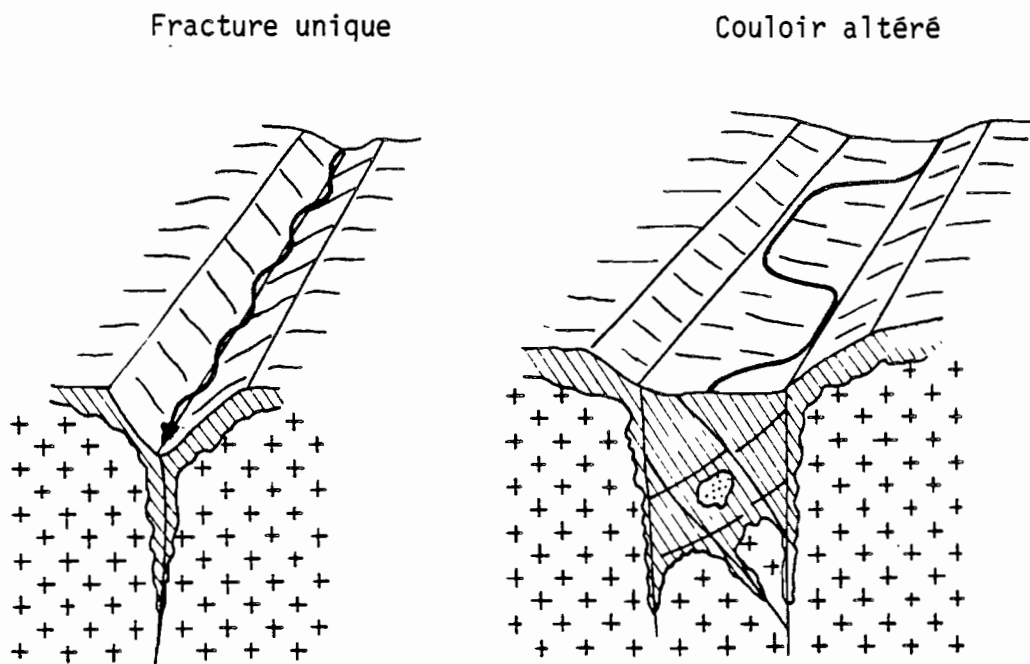


Fig. 12 - Morphologie d'un marigot en fonction de la fracturation.

Les zones fracturées étant des zones altérées où l'érosion est efficace, l'eau aurait tendance à y installer son cours. L'érosion favorise donc l'implantation des vallées dans les zones fissurées ou fracturées.

Si les fractures ou les fissures sont au départ un lieu privilégié pour l'écoulement des marigots, l'évolution de ces derniers peut entraîner un décalage entre le marigot et la fracture (fig. 13). Ce décalage peut être accentué par une dissymétrie des versants.

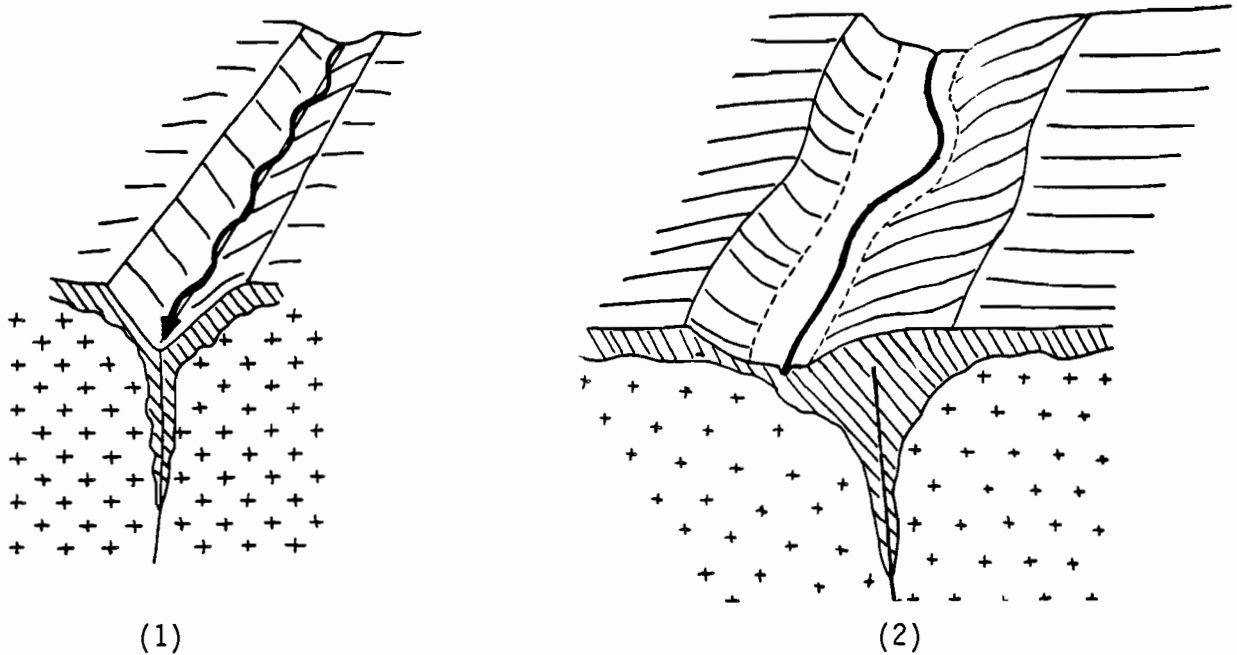


Fig. 13 - Evolution du lit d'un marigot
(1) Incision à la faveur d'une fracture
(2) Abandon du lit original.

Dans le cas de la figure 13, l'assimilation systématique du réseau hydrographique à une fracture peut entraîner des erreurs dans le positionnement du forage. Néanmoins, ce réseau hydrographique permet un bon repérage des fractures.

Le repérage des fractures à l'aide du réseau hydrographique repose essentiellement sur des critères d'irrégularité observés dans le cours de celui-ci. Les portions rectilignes des cours d'eau (plusieurs kilomètres) ou les déviations brusques du cours donnant un tracé en escalier, sont assimilées à des fractures (figure 14). Un autre critère, en particulier en région granitique, est la disposition du cours en étoile à trois branches (cf. chap. II).

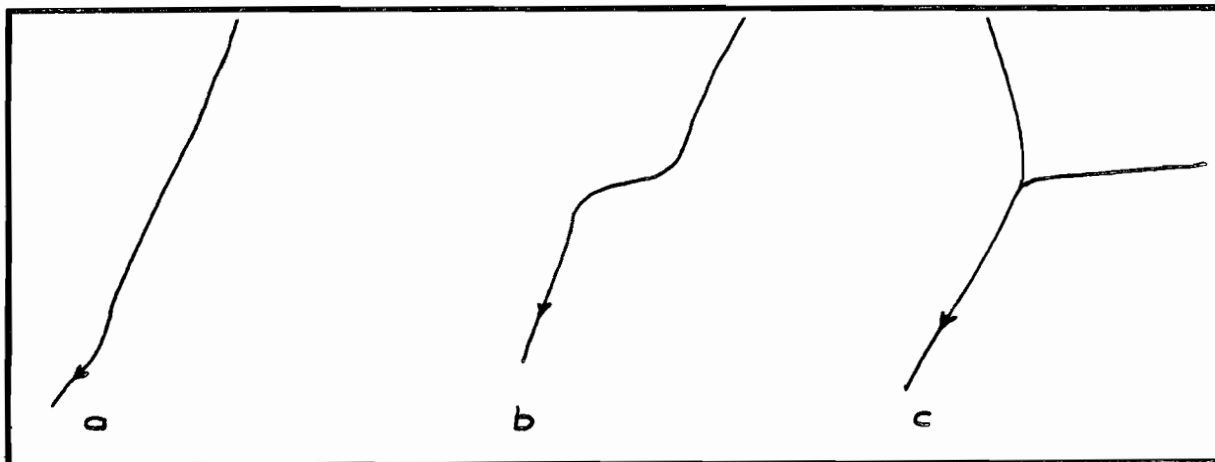


Fig. 14 - Influence de la fracturation sur le tracé du réseau hydrographique.
a - portion rectiligne
b - déviation en escalier
c - disposition en étoile.

En région tropicale, le réseau hydrographique joue un rôle important dans la cartographie de la fracturation. En cela, il est un bon guide pour l'implantation des ouvrages.

* Les bas-fonds

Le bas-fond se situe à l'amont des rivières en tête des thalwegs. Sa surface est plate. Aucune incision n'est observable.

Le bas-fond est en général l'indice d'une zone altérée qui s'est développée à la faveur de fractures. L'épaisseur des altérites n'y est pas toujours importante.

3.3. L'eau souterraine dans les altérites

a) Introduction

Le socle est recouvert, en dehors des zones d'affleurements, d'un manteau d'altération presque continu et souvent très épais (quelques dizaines de mètres).

L'altération est le produit de l'action de phénomènes physico-chimiques dont les facteurs principaux sont la température et la pluviométrie. La sensibilité des roches-mères jouent aussi un rôle important.

L'épaisseur du manteau d'altération est très variable. En Haute-Volta, la non uniformité de cette épaisseur s'explique par les va-

riations locales de la répartition pluviométrique et de la température mais surtout par les variations de faciès des roches-mères et par l'influence des phénomènes d'érosion postérieurs à l'altération.

Les roches du socle lorsqu'elles sont altérées contiennent des réserves en eau souterraine importantes. Ces réserves varient énormément en fonction de la nature des altérites et de leur situation morphologique.

b) Les niveaux productifs des altérites

LELONG F. (1966) étudie les nappes d'altération dans le Nord-Dahomey (actuel Bénin) et définit les paramètres de ces nappes. Le tableau 3 résume les variations moyennes des porosités des altérites sur des formations granito-gneissiques.

Niveau d'altération	Nombre d'échantillons	Porosité totale		Porosité "ouverte"
		moyenne	écart max.	
Argiles latéritiques indurées (0,5-2m)	13	44 %	+ 10 %	44 %
Arènes granito-gneissiques plastiques (> 2 m)	37	43 %	+ 5 %	43 %
Gneiss peu altérés	8	35 %	+ 2 %	15 à 20 %

Tableau 3 - Paramètres hydrologiques moyens des différents niveaux d'altération (LELONG, 1966).

L'horizon cuirasses-argiles latéritiques possède une porosité assez variable (36 à 54 %). Cet horizon a un aspect en général compact et massif. Sa porosité est due probablement à la présence de canaux et de canalicules d'origine biologique irrégulièrement répartis.

Cet ensemble acquiert sa perméabilité au cours de son démantèlement. Il est peu productif dans les niveaux hauts de la topographie et sur les versants. Il est productif lorsqu'il est noyé. Ce niveau est exploité par des puits traditionnels dans les parties basses du profil.

La tranche "d'arènes plastiques" présente des caractéristiques plus homogènes. Elles sont le plus souvent gorgées d'eau mais elles sont peu perméables. La porosité totale est de l'ordre de 43 % (LELONG, 1966) alors que la porosité "efficace" est beaucoup plus faible (3 à 6 %).

Les débits qu'elles fournissent sont peu importants. Cet horizon est un mauvais aquifère mais peut jouer un rôle important dans le stockage de l'eau et dans l'alimentation des fractures.

Enfin à la base, l'ensemble roche fissurée-arènes grenues présente une bonne perméabilité de matrice en raison de l'existence d'éléments grossiers et des fissures de la roche-mère. Cet ensemble se situe en général en profondeur et se trouve ainsi préservé des phénomènes d'évaporation très importants pendant la saison sèche. Ce niveau peut donner des aquifères importants et l'eau qu'il contient est généralement captée par forage.

Il faut noter que sur les formations birrimiennes, notamment à dominante schisteuse, les arènes plastiques sont les plus épaisses. Les ouvrages (puits) produisent de faibles débits à cause de leur mauvaise perméabilité. Cependant la présence d'intercalations filoniennes contribue à améliorer la perméabilité de l'horizon et à fournir une meilleure productivité au réservoir.

c) L'alimentation des nappes d'altération

Les nappes contenues dans les formations du socle permettent l'alimentation en eau des villages pendant une partie de l'année. Dès les mois de Janvier (3 à 4 mois après la fin de la saison pluvieuse), la majorité des puits se trouvent déjà à sec. Les fluctuations de niveau sont dues à l'alternance des saisons avec des amplitudes importantes : 2 à 7 m observés à Parakou (Bénin) (LELONG, 1966). Cette descente de la nappe est variable et dépend de la position de la nappe en profondeur. Elle serait d'autant plus précoce que la nappe est proche de la surface :

- dès janvier pour les nappes situées à 6 m et moins sous le sol,
- dès mars pour les puits situés entre 8 à 9 m sous le sol, et
- juin pour les niveaux situés à 12 m et plus.

Les puits se trouvent donc confrontés aux problèmes de débit. Le cycle alimentation-vidange se traduit par des variations de niveau considérables. L'alimentation est souvent brutale. LELONG (1966) constate une remontée d'environ 6 mètres pendant 5 semaines à Parakou. Cette remontée est fonction bien sûr de la pluviométrie. LELONG (1966) détermine un seuil pluviométrique de 550 à 600 mm annuel pour que la réalimentation soit possible. En-dessous, on peut penser que cette réalimentation ne s'effectue pas.

d) L'influence de la topographie sur les productivités

La productivité des ouvrages en particulier les puits, est liée à la profondeur du niveau piézométrique de la nappe dans les formations d'altération.

Dans les vallées, les nappes sont souvent sub-affleurantes alors qu'elles sont profondément enfouies dans les interfluves. La morphologie de ce fait jouerait un rôle certain dans le taux de succès des forages.

La productivité des ouvrages (puits) en fonction de la situation topographique en région de socle (fig. 15) a été étudiée par DAWIS et DE WIEST (1966). Ces deux auteurs trouvent que :

- les puits situés dans les vallées et les replats sont plus productifs,
- les versants et les crêtes sont moins favorables,
- la productivité des puits diminue des vallées vers les crêtes.

ASSOUMA (1982) analysant la productivité de 300 forages creusés dans le socle du Togo tire la conclusion suivante : les chances de succès (pourcentage de fois où l'on obtient un forage productif c'est-à-dire $Q > 0,7 \text{ m}^3/\text{h}$) sont un peu plus élevées sur les versants que dans les vallées. Cet auteur ne se prononce pas sur les lignes de crêtes en raison du faible nombre de forages disponibles.

De ces résultats, il semble que la topographie ne jouerait pas un rôle prépondérant dans la productivité des ouvrages. De la différence qui existe entre les ouvrages (puits et forages) analysés dans les deux cas, il serait hasardeux de tirer des conclusions sur l'influence de la topographie. On peut cependant constater que les versants sont productifs dans les deux cas. Il semble que le bassin souterrain serait d'orientation similaire au bassin superficiel de drainage (69 % de forages positifs dans les vallées) dans de nombreux cas. Dans ces cas, les fluctuations du niveau piézométrique pénalisent les ouvrages peu profonds et situés trop haut.

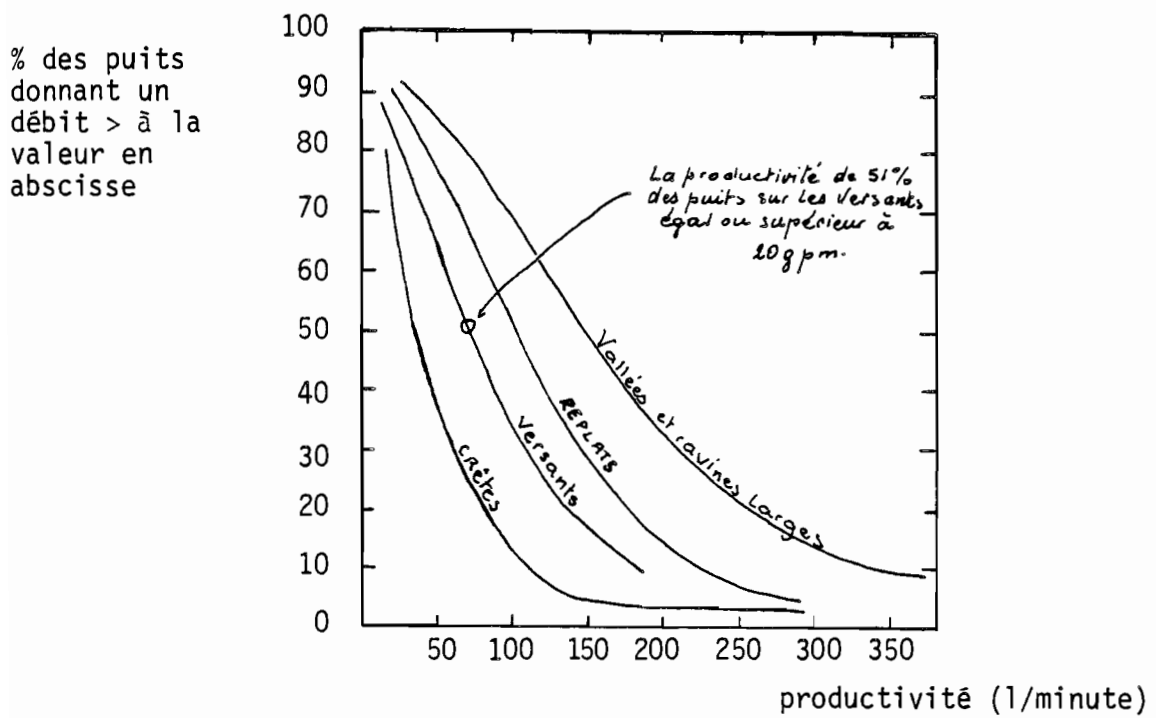


Fig. 15 - Distribution de fréquence cumulée de productivité de puits pour différentes positions topographiques. Nord Caroline. (Extrait de DAWIS, 1966).

IV - CONCLUSION SUR LE CHAPITRE I

L'étude des généralités nous fournit les renseignements suivants :

La Haute-Volta a un relief plat et monotone dans sa partie centrale. Le pays est doté d'un climat tropical sec contrasté à deux saisons. On peut distinguer trois zones climatiques du Nord vers le Sud correspondant à une croissance de la pluviométrie. La végétation présente une répartition zonale sensiblement identique aux zones climatiques.

La géologie, essentiellement constituée de socle cristallin, est constituée pour une grande part par des formations granitiques et migmatitiques et pour une faible part par des formations volcano-sédimentaires métamorphisées.

La tectonique a une direction générale NE-SW et date de l'orogénie éburnéenne qui a mis en place les ensembles métamorphisés : le Birrimien.

Ces formations très anciennes sont recouvertes fréquemment par des formations d'altération et de cuirasses qui masquent les roches du socle. Les altérations sont très développées et les ressources aquifères qui leur sont associées ont par suite une grande importance en l'absence de réservoirs sédimentaires (grès,...).

Dans les granito-gneiss, les niveaux d'altérations sont plus sableux. Ils renferment des niveaux perméables qui peuvent être importants. Les altérites des formations schisteuses sont très argileuses et ne présentent d'intérêt majeur que lorsqu'elles sont traversées de filons.

Les ouvrages qui exploitent les nappes d'altération n'ont pas toujours un débit continu. En plus l'action des sécheresses successives au Sahel a entraîné une baisse importante et généralisée du niveau des aquifères qui y sont localisés. C'est pourquoi l'exploitation des niveaux plus profonds est devenue une nécessité pour l'alimentation en eau des populations.

Les hydrogéologues ont donc orienté leur recherche vers ces niveaux profonds et en particulier les "nappes de fractures".

Chapitre II - INTRODUCTION A L'ETUDE DE LA FRACTURATION

I - NOTION DE FRACTURE

1.1. Introduction

L'intérêt hydrogéologique des fractures a été souligné par de nombreux auteurs (ENGALENC, 1975 ; SAWADOGO A.N., 1975 ; BERARD P., 1975 ; GUIRAUD R., 1975 ; KIKIETTA A., 1979 ; DULICA, 1979 ; SOURISSEAU, 1981).

Mais la recherche systématique d'eau dans les zones fissurées du socle est la conséquence du développement des moyens de foration depuis l'apparition du marteau "fond de trou". Aussi avec la vague de sécheresse qui s'est abattue sur le Sahel à partir des années 1973, la plupart des hydrogéologues se sont orientés vers un levé presque systématique des fractures avant l'implantation des forages.

En Haute-Volta, l'étude géologique nous a révélé que nous avons à faire essentiellement à des roches compactes : granites et formations métamorphiques. Les roches sédimentaires constituées essentiellement de grès recouvrent une faible superficie du territoire et se localisent à l'extrême Sud-Est et à l'extrême Nord et Nord-Ouest.

Ces roches compactes ne peuvent renfermer de l'eau que dans leurs parties altérées ou qu'à la faveur de fractures, diaclases et autres discontinuités de la roche.

L'étude de la fracturation s'avère donc nécessaire à la prospection d'eau souterraine en Haute-Volta. Elle conditionne l'obtention de meilleurs débits, d'ouvrages pérennes et elle permet aussi l'augmentation du taux de succès d'où une diminution des coûts.

1.2. Différentes sortes de fractures

L'observation des cartes géologiques, des documents géophysiques et du terrain nous permet de constater l'existence de discontinuités sur les roches. Ces discontinuités peuvent être appelées failles, joints, fentes, etc... et sont liées à la déformation discontinue qui s'est manifestée (ou se manifeste) au sein de la roche.

Suivant la taille de la fracture, et s'il existe un rejet ou non entre les deux bords, on distingue (GOGUEL, 1965 ; MATTAUER, 1973 ; BLES et FEUGA, 1980) :

- Les failles quand les deux compartiments séparés par la fracture montrent un déplacement l'un par rapport à l'autre. Ce déplacement ou rejet peut aller de l'ordre du mètre à quelques dizaines de kilomètres .
- On parle de cassures pour les déplacements faibles.
- Les diaclasses ou joints lorsque le déplacement relatif est très petit ou nul.

1.3. Définition

Nous devons à BLES et FEUGA (1980) la définition du terme de fracture. "La dénomination de fracture est prise au sens de discontinuité d'origine mécanique et tectonique apparaissant dans les niveaux structuraux moyen et supérieur de l'écorce terrestre. Le terme de fracture englobe donc les diaclasses, les fentes ou fractures d'extension, les joints stylolithiques et les failles de différentes dimensions".

La notion de fracture est donc une notion générale qui sert à désigner toute rupture dans un matériel quand on n'est pas en mesure d'en préciser les mécanismes.

Cette notion s'adapte bien dans les régions de socle où les affleurements sont rares et de mauvaise qualité, ce qui rend l'analyse en surface difficile voire impossible.

II - ORIGINE DES FRACTURES

L'existence des fractures dans les régions de socle a été confirmée par de nombreuses études (CLOOS, 1936 ; LARSSON, 1963-67 ; ENGALENC, 1978 ; BLES-FEUGA-GROS, 1980).

L'origine de ces fractures est à rechercher

- soit dans la mise en place des magmas granitiques; ce sont les fractures précoces ou primaires.
- soit dans les phénomènes tectoniques qui se sont produits après la mise en place et le refroidissement des magmas. Ces phénomènes tectoniques ont pu d'une part induire sur les roches granitiques existantes d'autres

fractures secondaires mais d'autre part entraîner la formation de fractures dans les formations sus-jacentes du granite.

2.1. Les fractures primaires du granite

La naissance des fractures primaires est assez mal connue. Leur formation est liée à divers mécanismes tels que :

- refroidissement du magma entraînant une relaxation des contraintes (BLAK, 1937),
- augmentation de la pression des fluides libérés lors de la cristallisation
- ou encore réaction des terrains encaissants à l'intrusion granitique (PRICE, 1966).

D'après les travaux de CLOOS H. (1936), BLAK R. (1937) et PRICE (1966), on peut distinguer quatre familles de fractures précoces (ou joints primaires) lors de la mise en place d'intrusion granitique (fig. 16).

a) Les joints primaires longitudinaux (longitudinal joints)

Ces joints sont rarement remplis de produits pegmatitiques ou aplitiques. Ce sont probablement les plus tardifs. Leur direction est parallèle aux lignes de flux et leur orientation est plus ou moins affectée par les variations de direction du magma. Ces joints se formeraient au cours de la remontée du magma par retrait lors de son refroidissement.

b) Les joints primaires croisés (ou cross joints)

Apparaissant probablement les premiers dans la masse en cours de refroidissement, ils présentent un plan orthogonal à la fluidité. Ils sont souvent injectés de liquides résiduels qui forment des filons d'aplite ou de pegmatites.

On pense que ce sont des fractures de tension, formées d'une part par le comportement mécanique des murs et du toit du pluton et d'autre part par l'expansion continue de la masse lors de l'intrusion.

c) Les joints primaires diagonaux (diagonal joints)

Ces joints sont remplis de filons d'aplitiques ou de minéraux hydrothermaux. Pour cette raison on pense qu'ils sont contemporains des joints transversaux. De même direction que la fluidité, ils forment avec

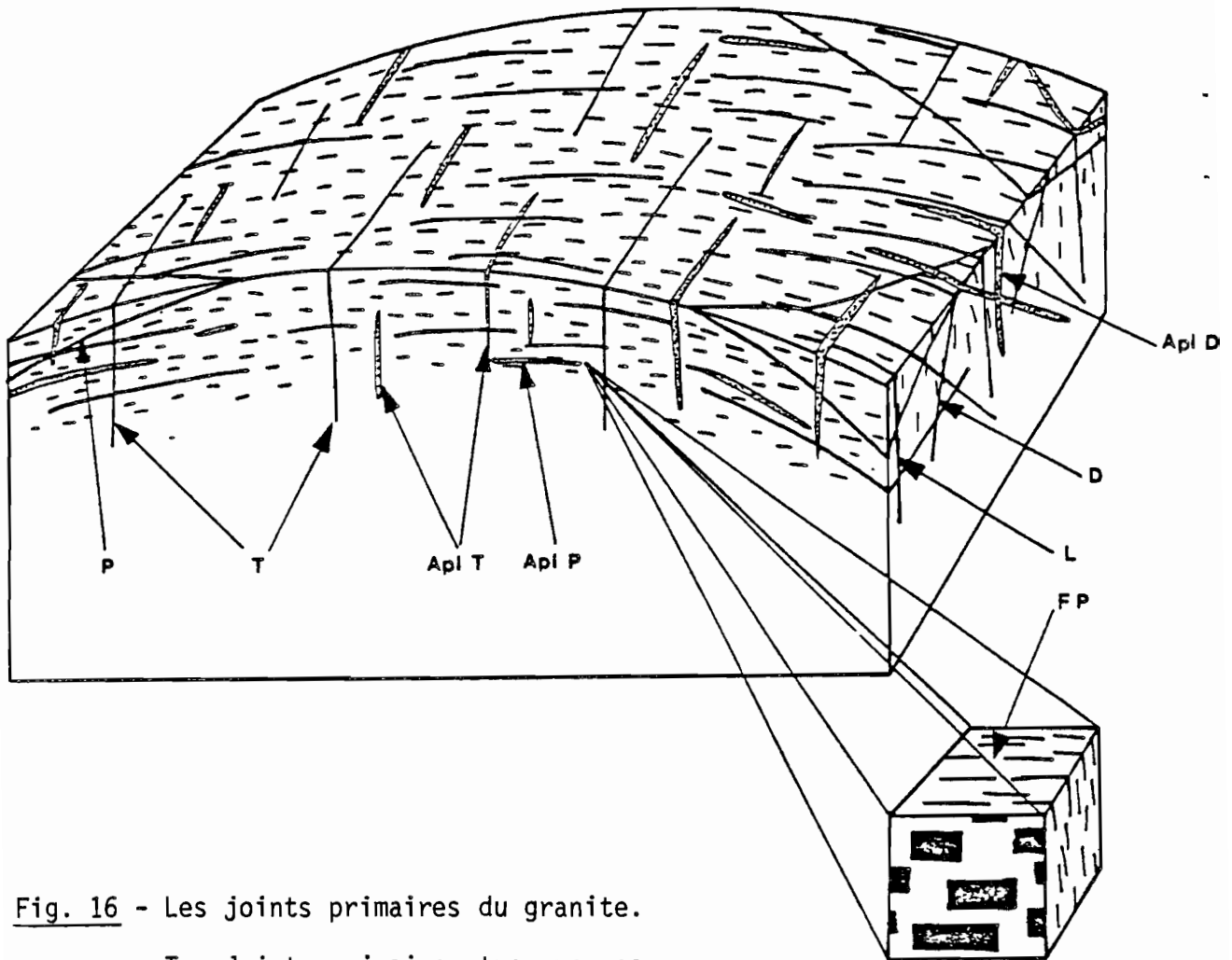


Fig. 16 - Les joints primaires du granite.

- T - Joints primaires transverses
- D - Joints primaires diagonaux
- P - Joints primaires plats
- L - Joints primaires longitudinaux
- Apl. T - aplites dans les joints primaires transverses
- Apl. D - aplites dans les joints primaires diagonaux
- Apl. P - aplites dans les joints primaires plats
- F.P - fabrique planaire.

(CLOOS H., 1936)

elle un angle supérieur ou égal à 45° : ce sont des joints de compression formés par un phénomène de cisaillement engendrant un serrage normal au plan de la fluidité.

d) Les joints primaires plats (flat lying joints)

Ils prennent naissance à l'apex de la masse granitique et présenteraient des pendages faibles. Ces joints sont remplis de filons hydrothermaux. Leur origine serait en relation avec la relaxation des contraintes liées à la montée du magma.

e) Remarques sur les joints primaires

A l'exception des joints longitudinaux, les fractures primaires se comportent comme des failles ou dykes (PRICE, 1966). Elles auront joué en cisaillement.

De plus, si le refroidissement du magma peut provoquer des ruptures de la roche, les contraintes régionales contemporaines de la mise en place du magma jouent un rôle primordial.

Il apparaît très difficile de distinguer les joints liés à la tectonique régionale des joints primaires du granite si ces derniers n'ont pas été cicatrisés par des filons permettant de les discerner.

2.2. Polygones de fracturation dans les granites

a) Constatacion

L'observation des cartes topographiques permet de mettre en évidence de nombreuses figures de forme polygonale.

L'analyse des photographies aériennes permet de tracer un réseau de fracturation auquel on arrive à dégager des figures polygonales de fracturation (fig. 17).

Ces polygones sont parfois réguliers avec 5, 6 ou 7 côtés et sont souvent empruntés par le réseau hydrographique (photo 4).

b) Origine des polygones de fracturation

Des forages exécutés sur les côtés de ces polygones montrent qu'ils correspondent à des zones fracturées.

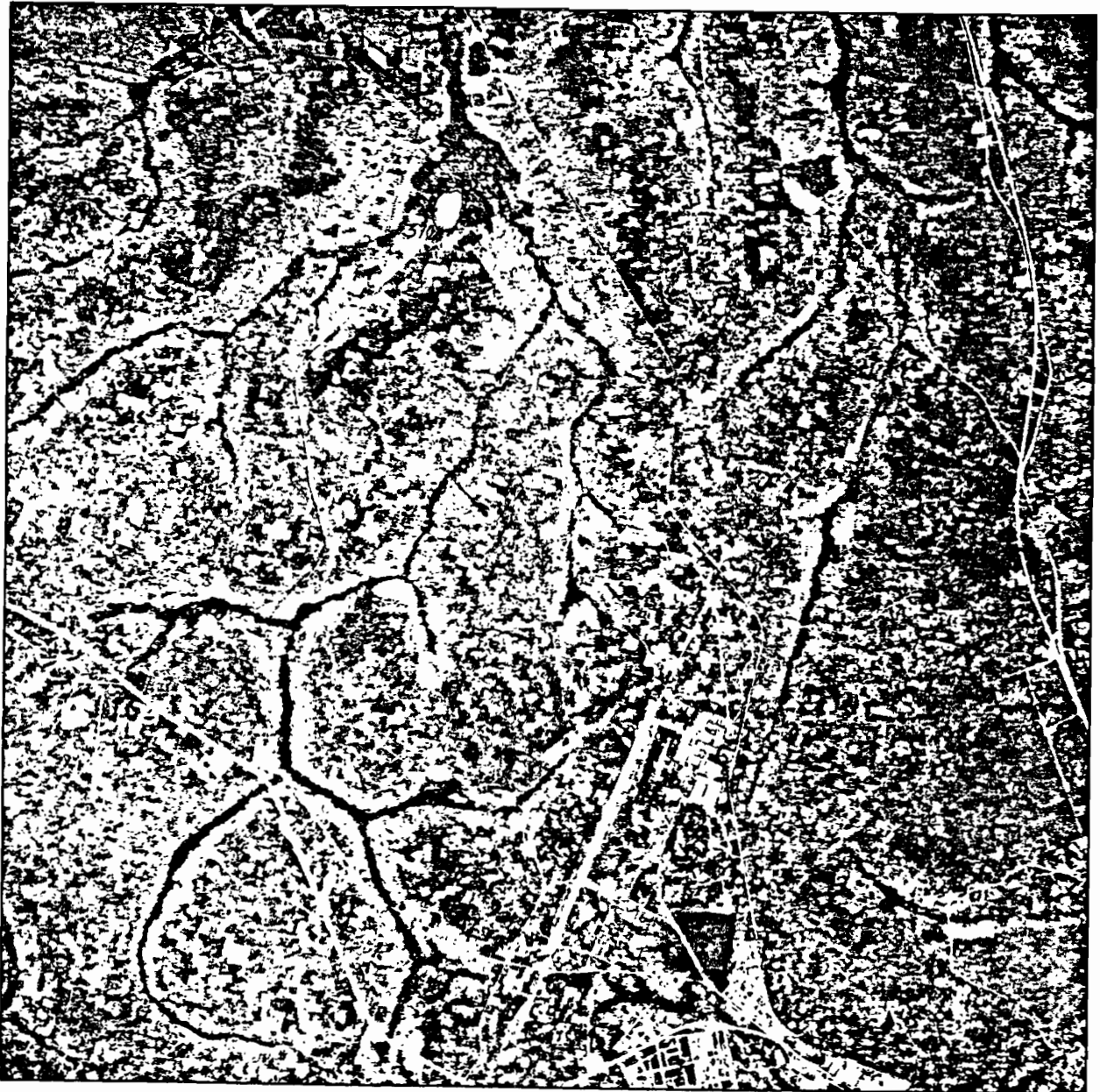


Photo 4 - Photographie aérienne au 1/50.000^e en zone granitique (Côte d'Ivoire).
(Extrait de communication au congrès géologique international, Paris, juillet, 1980).

- L'orientation du réseau hydrographique au quart sud-ouest montre un réseau polygonal à 3 directions proche de 120° avec tronçons rectilignes de longueur supérieure au kilomètre, soulignant les fractures (maille polygonale).

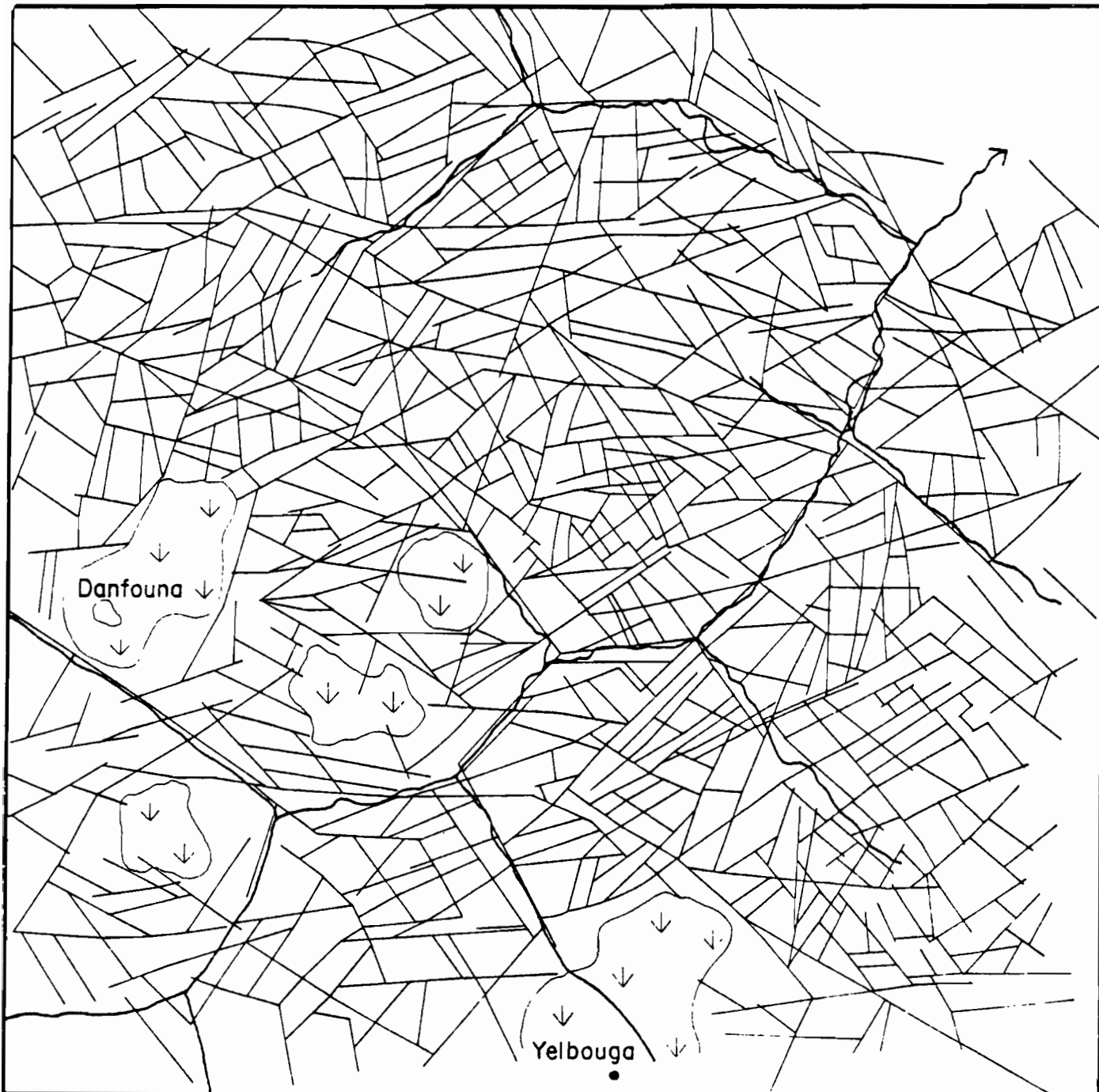


Fig. 17 - Exemple de relevé détaillé de la fracturation
en zone granitique.

Leo (Haute-Volta)

e = 1/55.000

(ENGALENC, 1975)

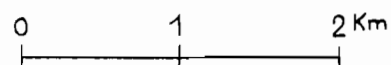


photo AOF.1950n° 097

Aussi, ENGALENC (1978) met en liaison ces polygones de "fracturation" avec les joints de refroidissement du magma par analogie avec le débit prismatique des basaltes.

En effet "les prismes basaltiques de section modeste sont coupés transversalement à des intervalles à peu près égaux par des joints légèrement bombés à convexité tournée vers le haut" (JUNG J., 1958).

La prismation serait liée aux fissures de retrait qui se développent au cours du refroidissement du magma.

Les figures polygonales seraient la trace superficielle de volumes prismatiques (fig. 18). L'existence de courant de convection, liés aux différences de température entre le sommet et la base du magma qui affecteraient ces volumes, entraînerait la formation des figures polygonales.

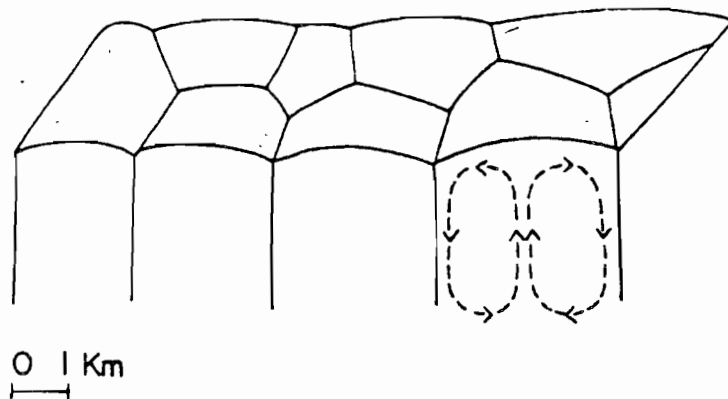


Figure 18 - Mégaprismes et courants de convection dans le magma (ENGALENC, 1978).

c) Apparition des fissures étoilées

Le processus de rétraction serait à l'origine du réseau de fissures étoilées, la rétraction s'exerçant de la périphérie vers le centre de la maille (fig. 19).

Reprenant une communication orale de AVIAS J., ENGALENC (1978) écrit : "l'éclatement en un point d'une sphère homogène et isotrope se traduit par des fentes en étoiles à trois branches délimitant des angles de 120°".

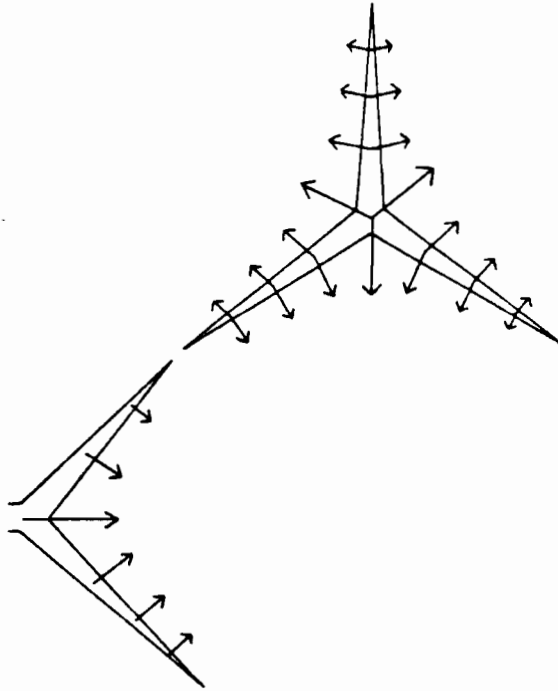


Fig. 19 - Rétraction vers le centre de la maille.
(Les flèches simulent les forces de tension). (ENGALENC, 1978)

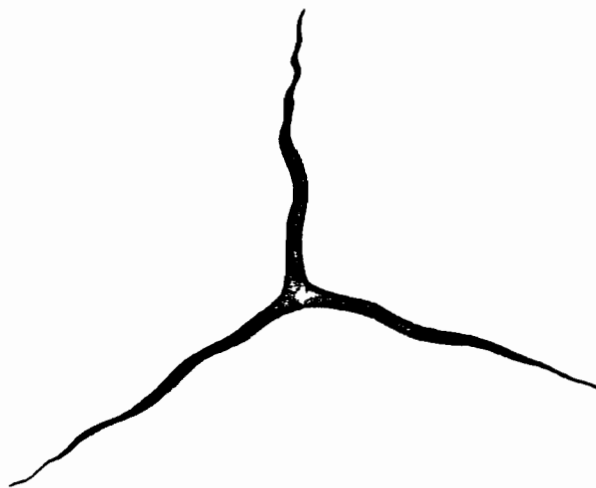


Fig. 20 - Eclatement en étoile à 3 branches en milieu isotrope (ENGALENC, 1978).

De nombreux matériaux soumis à la dessiccation ou au refroidissement présenteraient ces phénomènes de rétraction. L'éclatement est maximum en un point qui est le centre de l'étoile. Le phénomène se ralentirait au niveau des lèvres entraînant la formation d'extrémités filiformes et la fermeture du joint (fig. 20).

d) Organisation des fractures étoilées dans le granite

Les figures 21 et 22 présentent les différents modes d'association des étoiles dans un stade précoce de la prismation. Par contre, si au cours du refroidissement de fortes contraintes provoquent des zones de faiblesse, les étoiles auront tendance à s'aligner dans cette direction comme le montrent les figures 23 et 24. La fracturation étoilée permet de comprendre certains types de figures observables sur les photographies aériennes.

e) Joint horizontal (sheet joints)

Quoique n'étant pas stratifiés, les granites peuvent présenter un découpage en banc épais (fig. 25). Les joints horizontaux présentent des pendages très faibles et tendent à se développer parallèlement à la topographie et selon une fréquence particulière. Leur origine n'est pas éclaircie. Certains auteurs leur attribuent une signification de fracture de tension (F.Z. LAJTAI, 1977 ; N.J. PRICE, 1966).

D'après ENGALENC (1978), ces joints trouveraient leur origine dans la décompression superficielle des roches.

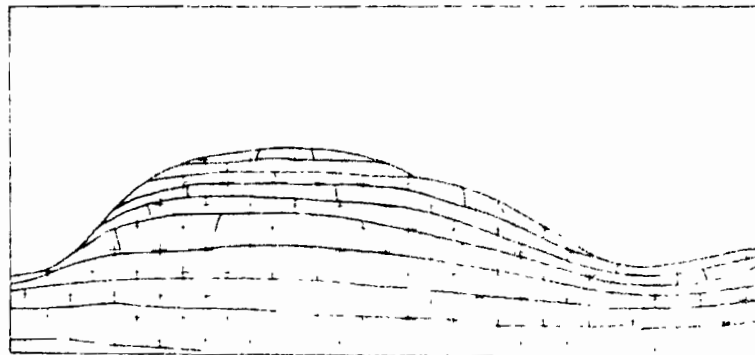


Figure 25 - Joints horizontaux (sheet joints) et joints courbes du granite (d'après LEGRAND, 1948).



Fig. 21 - Raccordement de deux branches.

- 1 - Terminaisons filiformes
- 2 - Joint de relais
(ENGALENC, 1978)

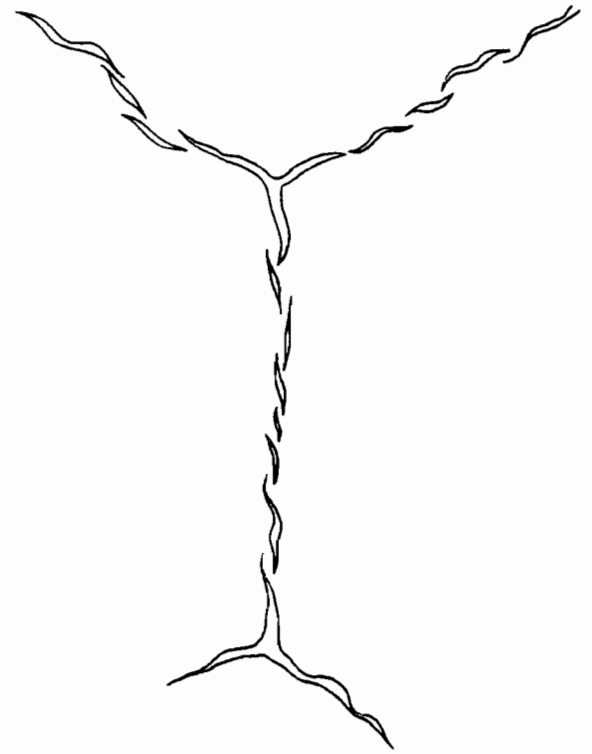


Fig. 22 - Joints de relais.
(Stade précoce de la prisma-
tion) (ENGALENC, 1978)

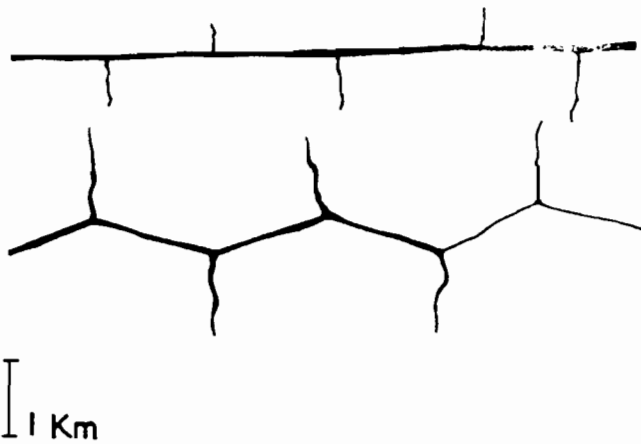


Fig. 23 - Couloir entre fractures parallèles rapprochées (ENGALENC, 1978)

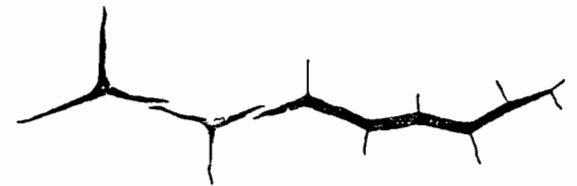


Fig. 24 - Raccordement de figures étoilées rapprochées (ENGALENC, 1978)

2.3. Les fractures liées au socle métamorphique

Le socle métamorphique est d'âge Birrimien en Haute-Volta. C'est un ensemble formé de roches variées telles que schistes, amphibolites, quartzites, etc...

Les fractures qui l'affectent pourraient avoir leur origine dans la tectonique régionale qui a affecté le socle au moment de leur dépôt et postérieurement.

a) Fractures liées aux plissements

Dans un milieu quelconque, lorsque la déformation continue dépasse une certaine limite, il y a rupture, mais celle-ci aura des allures différentes suivant le type de flexion (MATTAUER, 1973).

Dans les plis à déformation de charnière, il se forme généralement, au sommet des anticlinaux (parties soumises à un étirement), des fentes perpendiculaires aux strates alors que les parties inférieures des charnières sont affectées par des failles inverses (fractures fermées). Dans les synclinaux la disposition est inverse (fig. 26).

Dans les plis à déformation de flanc, des fentes peuvent également s'ouvrir ; elles sont perpendiculaires au plan axial des strates (fig. 27a). Si la déformation augmente, il peut s'y associer des cisaillements parallèles et obliques aux strates (fig. 27b).

En définitive, l'allure de la déformation discontinue dépend étroitement du type de flexion.

D'après LARSSON (1968), à l'échelle de la structure plissée, on observe des fractures transversales ouvertes, disposées perpendiculairement à l'allongement du pli. Ces fractures sont parallèles à l'axe de compression. Ce sont des fractures de tension localisées dans les plis. Ces fractures sont planes, parallèles entre elles et sans interconnection (fig. 28).

b) Apparition de la schistosité

Les divers cas de rupture présentés ci-dessus se compliquent lorsqu'on progresse du sommet vers la base des strates. Ainsi un pli anticlinal isopaque se transforme en profondeur et au-delà d'un certain seuil, le plissement n'est plus isopaque. Les strates perdent alors leur parallélisme initial. Le coeur du pli isopaque devient très anisopaque et la schistosité peut y apparaître (fig. 29).

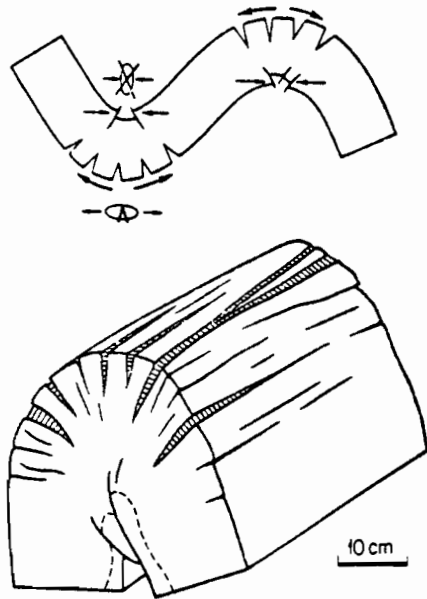


Fig. 26 - Fractures dans les plis à déformation de charnière. (MATTAUER, 1973)

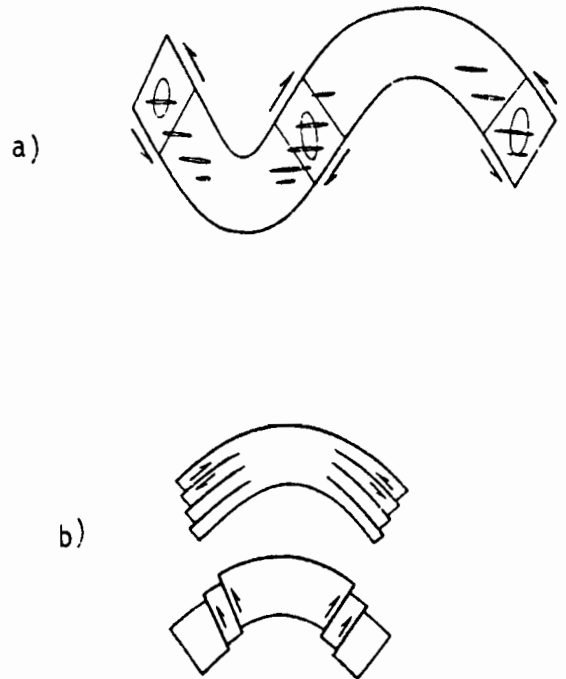


Fig. 27 - Fractures dans les plis à déformation de flanc.

a) Allure des fentes
b) Allure théorique des failles conjuguées
(MATTAUER, 1973)

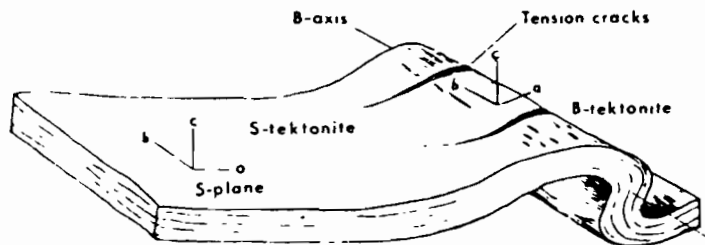


Fig. 28 - Déformation plane et axiale (fractures de tension, LARSSON, 1959)

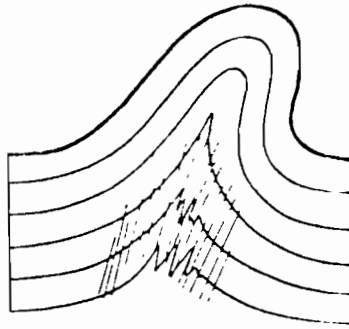


Fig. 29 - Pli isopaque à cœur affecté par une schistosité (MATTAUER, 1973).

Ainsi, en fonction de la profondeur d'apparition des différentes déformations : fracturation, plissement, schistosité, MATTAUER (1973) définit trois niveaux structuraux (fig. 30).

Un niveau structural est le domaine de l'écorce terrestre où les mécanismes dominants de la déformation restent les mêmes.

c) Fractures indifférenciées

L'observation des cartes de fracturation montre une grande diversité de fractures (fig. 17). Ainsi, il a pu se former dans le socle Ouest africain toute une série de fractures d'origine variée mais dont l'identification sur le terrain n'est pas toujours évidente et dont l'origine reste le plus souvent incertaine.

III - FRACTURATION ET CIRCULATION D'EAU SOUTERRAINE

3.1. Conditions d'existence des eaux souterraines

Dans les régions de socle, la roche peut être fracturée sur une grande profondeur. L'hydrogéologue ne s'intéresse qu'aux fractures susceptibles de renfermer de l'eau en quantité importante.

Certains auteurs estiment que failles et fractures présentent un intérêt hydrogéologique variable selon leur nature. LARSSON (1972) montre dans ces travaux que seules les fractures de tension semblent être ouvertes et peuvent fournir de bons débits d'eau. Ces fractures de tension drainent donc des quantités d'eau importantes. Par contre, les fractures de cisaillement, d'après cet auteur, semblent être fermées et contiennent peu d'eau.

L'existence d'eau dans les fractures dépend donc de leur origine dynamique : fractures de tension, de compression, de cisaillement. Suivant la direction d'application des contraintes, les premières seront ouvertes et les dernières fermées.

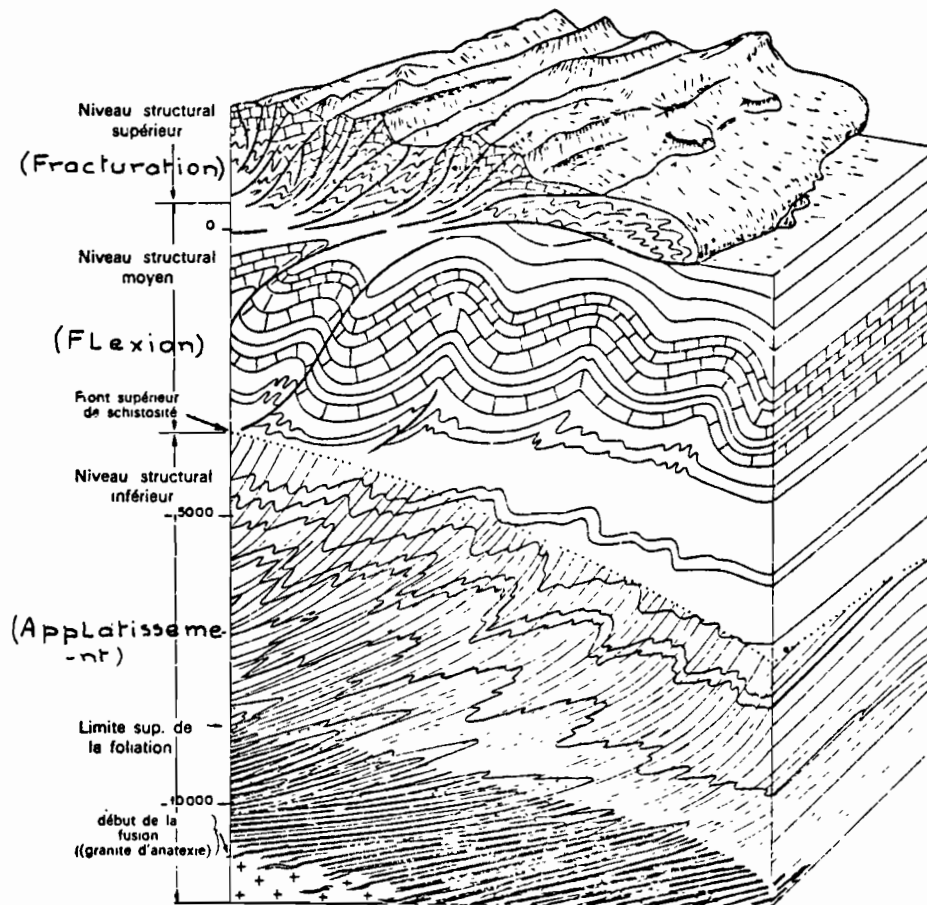


Fig. 30 - Portion de l'écorce terrestre montrant l'allure des déformations dans les divers niveaux structuraux (MATTAUER, 1973).

Mais les fractures initialement ouvertes peuvent être remplies de filons entraînant leur fermeture. Ces filons peuvent acquérir un intérêt hydrogéologique important par le rôle de drain qu'ils jouent dans la collecte des eaux (LARSSON, 1972 ; BERGER-ENGALENC, 1975 ; GUIRAUD, 1975 et autres).

3.2. Ouverture des fractures

L'ouverture des fractures peut avoir pour origine : la distension tectonique, la décompression superficielle et la décompression gravifique (ENGALENC, 1978).

a) La distension tectonique

La distension tectonique dépend de l'état des dernières contraintes qui se sont exercées sur le socle. En Afrique de l'Ouest, il est difficile de situer les dernières phases tectoniques et surtout l'état des contraintes en ces moments-là.

Il semble que les fractures transversales (NW-SE) remplies de filons hydrothermaux, ont d'abord été des fissures de tension. Les fractures longitudinales (NE-SW) remplies aussi de filons, sont considérées comme des fractures de compression qui ont pu s'ouvrir plus tard (ENGALENC, 1978).

b) La décompression superficielle (fig. 31)

Seule la décompression superficielle serait à l'origine de l'ouverture des fractures dans le socle Ouest africain. De nombreux travaux montrent que les fractures peuvent s'ouvrir sous l'effet de la décompression superficielle (AVIAS, 1967 ; AGALEDES-GUERIN, 1973 et autres). Elle serait due à l'allègement de la charge lithostatique par érosion entraînant un relâchement des contraintes résiduelles. Elle n'affecte que les fractures non soudées par du matériel hydrothermal.

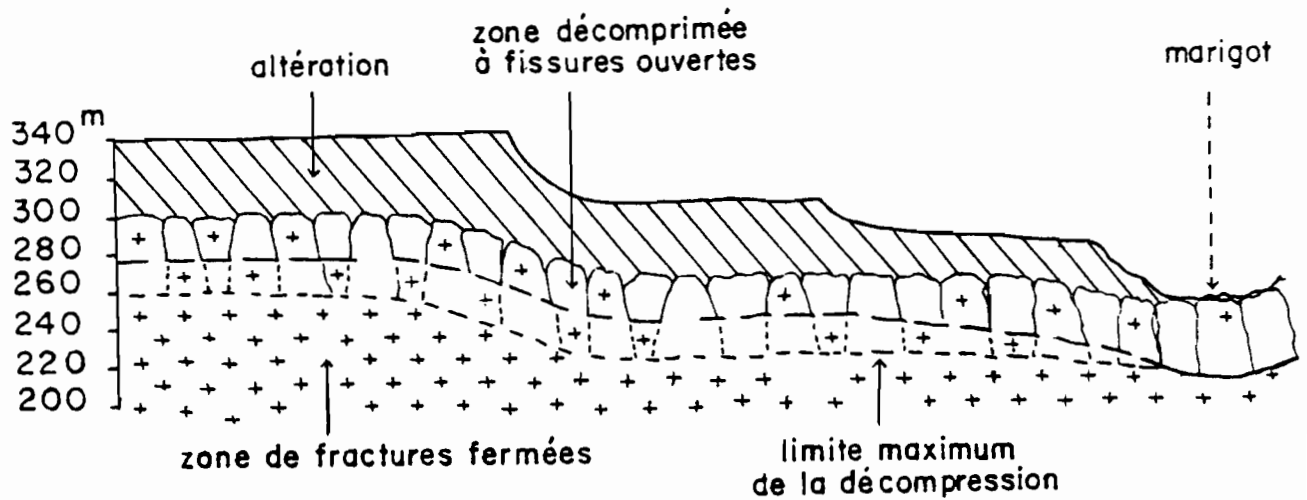


Fig. 31 - Allure théorique du front de décompression des roches en fonction de la morphologie et de la charge totale (d'après ENGALENC, 1975).

Ainsi, pour l'hydrogéologue il est primordial de connaître l'épaisseur de la zone décompressée. L'expérience révèle :

- que les débits spécifiques (fig. 32) dans le socle diminuent très vite avec la profondeur (LEGRAND, 1954 ; DAWIS, 1967)

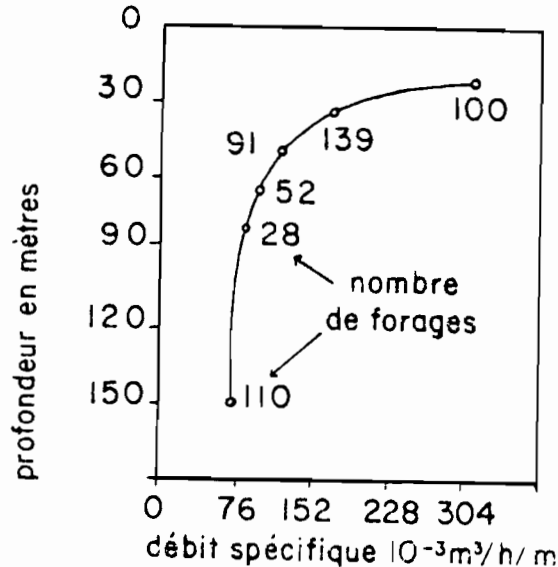


Fig. 32 - Décroissance du débit spécifique avec la profondeur des forages. Roches cristallines. Statesville, Caroline du Nord, USA. (d'après LEGRAND H.E., 1954).

- qu'en-dessous d'une certaine profondeur, il n'y a plus d'écoulement (LOUIS, 1968),
- qu'il y a également une diminution du coefficient de perméabilité K avec la profondeur des forages (VAUBOURG, 1981),

- que la production des forages et les taux de succès cessent de croître au-delà de la profondeur de 50-80 mètres (ASSOUMA, 1978 ; ENGALENC, 1978 ; SOURISSEAU, 1981).

De ces différents travaux, on peut dire que la connaissance de l'épaisseur de la zone décomprimée est importante pour la recherche d'eau en région de socle. La presque totalité des réserves en eau semble localisée dans cette zone.

Il semble que la puissance de la zone décomprimée est d'environ une quarantaine de mètres dans les roches cristallines saines (ENGALENC, 1978). Cette profondeur serait constante quel que soit le pays d'observation. AVIAS (1967) montre que l'épaisseur de la zone décomprimée est d'environ 35 à 40 mètres dans le Massif Central français.

Ainsi, il apparaît que la décompression superficielle peut affecter toutes les fractures d'un massif à l'affleurement, quelle que soit leur direction et à condition qu'elles ne soient pas soudées par des filons. Sa puissance varie de 40 mètres sur les roches granitiques à 60 mètres sur les schistes. Elle serait d'autant plus épaisse que la couverture d'altération est faible (fig. 33). De plus il existe un parallélisme marqué entre la surface topographique et le front de décompression. Ce qui semble indiquer que la décompression superficielle est un phénomène rapide, capable de se manifester depuis l'incision des vallées.

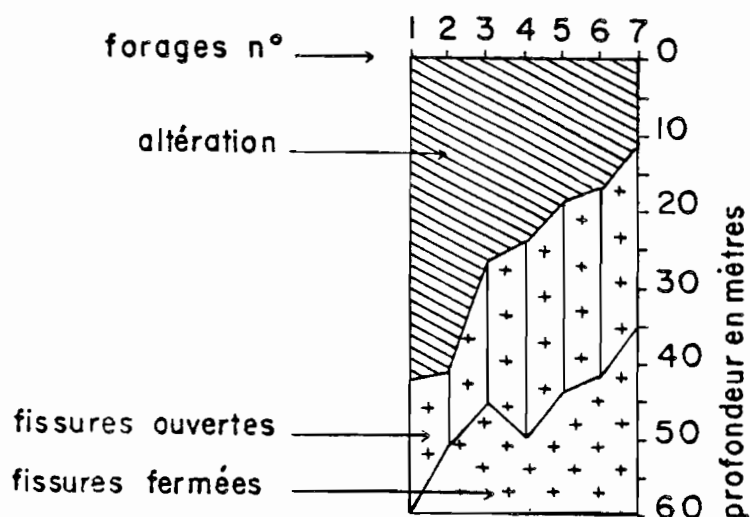


Fig. 33 - Epaisseur de la zone décomprimée établie d'après des données de forage. Variation en sens inverse de l'épaisseur de la couverture altérée (d'après ENGALENC, 1975).

La zone décomprimée conditionne l'ouverture et l'alimentation en eau des zones fissurées. En-dehors de la zone de décompression, certaines fractures, en petit nombre, peuvent être ouvertes à de grande profondeur au-delà du front de décompression.

3.3. Caractéristiques du milieu fissuré

a) Distinction entre milieu poreux et milieu fissuré

Les aquifères du milieu fissuré sont, de l'avis de nombreux auteurs (VAUBOURG, 1980 ; ENGALENC, 1978), des aquifères discontinus à faible extension latérale.

En général, on parle de milieu fissuré par opposition au milieu poreux, le caractère discontinu du premier s'opposant au caractère continu du second."(---) le milieu sera considéré comme fissuré si on peut localiser des surfaces de cheminement bien délimitées et immuables, les fissures" (VAUBOURG, 1980).

L'aquifère est hétérogène et anisotrope. L'eau circule dans les interruptions de la roche qui sont multiples et très variées en nature et en volume. Chaque réseau de fracture possède une porosité et une perméabilité de fissure qui lui sont propres et qui sont dépendantes de la largeur des fissures, du degré du colmatage et de la profondeur.

b) Perméabilité et porosité du milieu fissuré

* Perméabilité

Les conditions réelles de l'écoulement souterrain en milieu fissuré, discontinu et hétérogène ne permettent pas l'application directe de l'équation générale de l'hydraulique souterraine définie en milieu continu, homogène et isotrope.

La conductivité hydraulique K de ces milieux dépend non seulement de la largeur des fissures, de leur remplissage mais aussi de l'espacement moyen entre les fissures. VAUBOURG (1980) définit la perméabilité intrinsèque des fissures qui est donnée par la formule :

$$k_f = \frac{n b^3}{12 l} \quad \left| \begin{array}{l} k_f : \text{perméabilité intrinsèque en darcy} \\ b : \text{épaisseur de la fissure en mm} \\ l : \text{largeur de la fissure en m} \\ n : \text{nombre de fissures.} \end{array} \right.$$

Les perméabilités calculées d'après cette formule sont :

$$b = 0,1 \text{ mm} \quad l = 1 \text{ m} \quad n = 2 \rightarrow k_f = 1,7 \cdot 10^{-1} \text{ darcy} \rightarrow K = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$b = 1 \text{ mm} \quad l = 1 \text{ m} \quad n = 10 \rightarrow k_f = 830 \text{ darcy} \rightarrow K = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

On s'aperçoit donc que la gamme de perméabilité des milieux fissurés peut être extrêmement variable selon que l'on ait une ou plusieurs fractures et que leur ouverture est plus ou moins grande.

* Porosité

En supposant que la fracturation découpe la roche en blocs cubiques de côté a , l'épaisseur des fissures étant b , VAUBOURG (1980) définit la porosité ϕ du milieu fissuré par $\phi = \frac{3b}{a}$. Des calculs faits avec différentes valeurs pour a et b , donnent des porosités assez faibles (de l'ordre de 0,3 % à 0,03 %).

Les caractéristiques hydrodynamiques du milieu fissuré sont donc variables selon la densité du réseau de fractures et leur degré d'ouverture. Le tableau 4 donne des ordres de grandeur de la perméabilité et de la porosité du milieu fissuré dans différents contextes géographiques et pour différentes unités lithologiques.

Pays	Contexte géologique	Perméabilité	Porosité
<u>Brésil</u> (Rebougas, 1965)	Schistes argileux Schistes siliceux Granites Quartzites		0,54 à 0,70 % 0,22 à 0,91 % 0,22 % 0,84 %
(Siqueira, ?)	Porosité totale utile		5 à 10 % (estimation)
<u>France</u> (Linnifoff, 1953)	Matrice granitique Embréchite Granite Micaschiste		0,6 % 1,3 % 2 à 2,6 % 0,3 % } Porosité totale
(Avias, 1975)	Gneiss en surface Gneiss en moyenne	$2,4 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ $0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	$2 \cdot 10^{-2}$ (porosité utile) 10^{-3}
<u>Afrique du Sud</u> (Frommurze, 1953)			0,7 %
<u>Madagascar</u> (Biro, 1965)	Granites stratoïdes		0,01 %
<u>U.S.A.</u> (Stewart, 1962)	Gneiss profond	$0 \text{ à } 0,3 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$	< 1 à 1,28 %

Tableau 4 - Estimation de perméabilité et de porosité en milieu fissuré.
(Extrait d'ENGALENC, 1978).

Les socles cristallins montrent une grande variété de faciès : roches plutoniques, roches métamorphiques, etc... Le tableau ci-dessus montre dans l'ensemble des porosités très faibles. Aussi le milieu fissuré peut constituer pour les régions de socle, des aquifères appréciables, s'il est bien alimenté.

3.4. Structure de l'aquifère fissuré

En zone granitique ou en domaine birrimien la fracturation en région de socle est importante. L'aquifère en milieu fracturé est très hétérogène et anisotrope. L'eau souterraine circule dans les interruptions de la roche qui sont de nature et de volume variés (fig. 34).

D'après la figure 34 donnant la structure schématique d'un aquifère de fracture (ENGALENC, 1978) on peut distinguer divers niveaux productifs en fonction de la profondeur :

- un premier niveau s'observe entre 0 et 30 mètres de profondeur. Ce niveau correspond à la zone d'action de la décompression superficielle, en particulier sur les joints horizontaux. Le niveau 0-30 mètres constitue le niveau le plus poreux car les fissures verticales sont connectées par les joints horizontaux. C'est la zone d'infiltration, de circulation et d'emménagement des eaux.
- un deuxième niveau s'observe entre 30 et 40 mètres environ. Ce niveau correspond, à peu près, à la limite de fermeture des joints secondaires (40 mètres). De nombreuses fissures principales, celles qui sont inclinées en particulier, se referment après cette zone.
- un troisième niveau se situe vers 60 mètres de profondeur. Dans ce niveau, la quasi totalité des fissures sont jointives et deviennent virtuelles. Au-delà, seules ne subsistent que quelques fractures majeures correspondant à des accidents majeurs ou à des zones broyées.

Dans les zones de socle, il faut noter que seul le premier niveau est généralisé. Ce niveau et l'aquifère fissuré en général, se développent sous un épais manteau d'altération et présentent donc une épaisseur variable sous cette couverture.

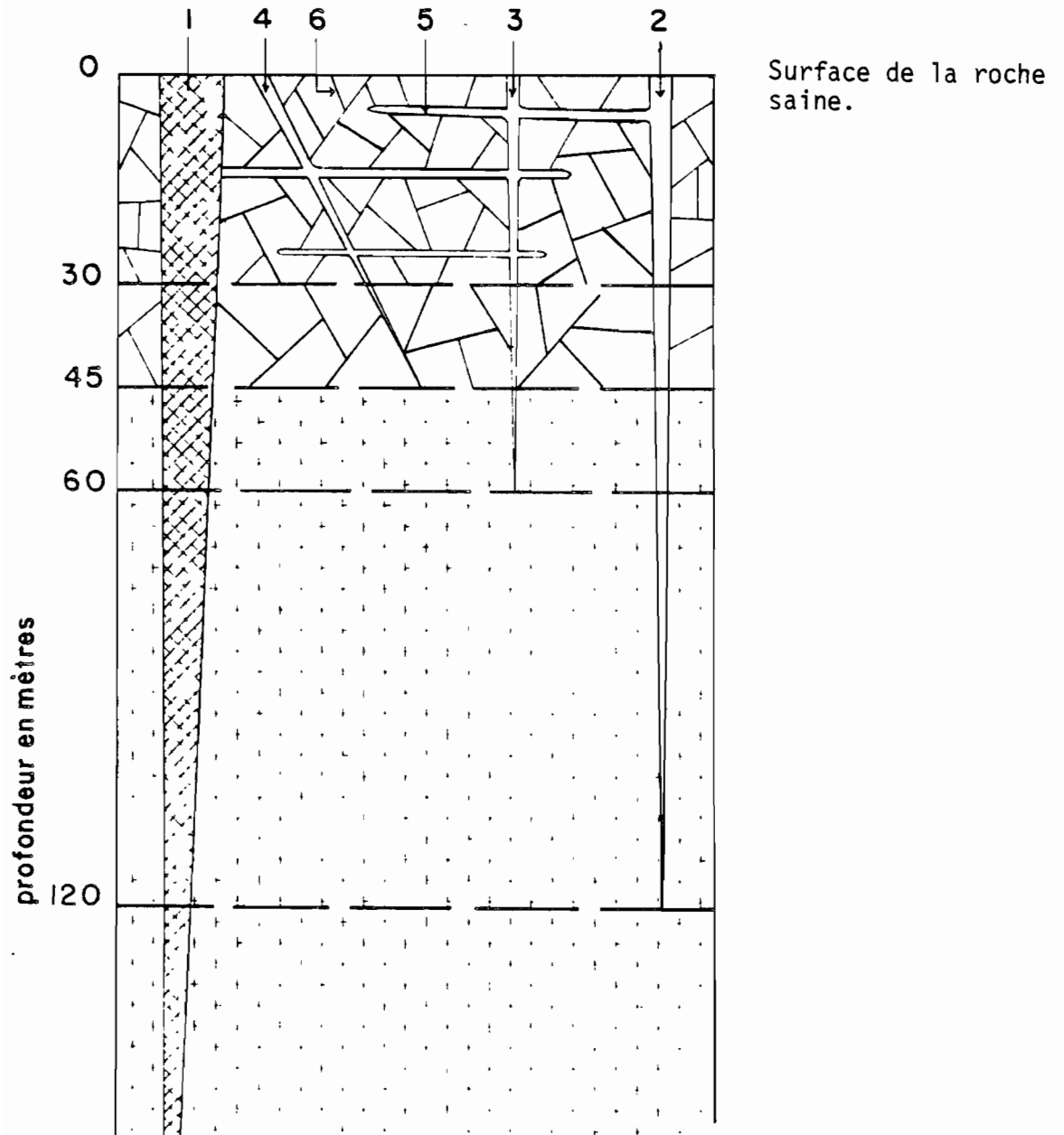


Fig. 34 - Structure schématisée d'un aquifère de fissures (ENGALENC, 1978).

- 1 - Zone broyée
- 2 - Accident majeur
- 3 - Joint principal multikilométrique
- 4-6 - Joints secondaires
- 5 - Joints horizontaux

IV - CONCLUSION SUR LE CHAPITRE II

Les ressources en eaux souterraines des régions de socle en particulier en Haute-Volta, sont donc liées à deux zones principales :

- La zone d'altération. C'est le domaine de la couverture d'altérites dont les différents niveaux renferment de faibles quantités d'eau. Seulement ces altérites sont souvent très riches en argiles, ce qui a pour conséquence de leur conférer une faible porosité efficace (de l'ordre de 5 à 6 %) et de très faibles perméabilités (de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-7} m/s).

- La zone fracturée. Les fractures dans les régions de socle permettent, si elles sont ouvertes, des circulations d'eau importantes (les débits peuvent atteindre la dizaine de m^3/h). Ces circulations de fractures présentent l'avantage d'être enfouies dans de grandes profondeurs (40 mètres et au-delà) et de ce fait sont préservées des fortes évaporations.

Aussi, l'orientation actuelle de la recherche d'eau souterraine s'oriente vers la cartographie des fractures.

CONCLUSIONS SUR LA PARTIE I

Nous venons de présenter le milieu d'étude formé essentiellement

- par une géologie monotone formée de roches cristallines et cristallophylliennes, roches généralement compactes réputées pour leur impossibilité de renfermer de l'eau en quantités exploitables,
- par un climat caractérisé par une concentration des précipitations sur une petite partie de l'année, une zonalité bien marquée et une évaporation très forte,
- une couche d'altérites très épaisse, souvent argileuse qui, si elle est dotée d'une bonne porosité, demeure un assez mauvais aquifère à cause de sa perméabilité très faible.

Depuis quelques années, l'expérience acquise dans ce genre de formations montre que les fractures qui les accompagnent peuvent s'avérer de bons aquifères. Aussi, les hydrogéologues se tournent de plus en plus vers la recherche des zones fracturées dont les méthodes feront l'objet de notre seconde partie.

DEUXIEME PARTIE
LES METHODES D'ETUDE

Chapitre I - LA TELEDETECTION

I - DEFINITIONS

La télédétection ("remote sensing" en anglo-américain) regroupe "l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci". (J.O. de la République française, décembre 1980).

FONTANEL A. et GUY M. (1973) désignent par télédétection "un ensemble de techniques mises en oeuvre à partir d'avions, de ballons, de satellites dont le but est d'étudier soit la surface de la terre (ou d'autres planètes), soit l'atmosphère, en utilisant les propriétés des ondes électromagnétiques émises, réfléchies ou diffractées par les différents corps observés".

La télédétection regroupe donc les applications de détection à distance utilisant l'énergie électromagnétique comme porteuse d'informations. C'est une méthodologie scientifique homogène fondée sur la propagation des ondes électromagnétiques.

Les premiers capteurs de télédétection ont été les chambres photographiques. Avec le développement des techniques, surtout l'apparition des avions, les prises de vue aérienne vont connaître un grand développement et une application très large. Les premières applications de la photographie aérienne ont d'abord été militaires. Mais très vite la photo-interprétation trouvera de nombreuses applications dans la cartographie et dans la recherche des ressources terrestres. Ces applications s'étendront plus tard à d'autres domaines d'application géologique comme l'hydrogéologie.

Depuis une vingtaine d'années, ont été mis au point une série d'appareils à balayage capables de recueillir l'énergie électromagnétique dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge jusque vers 15 micromètres. C'est ce matériel, embarqué à bord de satellites, qui a donné à la télédétection une efficacité optimale. C'est un nouvel outil dans l'étude des ressources terrestres.

L'interprétation des images satellites (ou de satellite) ne nécessite pas obligatoirement une connaissance approfondie de la télédétection. Cependant, il paraît utile, pour une bonne compréhension de l'étude, de rappeler quelques bases physiques.

II - BASES PHYSIQUES DE LA TELEDETECTION

2.1. Rappels

a) Onde électromagnétique

Une onde électromagnétique est représentée par deux vecteurs perpendiculaires indissociables, le champ électrique E et le champ magnétique H de modules et de directions variables périodiquement avec le temps (fig. 35).

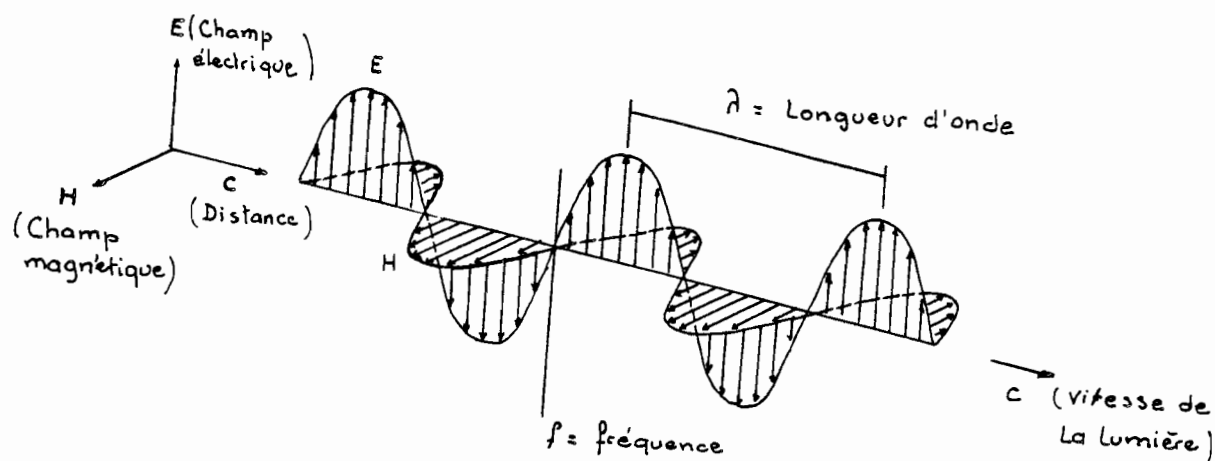


Fig. 35 - L'onde électromagnétique

Ces deux vecteurs définissent le plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

Dans le vide, l'onde se propage à la vitesse de la lumière soit à $c = 3.10^8$ m/sec. Dans un milieu quelconque, la vitesse de propagation est donnée par les équations de MAXWELL et dépend de ϵ (permittivité ou constante diélectrique du milieu) et de μ (perméabilité du milieu).

b) Energie W

L'énergie associée à l'onde électromagnétique est proportionnelle au carré du module du vecteur champ électrique E (ou du vecteur champ magnétique H).

$$W = \epsilon \cdot E^2 = \mu H^2$$

c) Fréquence f

La fréquence de l'onde électromagnétique est donnée par la relation $f = c/\lambda$ avec c = vitesse de la lumière dans le vide, λ = longueur d'onde.

d) Polarisation

Si les vecteurs E et H gardent une direction fixe au cours de la propagation, l'onde est dite polarisée. Lorsque \vec{E} et \vec{H} varient de façon aléatoire au cours de la propagation, l'onde est alors non polarisée.

Une onde électromagnétique est donc caractérisée par trois grandeurs : sa longueur d'onde λ (ou sa fréquence f), son état de polarisation et son énergie.

2.2. Le rayonnement électromagnétique

Nous dirons avec BECKER F. (1978) qu'en télédétection, le rayonnement électromagnétique peut être considéré comme de "l'énergie se propageant sous forme d'ondes vectorielles transversales et interagissant avec la matière tantôt de façon ondulatoire, tantôt de façon corpusculaire suivant la longueur d'onde du rayonnement et du type d'interaction".

L'ensemble des ondes de ce rayonnement constitue le spectre électromagnétique (figure 36).

Le spectre électromagnétique est continu. Sa division en rayons γ , rayons X, ultraviolet, visible, infrarouge et micro-ondes, ondes radio, est essentiellement d'ordre technologique. A chaque domaine correspondent des détecteurs particuliers.

Quand l'onde électromagnétique arrive sur une cible, ses caractères varient suivant le type d'interaction avec la matière. COLWELL (1963) énonce le principe suivant : "l'absorption, l'émission, la diffraction et la réflexion de l'énergie électromagnétique par une certaine matière sont sélectives en fonction de la longueur d'onde et sont spécifiques à cette matière, dépendant en premier lieu de sa structure atomique et moléculaire".

Pour notre étude, la source électromagnétique qui nous préoccupe est une source naturelle : le soleil.

Remarques. La télédétection n'est pas la seule méthode indirecte d'étude des ressources terrestres utilisant les propriétés de l'onde électromagnétique. Signalons que la géophysique utilise aussi quelquefois l'onde électromagnétique. Ses domaines d'application se situent d'abord dans la bande des rayons gamma (c'est le domaine de la scintillométrie) et ensuite à l'extrémité du spectre dans la bande des ondes radio (longueur d'onde supérieure au kilomètre). C'est le domaine de sensibilité des méthodes V.L. F., etc. Ces méthodes géophysiques sont dites méthodes géophysiques électromagnétiques.

2.3. Les ondes utilisées en télédétection

En principe tout le spectre pourrait être utilisé pour l'exploration à distance : de l'ultra-violet aux ondes radio (fig. 36).

Mais le rôle "perturbateur" de l'atmosphère entraîne une mauvaise propagation de ces rayonnements. Seules quelques fenêtres spectrales peu affectées restent utilisables. Il s'agit essentiellement des fenêtres suivantes :

- Le visible et le proche infrarouge (0,4 à 1,1 micromètres). C'est le domaine de la photographie aérienne et plus récemment des appareils à balayage multispectraux.

- L'infrarouge qui comprend deux bandes spectrales utilisables (de 3 à 5 micromètres et de 8 à 14 micromètres). C'est le domaine de l'infrarouge thermique. L'énergie émise et enregistrée est la fonction de la température propre des corps. On parle aussi de thermographie.

- Les ondes milli et centimétriques appelées aussi micro ondes (1mm à quelques mètres). Cette fenêtre est utilisable soit avec des capteurs actifs possédant leur propre source d'illumination (par exemple le radar latéral) soit avec des radiomètres passifs recueillant l'énergie très faible émise par les corps terrestres.

2.4. L'émission du rayonnement électromagnétique

Nous nous intéressons ici à la télédétection passive, c'est-à-dire qu'on se contente de mesurer et d'étudier le rayonnement émis ou réfléchi par un objet. Les sources de rayonnement utilisées sont des sources naturelles (soleil, terre) permettant une exploration passive. Les émissions de la

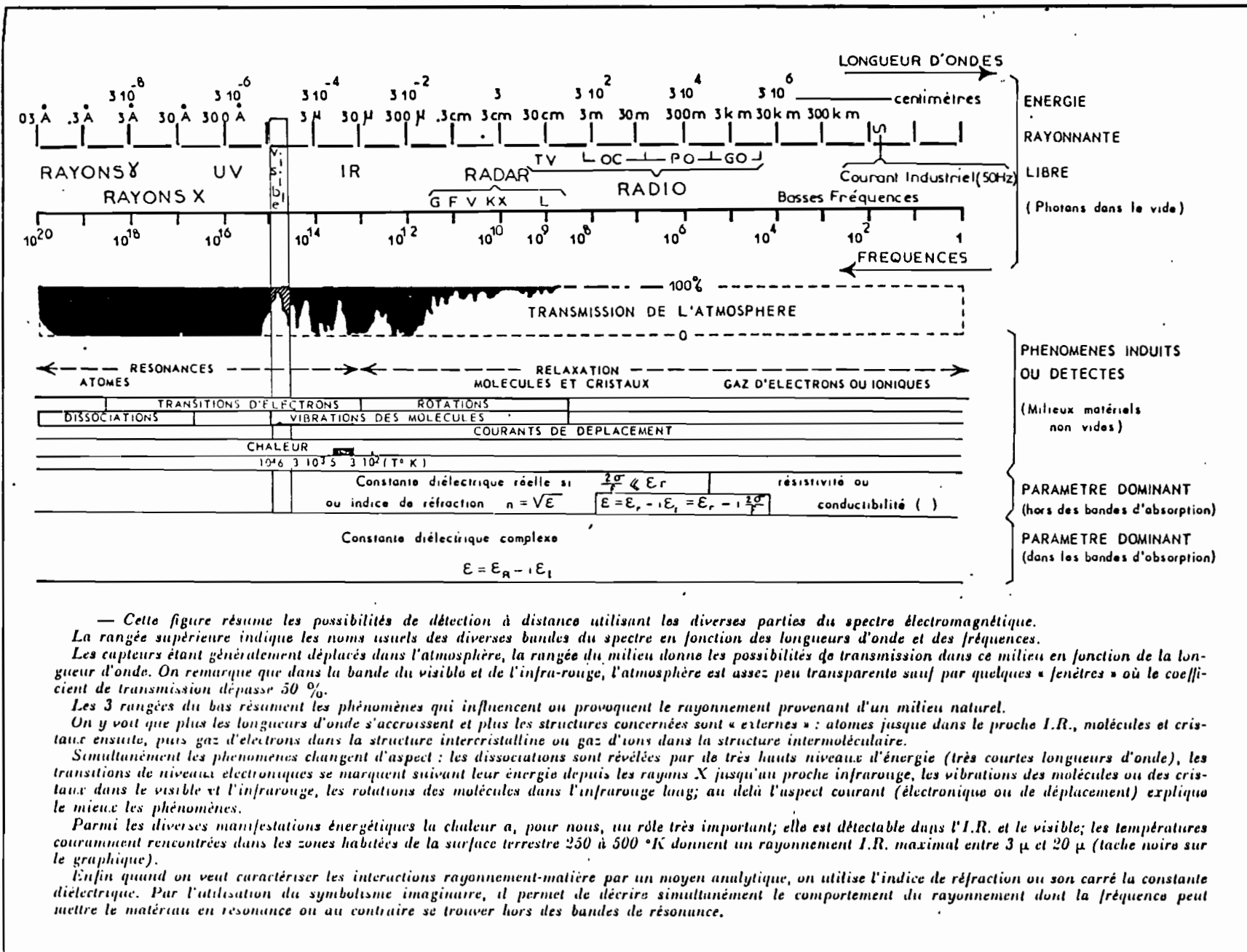


Fig. 36 - Le spectre électromagnétique (d'après M. GUY, 1969)

terre ou du soleil sont de nature complexe mais se rapprochent de celle d'un modèle théorique parfait appelé "corps noir".

- Rayonnement d'un corps noir.

Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu (-273° Celcius = 0° Kelvin) rayonne de l'énergie électromagnétique. Un corps noir est corps théorique capable d'absorber toute l'énergie qu'il reçoit.

L'énergie émise W par un corps noir est reliée à sa température par la relation de Stefan-Boltzmann

$$W = \sigma T^4$$

$$\text{où } \sigma = \text{constante de Stefan} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-4}$$

La figure 37 montre la répartition spectrale de l'énergie rayonnée par un corps noir à différentes températures. Cette répartition est obtenue par l'équation de Planck.

$$W = \frac{2h \cdot c^2 \cdot \lambda^{-5}}{\exp(hc/\lambda \cdot Kt) - 1}$$

où W = Energie émise par unité de surface à la longueur d'onde λ

h = Constante de Planck $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J. sec

K = Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J.K.

T° = Température absolue (en °K)

c = Vitesse de la lumière dans le vide $c = 304.000 \text{ kmS}^{-1}$

On déduit par dérivation la loi de Wien qui relie la longueur d'onde au maximum de rayonnement à la température du corps noir

$$\lambda_{\text{max}} T = 2897 \text{ } \mu\text{m } ^\circ\text{K}$$

La droite joignant les maxima correspond à l'approximation de Wien.

- Soleil

Le soleil est assimilé à un corps noir à la température de 5900-6000 °K (fig. 38). La répartition spectrale de cet énergie solaire peut être connue grâce à la loi de Planck.

La figure 39 montre que le maximum d'émission du soleil se situe à la longueur d'onde approximative de 0,48 μm - 0,55 μm c'est-à-dire correspondant aux radiations jaune-verte.

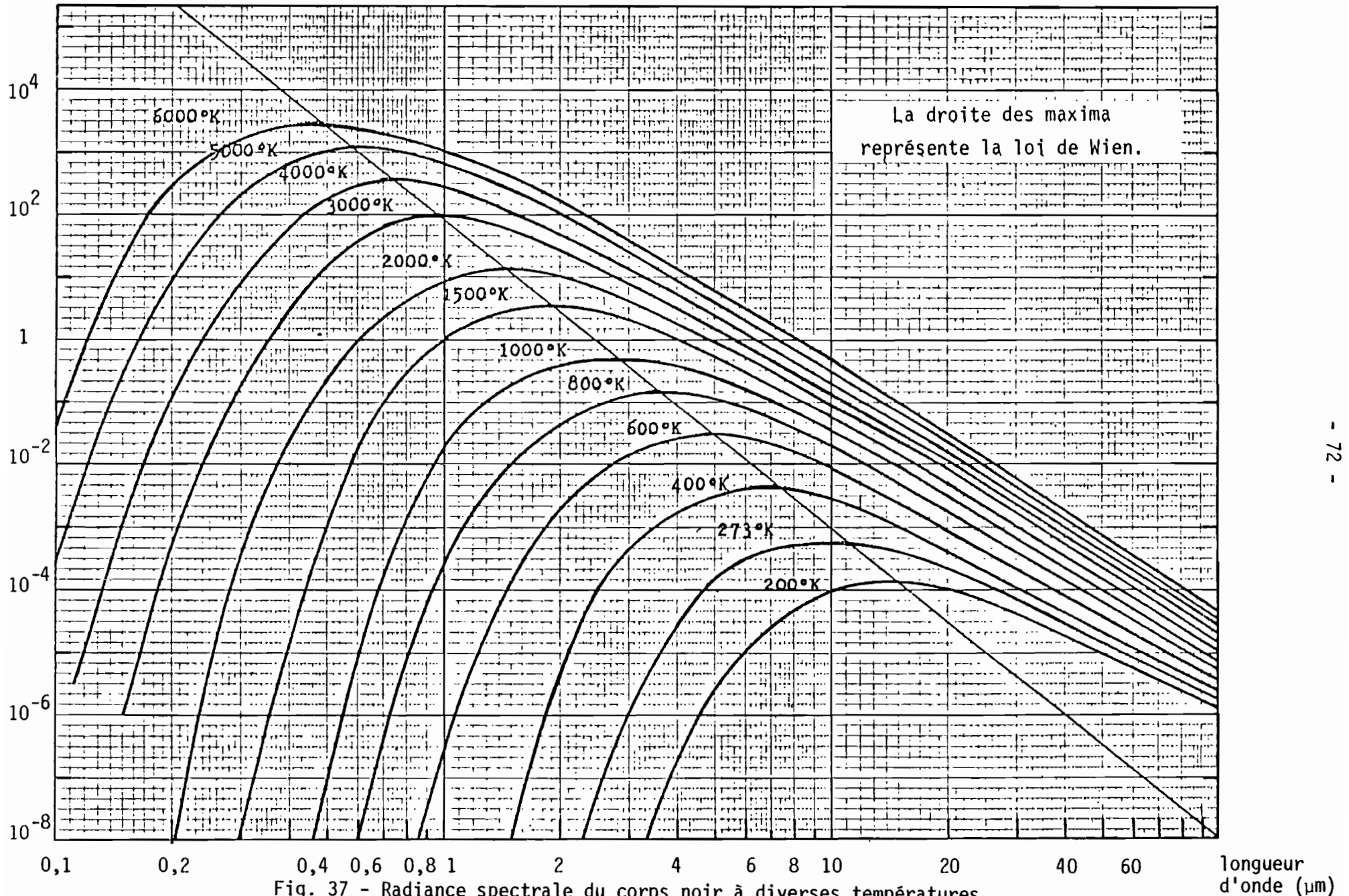


Fig. 37 - Radiance spectrale du corps noir à diverses températures.
(Handbook of Geophysics)

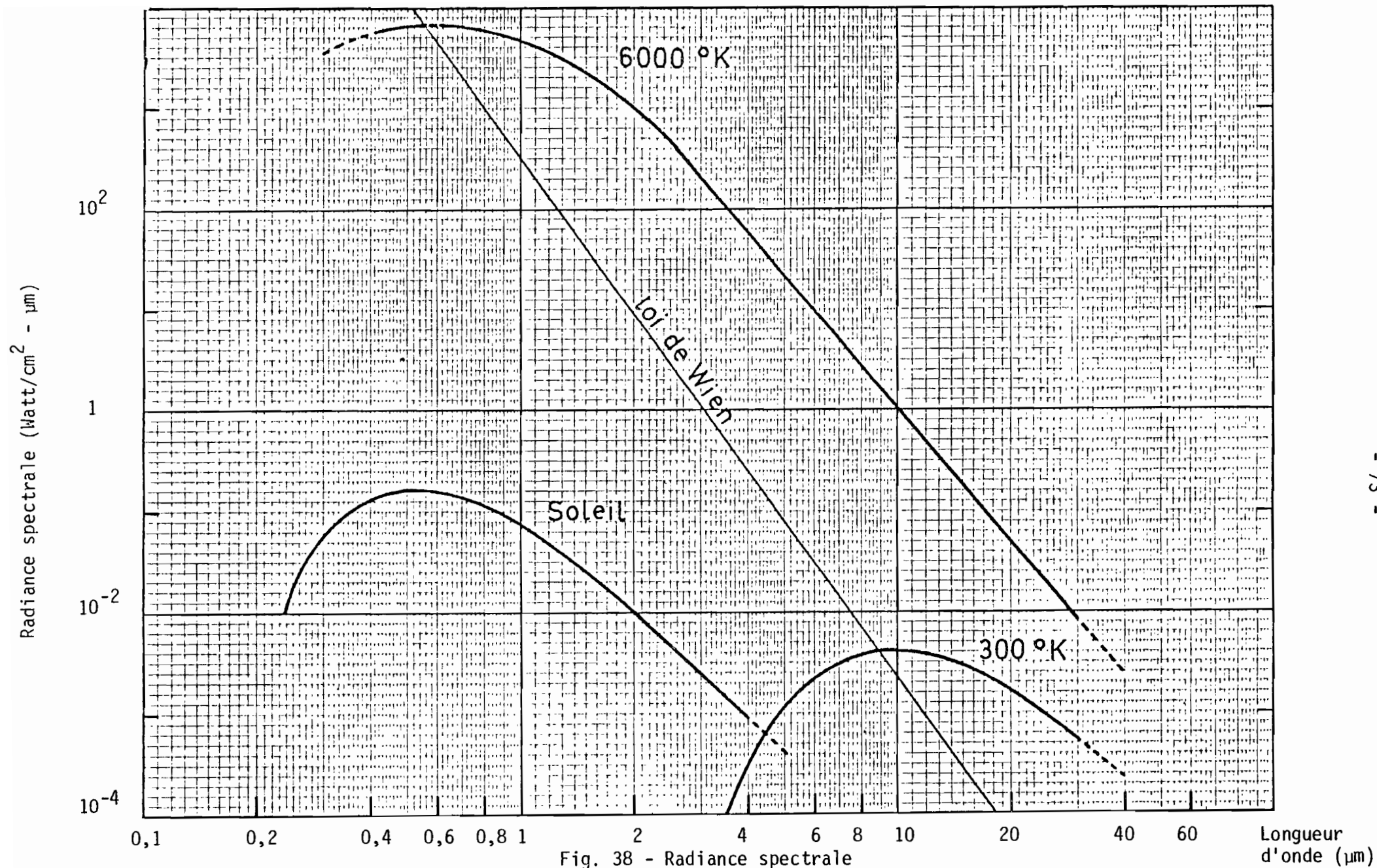
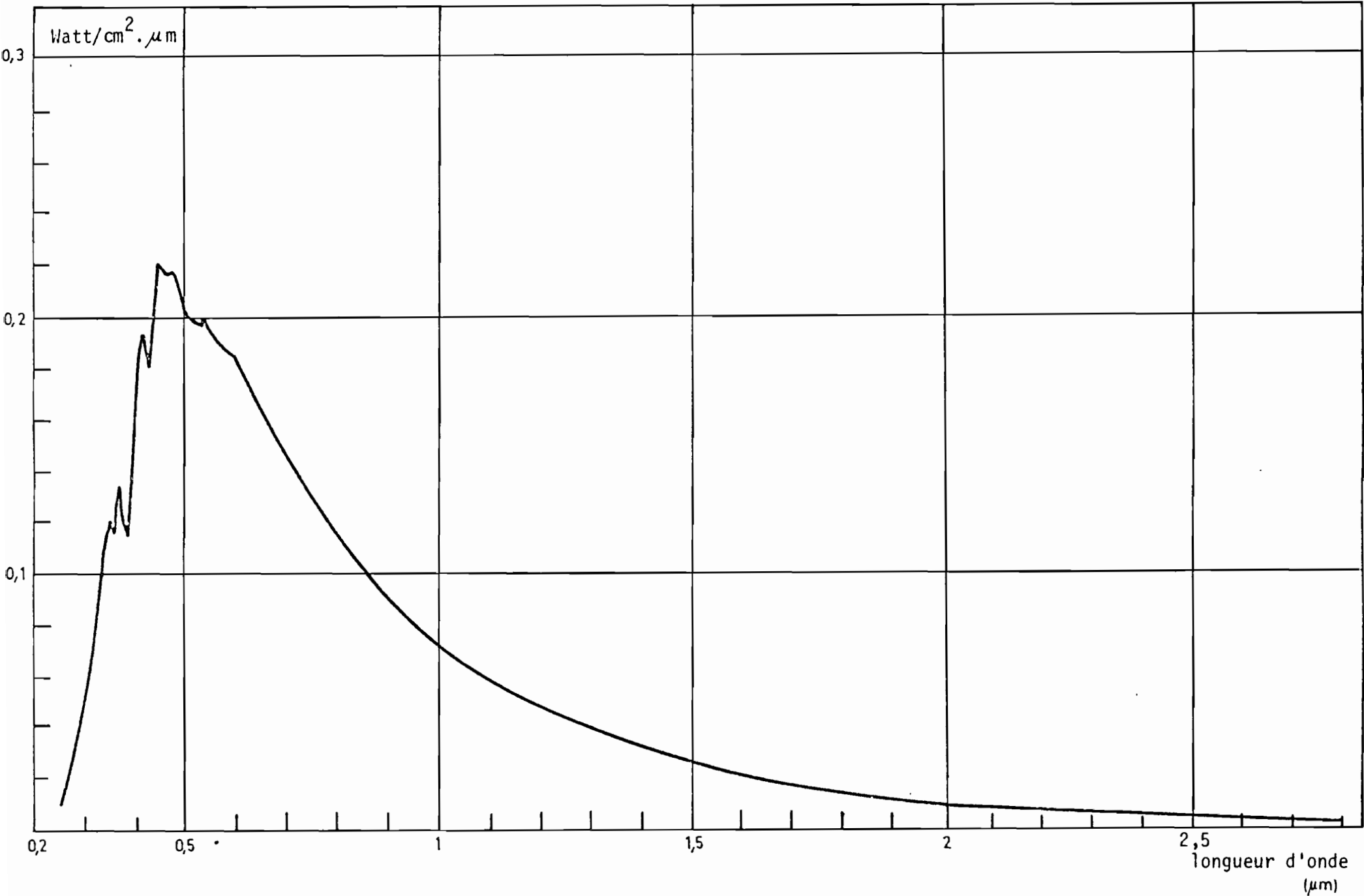


Fig. 38 - Radiance spectrale
 - du CN à 6000° K (soleil) et 300° K (Terre)
 - du soleil au niveau du sol (Handbook of Geophysics)



- 74 -

Fig. 39 - Radiance spectrale du soleil (Solar Radiation).

- Terre

La terre se comporte comme le soleil en émettant un rayonnement. Mais du fait de sa température très basse (300°K), le spectre du rayonnement est décalé dans l'infrarouge (fig. 38). Son maximum d'émission se situe vers 10 μm .

2.5. L'énergie mesurée

Le rayonnement électromagnétique reçu aux capteurs est caractérisé par la source lumineuse, l'atmosphère de propagation et la surface sur laquelle il est réfléchi.

Les diverses quantités d'énergie mesurées en télédétection dépendent de la structure moléculaire ou atomique des matériaux de la surface terrestre.

On peut les résumer dans les définitions suivantes :

- absorbance : rapport de l'énergie absorbée à l'énergie incidente.
- transmittance : rapport de l'énergie transmise à l'énergie incidente.
- réflectance spectrale : rapport de l'énergie réfléchie sur l'énergie incidente pour un petit domaine de longueur d'onde donnée.

III - ACQUISITION DES DONNEES DE TELEDETECTION

3.1. Les photographies aériennes

Elles constituent la première forme de données de télédétection. La photographie aérienne correspond à l'enregistrement d'une partie des radiations du spectre solaire réfléchie par une portion de la surface terrestre. Cet enregistrement se fait sur une "surface sensible" par l'intermédiaire d'un objectif. L'axe optique de l'appareil est généralement maintenu vertical.

Le "capteur" photographique est généralement une chambre photogramétrique qui a des caractéristiques géométriques très rigoureuses. Les prises de vue avec un certain recouvrement (50 %) permettent l'observation stéréoscopique.

Plusieurs paramètres permanents déterminent les caractéristiques d'une photographie aérienne. Ce sont :

- l'échelle de la photographie
- le type de chambre photographique
- le format du document
- l'importance du recouvrement
- = la nature de l'émulsion employée.

Tous ces paramètres sont largement étudiés dans des ouvrages spécialisés.

3.2. Les images radiométriques

Les images radiométriques sont obtenues à partir de capteurs permettant d'enregistrer l'énergie émise ou réfléchi par la surface terrestre.

Les domaines d'intervention des différents types de capteurs sont résumés dans le tableau ci-dessous.

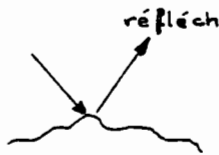


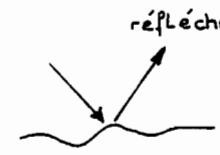
VISIBLE	INFRAROUGE THERMIQUE	MICRO-ONDES	
Réflexion	Emission		
			
Photographie Scanner	Scanner IR	Radiomètre Scanner	Radar

Tableau 5 - Les différents capteurs de télédétection.

Le principe de fonctionnement des capteurs électromagnétiques ou radiomètres à balayage (ou scanner) repose sur un miroir dont le mouvement s'effectue soit par rotation (système aéroporté) soit par simple oscillation (système Landsat).

Le satellite français SPOT* sera équipé d'un capteur plus original. On va remplacer le balayage mécanique par l'emploi de barettes de cellules photosensibles (type PUSH-BROOM) dont le balayage est électronique donc sans pièce mobile.

Les données de base obtenues avec ces capteurs se présentent sous deux formes :

- soit sous forme de bandes magnétiques enregistrées en mode analogique ou numérique,
- soit sous forme de photographies issues de la lecture des bandes et dont la forme dépendra du film et du logiciel utilisés.

* SPOT : Système Probatoire d'Observation de la Terre.

IV - LANDSAT ET ETUDE DES RESSOURCES TERRESTRES

4.1. Les caractéristiques des satellites LANDSAT

Le premier satellite* dont la mission était l'étude des ressources terrestres a été mis sur orbite le 22 Juillet 1972 par la N.A.S.A. (1) sous le sigle de E.R.S.T (2) et rebaptisé LANDSAT 1. Deux autres satellites, LANDSAT 2 et 3 ont été lancés respectivement en Janvier 1975 et en Mars 1978. Très prochainement, un autre satellite LANDSAT D sera mis en orbite par la N.A.S.A.

LANDSAT est placé sur une orbite quasi-polaire ayant une inclinaison de 9° par rapport à l'axe des pôles. Grâce à cette légère inclinaison du plan de l'orbite, LANDSAT tourne autour de la terre dans le même sens et avec la même vitesse angulaire que le mouvement apparent du soleil par rapport à la terre.

Cette caractéristique confère à l'orbite un caractère héliosynchrone c'est-à-dire que LANDSAT passe toujours au même point à la même heure locale.

Lancés à une altitude de 920 km, les satellites LANDSAT décrivent une orbite circulaire en 103 minutes, ce qui leur permet d'effectuer 14 révolutions par jour. Le jour suivant ils passent dans la même région sur une orbite décalée de 150 km vers l'Ouest. LANDSAT couvre toute la terre en 18 jours. Le 19^{ème} jour, le satellite repasse sur la trace de l'orbite du premier jour (fig. 40).

4.2. Les capteurs LANDSAT

Le principal capteur ayant régulièrement fonctionné sur LANDSAT est le radiomètre à balayage multi-spectral (MSS : multispectral scanner en anglo-américain) (fig. 41).

Nous disposons pour cette étude d'images fournies par ce capteur. Le radiomètre MSS possède un miroir oscillant. Par le biais de celui-ci, la zone observée est balayée ligne par ligne et point par point. Comme six rangées de cellules ou détecteurs reçoivent en même temps l'énergie transmise par une oscillation du miroir, six lignes de l'image sont reproduites simultanément.

* En fait des images photographiques avaient été obtenues occasionnellement auparavant (Appollo-Germini) et les images des satellites météorologiques utilisées parfois pour étudier la surface terrestre.

N.A.S.A. (1) = National Aeronautic and Space Administration.

E.R.S.T. (2) = Earth Ressources Technology Satellite.

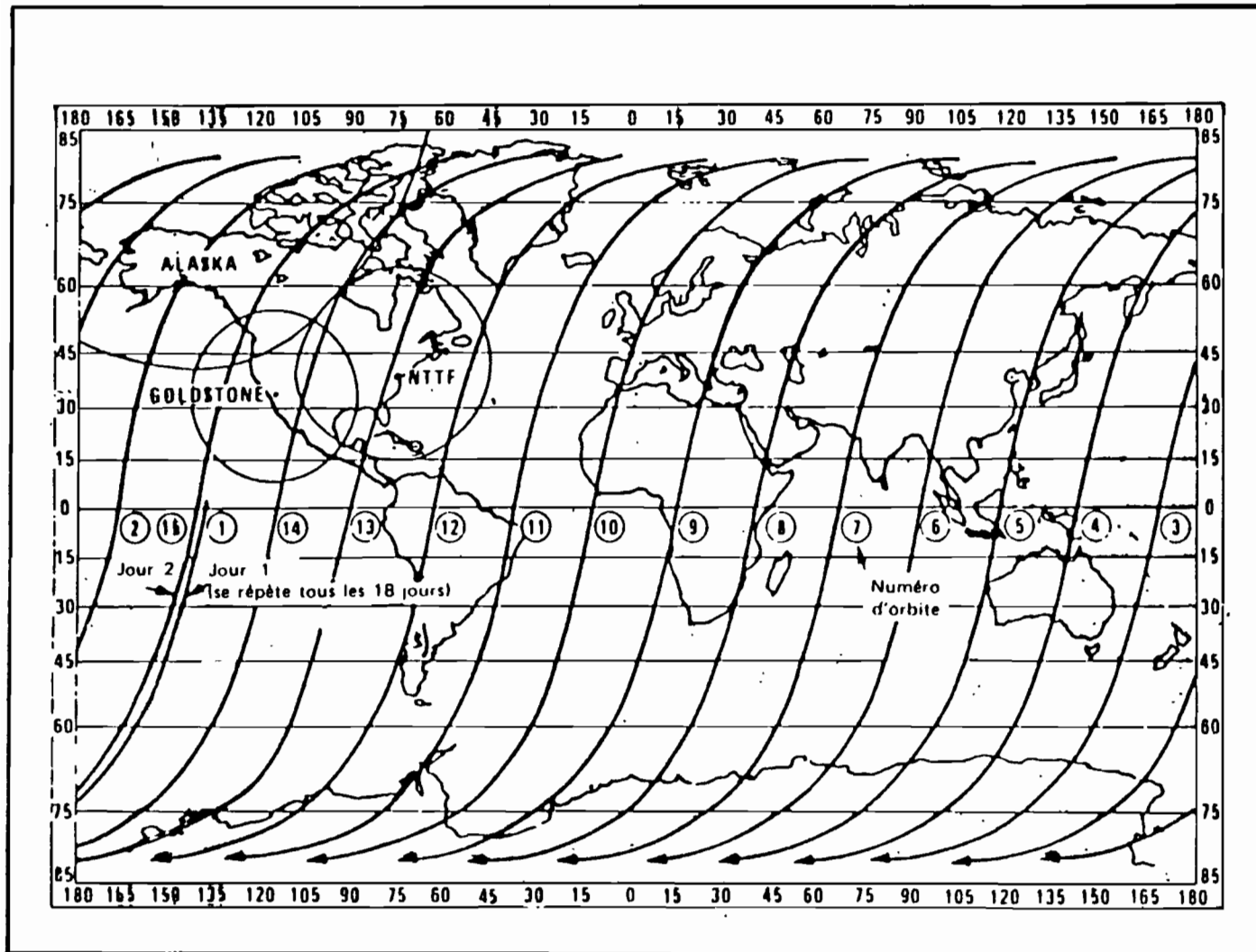


Fig. 40 - Les orbites Landsat.

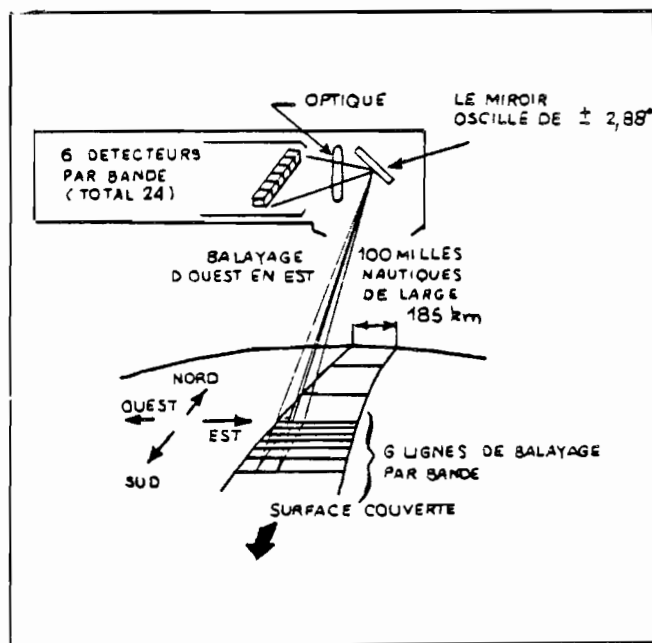


Fig. 41 - Enregistrement par balayage multispectral (d'après le "Data Users Handbook" de la NASA).

A la surface de la terre, ces 6 lignes constituent une bande d'une largeur de 474 m (chacune ayant 79 m de large) sur 185 km de long.

Pendant le cycle suivant du miroir, le satellite se sera déplacé de 474 m, ce qui permettra le balayage de 6 nouvelles lignes. L'image obtenue est donc formée d'une série de lignes jointives.

Chaque ligne de l'image ainsi réalisée est constituée d'une série de points élémentaires ou pixels* (de l'anglo-américain "picture element"). Chaque pixel est codé par 8 signaux binaires, ce qui permet de discerner $2^8 = 256$ niveaux d'éclairement pour un pixel donné. Ces valeurs sont réparties entre 0 et 255 et représentent des tons de gris (0 = noir et 255 = blanc).

Comme une scène couvrant une superficie de 185 km x 185 km est formée de 2340 lignes et que chaque ligne est elle-même formée de 3228 pixels, on s'aperçoit qu'une image est constituée par la juxtaposition de 2340 x 3228 pixels. Chaque pixel apparaît donc avec une longueur de 79 m et une largeur de 57 m.

* Ne pas confondre avec la résolution de l'optique (IFOV) qui est de 80 m.

De plus, avant de parvenir aux détecteurs, la lumière est filtrée en 4 bandes spectrales (ou 4 canaux). Ainsi au lieu d'une image, c'est 4 images qui sont obtenues sur une même zone (2 dans le visible et 2 dans le proche infrarouge).

Canal	Longueur d'onde en μm	Couleur spectrale
4	0,5 à 0,6	Vert Jaune
5	0,6 à 0,7	Orange Rouge clair
6	0,7 à 0,8	Rouge foncé Proche infrarouge
7	0,8 à 1,1	Infrarouge

Tableau 6 - Présentation des canaux.

Les données recueillies sont : soit retransmises directement au sol lorsque le satellite est en vue d'une station (le rayon de réception autour d'une station de réception est d'environ 3000 km), soit stockées à bord dans deux enregistreurs vidéo (Wideband Video Tape Recorder).

Plus de détails pourront être obtenus dans le "Landsat Data Users Handbook" (NASA, 1972).

Il faut signaler que le capteur MSS n'est pas le seul capteur à bord de LANDSAT. Un autre capteur, le RBV (Return Beam Vidicon) a été mis aussi à bord des satellites LANDSAT. Ce dernier a fonctionné au début de LANDSAT 1 et régulièrement sur LANDSAT 3.

4.3. Les données LANDSAT

Rappelons que les données de satellites se présentent soit sous forme de bandes numériques, soit sous forme d'images photographiques obtenues à partir des précédentes.

L'utilisateur pourra utiliser soit l'un ou l'autre de ces produits selon qu'il dispose d'un atelier photographique ou d'un système de traitements numériques d'images.

Pour notre étude, nous allons surtout nous servir d'images photographiques. Celles-ci présentent les caractéristiques suivantes :

- L'homogénéité car elles sont généralement prises entre 9 h et 10 h locales suivant la latitude sur le même méridien.
- L'éclairement. L'orbite LANDSAT étant héliosynchrone, l'incidence des rayons solaires est la même pour deux images (entre 12° et 45°) suivant la latitude et la saison. Les variations de cette incidence font mieux ressortir les traits morphologiques.
- Les déformations géométriques. Elles sont très faibles ; chaque image correspond à une projection presque verticale.

Une image est identifiée par 3 caractères :

- le numéro de l'orbite
- le rang de la scène sur l'orbite
- la date de l'enregistrement de la scène.

Exemple : image 209-52 du 6 Novembre 1975.

V - ETUDE DE L'IMAGE SATELLITE

5.1. Introduction

La télédétection n'est pratiquement pas utilisée en Afrique de l'Ouest pour l'étude de la fracturation. On le comprend très bien car l'image de satellite est encore inconnue et donc peu de techniciens savent s'en servir. Pourtant elle semble se prêter mieux à l'étude de la fracturation et des différentes unités morphologiques ; ceci à cause de sa très petite échelle.

Rappelons que les images que nous allons exploiter proviennent du satellite américain LANDSAT. Leur principe d'acquisition est exposée au paragraphe IV.4.2. L'énergie enregistrée permet, grâce à de multiples traitements par ordinateur, d'obtenir une image photographique directement interprétable.

L'utilisateur peut disposer ainsi d'un document simple sur lequel il peut travailler même sur le terrain.

5.2. Choix de l'image

La première étape de l'étude de l'image satellite repose sur le choix de celle-ci en fonction du thème de l'étude.

Les images sont mises à la disposition des utilisateurs par les centres de réception des données sous forme généralement d'une liste sur laquelle figurent les principales caractéristiques : orbite, rang, date, canal, etc... (tableau 7).

Pour notre étude, nous avons choisi parmi les images disponibles au C.R.T.O. (fig. 42). Les images choisies sont celles de saison sèche (le mois de mars de préférence). Deux raisons justifient ce choix : d'une part la présence de nuages sur les images de saison humide masquant la surface du sol et d'autre part la réduction des phénomènes végétatifs durant ce mois.

Un autre critère de sélection porte sur la qualité de l'image. Ce choix s'est avéré difficile car nous n'avons que des images non traitées au CRTO, dans lesquelles le lignage est souvent trop apparent et les contrastes trop faibles.

Pour chaque scène, l'expérience montre que les images des canaux 5 et 7 présentent les meilleurs contrastes. Seules ces bandes spectrales ont été retenues pour notre étude et quelquefois nous avons utilisé des images en composition colorée pour la compléter (tableau 8).

Scène	Date	Canal	Canal utilisé pour l'interprétation		
			Hydrographie	Géologie	Linéaments
209-51	6.11.1975	C.C.	-	-	-
	26.3.1976	5-7	5	7	5-7
	14.7.1978	4-5-7	-	-	-
209-52	19.3.1978	5-7	5	-	5-7
210-51	7.11.1975	C.C.	-	-	C.C.
	25.11.1975	5-7	5	-	5-7

Tableau 8 - Liste des images utilisées.

ORBITE PATH	RANG ROW	DATE	QUALITE QUALITY	NUAGE CLD. COVER	BANDES BANDS
190	50	22-9-72			45 7
195	62	9-3-79	8888	0%	45 7
	63	14-8-78	5888	10%	45 7
197	51	15-2-75	5858	0%	45 7
	52	11-1-73	8888	0%	45 7
	53	7-1-79	5858	0%	5 7
	54	20-12-78	8828	0%	45 7
198	50	21-9-73	8828	50%	4567
	51	8-10-75	5880	0%	456
	52	21-9-73	8888	60%	4567
		8-8-78	8858	10%	45 7
199	50	27-9-72	8888	0%	45 7
	51	22-9-73	2282	20%	4567
		13-12-78	5888	0%	45 7
	52	22-9-73	2282	10%	4567
200	51	23-9-73	0088	10%	67
	52	23-9-73	8088	10%	4 67

Tableau 7 - Mode de présentation des images.
(Extrait du listing du CRT0).

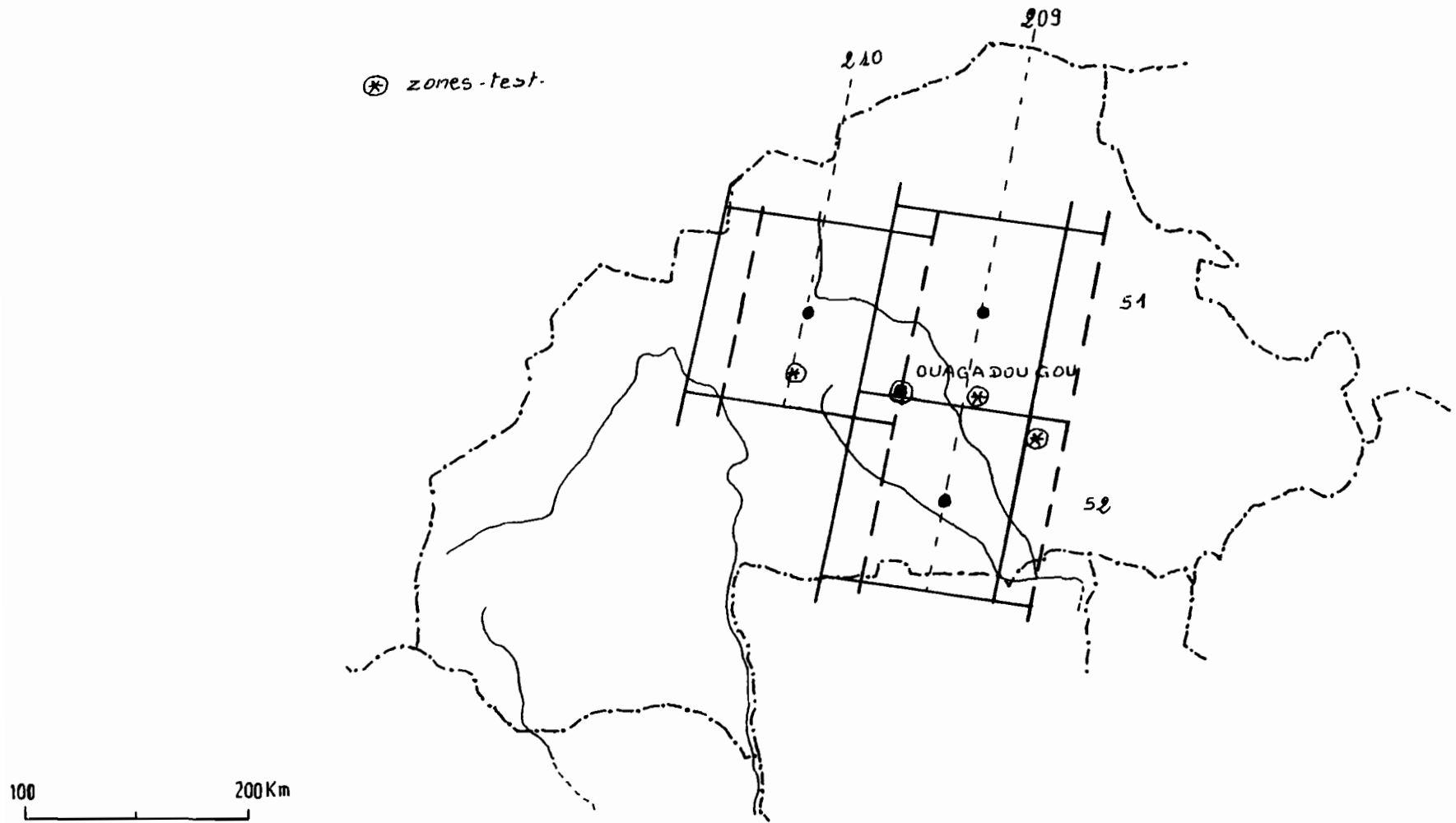


Fig. 42 - Croquis de situation des scènes Landsat.

5.3. Interprétation des documents bruts*

a) Les problèmes

L'interprétation consiste en la reconnaissance et en l'identification des unités de la surface terrestre, selon la méthode de la photointerprétation classique. Elle est fondée sur l'analyse des textures et structures de l'image.

Dans le cas de notre étude, cette analyse est menée sur les deux images des canaux choisis. On remarque dans les deux cas que :

- les informations liées aux linéaments restent constantes,
- seules les tonalités changent.

L'identification des unités de surface se fonde sur l'étude des niveaux de gris (tonalité). La méthode atteint très vite ses limites du fait qu'à un niveau de gris peuvent correspondre plusieurs types d'unités et inversement une même unité peut être reflétée par des niveaux de gris différents.

Les risques de confusion deviennent donc importants non seulement à cause de la petite échelle de l'image mais aussi par l'homogénéité de la surface d'altération en zone intertropicale. Aussi l'emploi de l'image satellite devient difficile dès lors que l'on veut comparer son interprétation à la réalité du terrain.

Toutefois ces risques de confusion ne réduisent nullement l'intérêt des images brutes pour l'étude des linéaments.

b) Comparaison multispectrale

Le canal 5 (photo 5) qui correspond au rouge clair apparaît plus contrasté. Cette bande permet de mettre en évidence les phénomènes liés à l'humidité (végétation). En effet l'examen des images de ce canal montre des tons de gris sombre sur les endroits boisés (cours d'eau par exemple) correspondant à une absorption du rayonnement rouge par la végétation chlorophyllienne alors que ces mêmes zones ressortent en gris clair sur le canal 7 par suite d'une forte réflexion du rayonnement infrarouge par les feuilles des végétaux. Elle a donc été utilisée pour l'analyse des phénomènes géologiques liés à la végétation. Dans les régions intertropicales, les autres unités du paysage sont difficilement identifiables. Néanmoins les linéaments soulignés par la végétation (cours d'eau) apparaissent avec netteté.

* documents bruts : images noir et blanc non traitées.

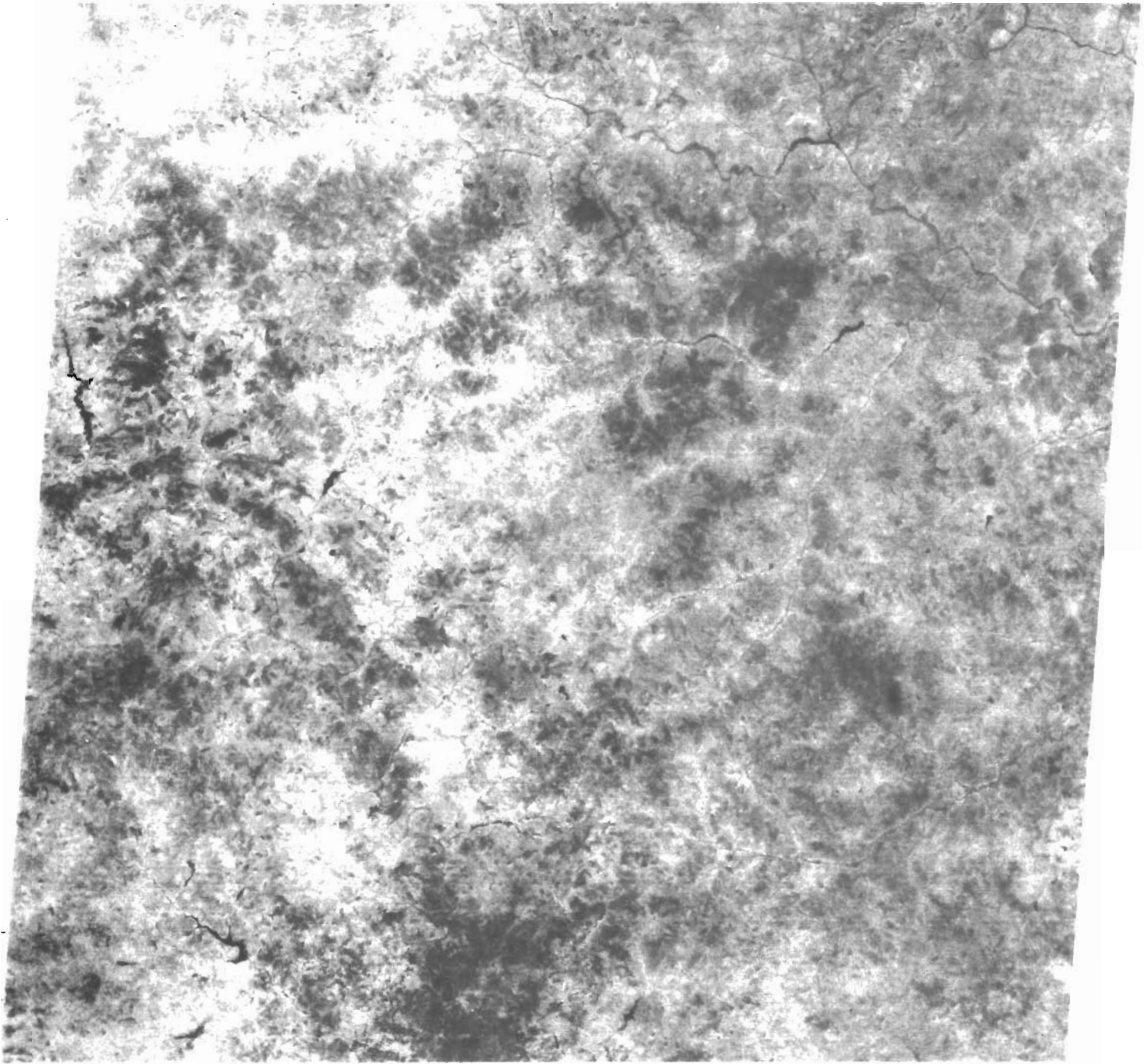


Photo 5 - Canal 5 de la scène 209-51 du 29 mars 1976.

Alors que sur le canal 5, l'eau se distingue mal de la végétation, sur le canal 7 (photo 6), elle apparaît distinctement par sa teinte noire due à une absorption presque totale du rayonnement infrarouge. Il semble aussi que cette bande présente un meilleur contraste pour l'étude de la géologie mais ce n'est pas le cas dans notre contexte.

Les sols, en particulier les sols nus, ressortent dans les tons plus ou moins clairs sur les deux canaux tandis que les zones cuirassées ressortent dans des teintes plus sombres sur le canal 7 que sur le canal 5.

Ainsi en région intertropicale où les altérites masquent les structures, l'image satellite apparaît précieuse pour l'étude des linéaments.

c) Méthodes de travail

L'étude analytique a consisté à relever tous les alignements visibles sur l'image. A partir des images (films) négatifs au 1/1.000.000 disponibles au CRT0, des tirages sur papier ont été effectués :

- à l'échelle du 1/500.000 pour la zone de Tensobentenga ;
- à l'échelle du 1/200.000 pour Mogtedo et Pilimpikou.

Sur chacun de ces documents, les linéaments ont été analysés sur un papier calque. L'examen des images s'est fait :

- soit sous stéréoscope à miroir à partir de l'association des deux canaux 5 et 7 ;
- soit sur une table lumineuse pour chaque canal par vision par transparence.

Sur chaque calque ont été dessinés : les linéaments ; les structures circulaires ; les limites de formations géologiques visibles.

d) Définition du linéament

- Notion de linéament

Nous devons à HOBBS W.H. (1904) la notion de linéament qui la définissait, dans un premier temps, comme une structure rectiligne uniquement morphologique : "les plus importants linéaments de la physionomie terrestre pouvant être désignés comme crêtes, rides ou limites de régions élevées, lignes de drainage ou lignes de côte et limites linéaire de formations géologiques ou de types pétrographiques ou de lignes d'affleurement".

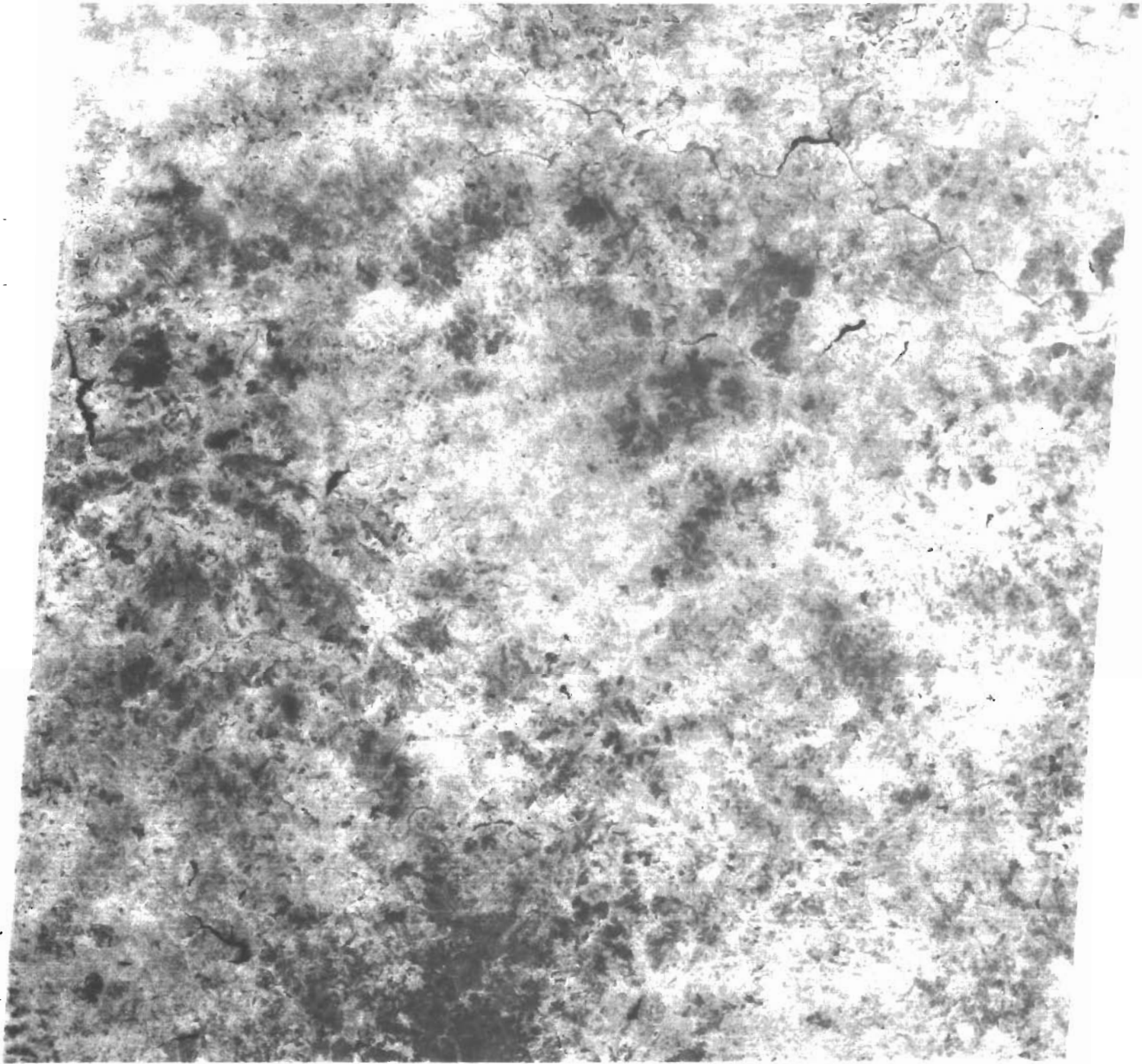


Photo 6 - Canal 7 de l'image 209-51 du 29 mars 1976.

A cette définition, HOBBS ajoutera plus tard (1912) : "les vallées ou ravins" ainsi que des éléments d'origine tectonique : "les lignes visibles de fracture ou zones de brèche de faille". Ainsi il introduisait la liaison qui pouvait exister entre structure, alignement morphologique et linéament.

D'autre part, il écrivait "beaucoup de linéaments sont identiques à des lignes sismotectoniques..., ce sont des lignes significatives du paysage qui révèlent l'architecture cachée du substratum rocheux".

Le terme de linéament est remis à l'honneur avec l'étude des images satellite. Il sera alors utilisé pour désigner les alignements qui apparaissent sur ces documents. Si les auteurs s'accordent sur la définition donnée par HOBBS, l'interprétation de l'origine des linéaments ne fait pas l'unanimité des avis (tableau 9).

Pour certains auteurs, les linéaments sont liés aux éléments morphologiques et désignent les traits du paysage et/ou de l'image. Ces traits sont rectilignes ou légèrement incurvés (traits morphologiques, hydrographiques, d'occupation du sol, tectoniques, etc...).

Pour d'autres auteurs, le linéament est vu en liaison directe avec les phénomènes tectoniques : failles, fractures, etc...

- Critères de sélection des linéaments

En conclusion et en accord avec la définition donnée par HOBBS en 1904 et 1912, nous dirons que les alignements ou "linéaments" décelables sur l'image satellite correspondent aux traits géomorphologiques : morphologie hydrographie, végétation, limite de sols, etc... et qu'ils peuvent être le reflet des structures du substratum rocheux en place : plis, failles, fractures, etc...

Le relevé des linéaments sur les images noir et blanc ne peut se faire sans tenir compte des tons de gris. Nous donnons sur le figure 43 les changements de texture de l'image qui permettent de cartographier les linéaments.

Certains de ces changements de textures ont des relations étroites avec les fractures du socle. Les alignements peuvent donc correspondre des éléments variés : alignements de végétation ; l'hydrographie ; réseau de diaclases, etc...

"Leur crédibilité géologique croît en fonction de leur extension et de leur répétition dans une direction donnée (BIJU-DUVAL, 1976)

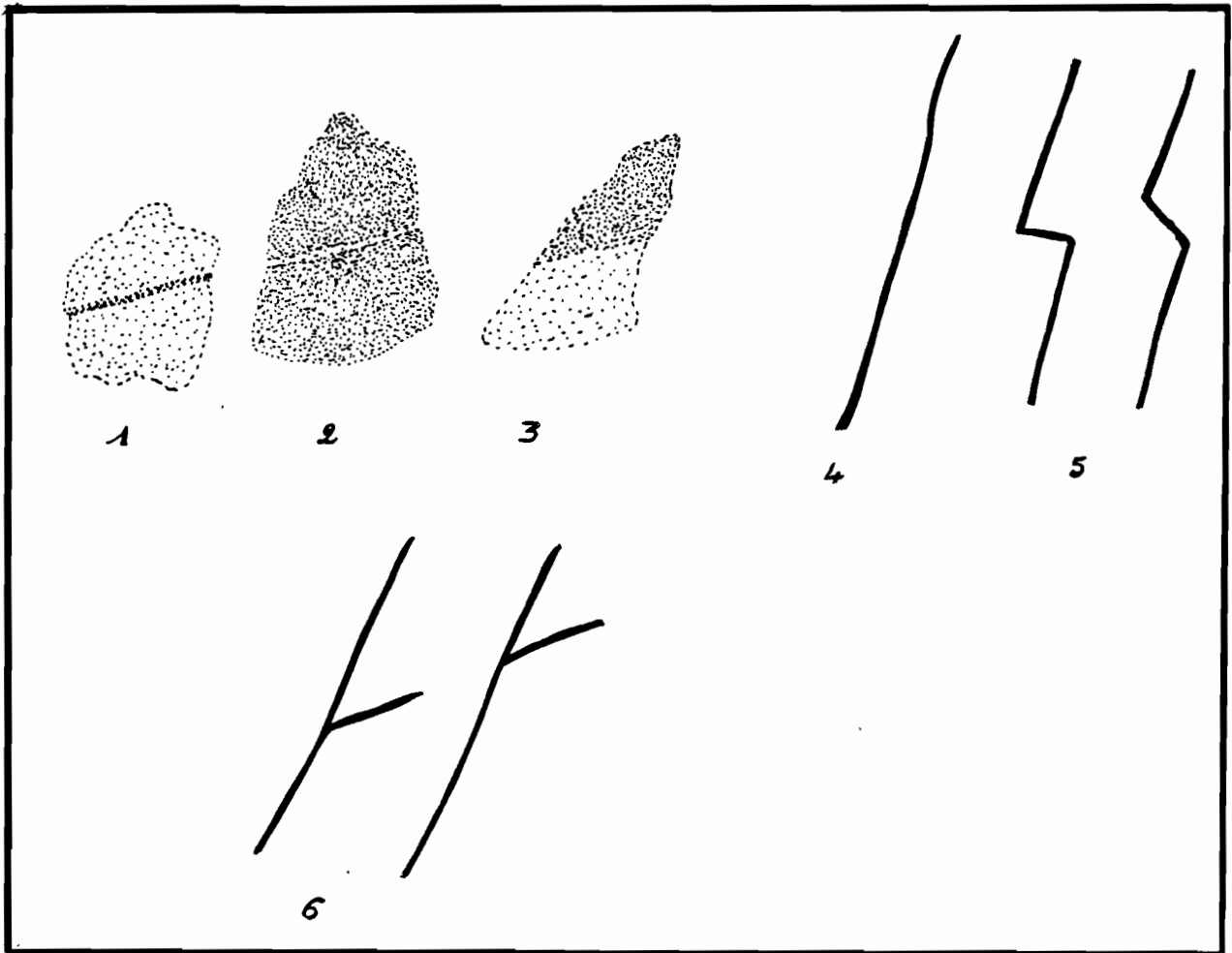


Fig. 43 - Différents aspects du linéament sur l'image.

- 1 - Ligne sombre dans une plage claire.
- 2 - Ligne claire dans une plage sombre.
- 3 - Contact entre tonalités sombre et claire.
- 4 - Portions rectilignes de cours d'eau
- 5 - Anomalies dans le cours d'eau.
- 6 - Affluents alignés de cours d'eau.

- Réalité géologique du linéament

Nous venons de définir les linéaments comme des traits géomorphologiques pouvant refléter les structures du substratum géologique. Leur régularité linéaire n'est pas toujours un effet de hasard mais peut être la preuve de leur origine tectonique. En effet, les éléments de surface: topographie, végétation-sols, réseau hydrographique sont souvent induits par la tectonique.

Ainsi, il existe une certaine identité entre le réseau hydrographique et celui de fractures du socle. L'orientation des vallées des zones à substratum cristallin (cas de l'Afrique de l'Ouest) est déterminée par le réseau de fractures. La surimposition des vallées aux fractures a été développée dans plusieurs études (HURAUULT, 1967 ; CHOUBERT, 1957 ; ENGALENC, 1978 et autres).

* Réseau hydrographique

Nous donnons en exemple, deux vallées dont le tracé a été guidé par des fractures reconnues par la géologie de terrain. Il en est ainsi des vallées de la Volta Rouge au Sud-Ouest de Ouagadougou (HOTTIN et OUEDRAOGO, 1975 ; KURTINA, 1981) ; de la Sirba dans la sous-préfecture de Boulsa (HOTTIN et OUEDRAOGO, 1975).

La Volta Rouge. Le tracé de la Volta Rouge est souligné par un linéament de direction NW-SE (photo 7). Ce linéament correspond à un système de fracture de direction d'axe Accra-Bamako dont le fleuve suit le tracé. Ce système se retrouve sur le cours du Niger au Nord-Est du pays.

La Sirba. Le linéament de la Sirba contrôle le cours de cette rivière avec une brusque déviation de direction NE-SW (photo 8). Ce linéament souligne une fracture qui entraîne une déviation du cours de la rivière qui l'oriente vers le bassin versant du Niger à l'Est.

Il apparaît, en région de socle, une liaison étroite entre le réseau hydrographique et la fracturation. Nous pouvons donc penser que les linéaments qui sont soulignés par les cours d'eau révèlent les directions de fracturation du socle.

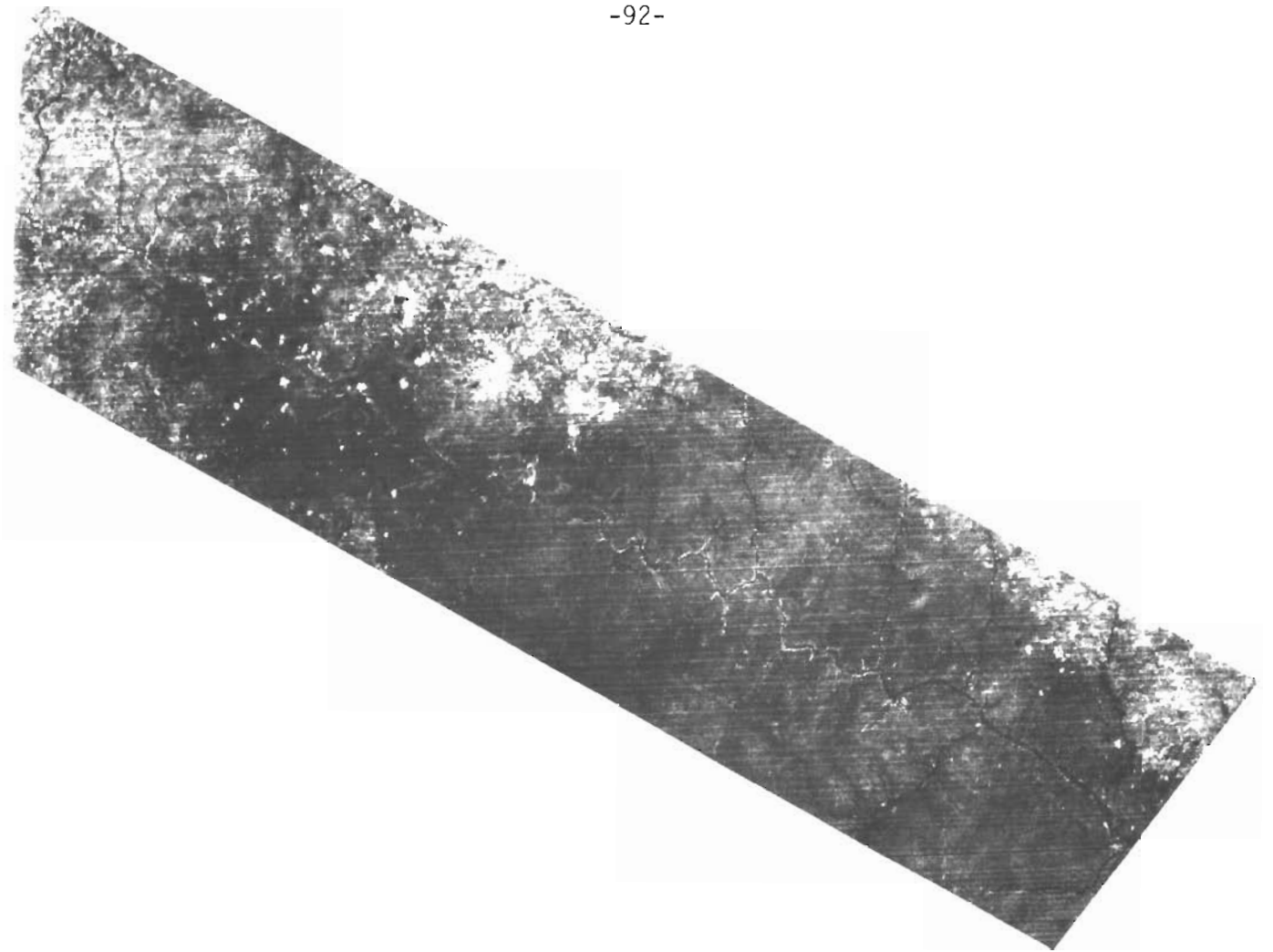


Photo 7 - Le linéament de la Volta Rouge.

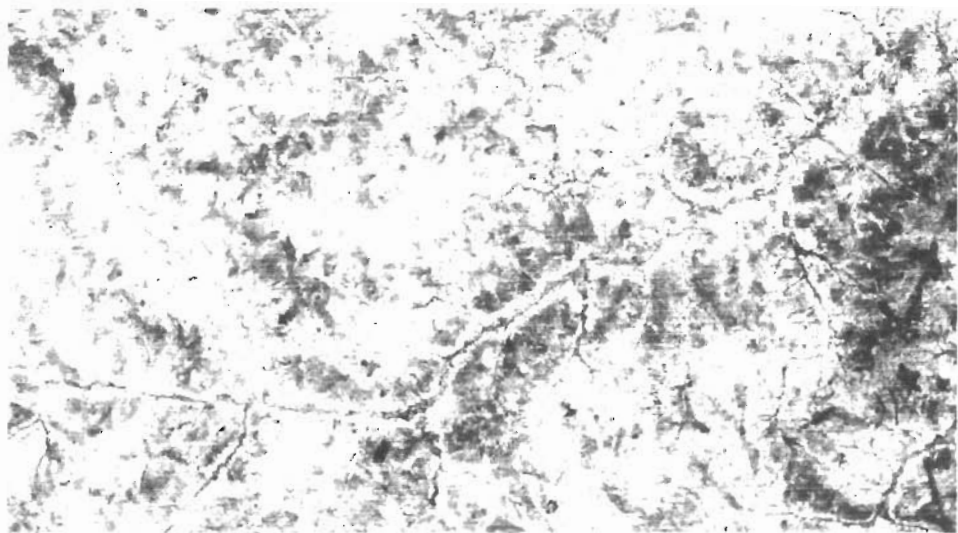


Photo 8 - Le linéament de la Sirba.

* Végétation

Selon SAWADOGO (communication orale, 1981), certaines espèces végétales indiquent l'existence de zones de fractures ou d'accidents tectoniques divers à l'endroit des sites où on les rencontre. Ceci s'avère d'autant plus probable que ces espèces s'alignent presque toujours selon une direction qui déterminerait l'orientation de la fracture.

Ces espèces sont peu nombreuses. SAWADOGO a dénombré essentiellement quatre espèces qui sont :

- Les Fucus guafalocarpa (kankanga en mooré) s'alignent selon une direction liée à une direction de fracture.

- Le Diopiros mespiliformis (Ganka en mooré) et le Piliostigma reticulata (Bangandé en mooré) mettraient en évidence des fractures non seulement par leur association mais par leur alignement suivant une direction donnée.

- Le Mytragyna Inermis (Yilga en mooré). Cette espèce est phréatophyte et on le rencontre généralement aux bords des rivières importantes. Son existence sur un site isolé en dehors des berges de rivières manifesterait l'existence d'une nappe d'eau souterraine probablement en liaison avec les zones de fracture.

Si ces observations peuvent être vraies à l'échelle du terrain, il n'en demeure pas moins vrai que ces observations à l'échelle de l'image sont difficilement identifiables. La taille de la végétation, sa répartition en fonction de la zonalité climatique rendent ces observations vraisemblablement valables à une échelle assez locale.

Les linéaments soulignés par la végétation correspondent à des axes de drainage superficiels, qui eux-mêmes peuvent suivre l'orientation de la fracturation.

Tableau 9 - Usage du terme linéament dans l'interprétation des images satellites (d'après CADILLAC, 1979) complété par SAWADOGO S.

AUTEURS	DEFINITION
DUPLAN L. (1973)	<i>"Conformément à la définition donnée par HOBBS en 1904, nous appelons linéaments des traits topographiques observés à l'échelle régionale, rectilignes ou peu courbés et généralement interprétés comme le reflet de la structure crustale".</i>
GUILLEMOT J. et al. (1973)	<i>Ils distinguent "les alignements structuraux au sens strict des alignements morphologiques : les premiers étant des alignements de plis, rebroussements de couches, failles et autres faits géologiques ; les derniers des linéations dans le cours des rivières, le relief, la végétation, etc... Lorsqu'un alignement morphologique se trouve intercalé dans le prolongement d'alignements structuraux, il peut être considéré comme étant aussi de nature géologique".</i>
BRULHET J. et FRAYSSE Ch.	<i>"La plupart des alignements mis en évidence (...) correspondent à de grands accidents".</i>
CHOROWICZ J. et PAUL S. (1974)	<i>"Les linéaments correspondent à des accidents ou de légères déformations alignées souvent sur de grandes distances".</i>
DONVILLE B. (1974)	<i>"Sur ces images satellites (.....) apparaissent clairement des alignements rectilignes correspondant à des linéaments et matérialisant le plus souvent des fractures".</i>
THOAMS G.E. (1974)	<i>"Les linéaments définissent les zones de faiblesse du socle".</i>
CAIRE A. (1975)	<i>"On conservera au terme linéament son sens initial et général (HOBBS, 1904) en admettant que certains linéaments peuvent ne pas être liés à la tectonique. Par contre, lorsqu'un linéament correspond à une structure tectonique, on parlera de linéament tectonique".</i>
KOWALICK W.S. et GOLD D. P. (1975)	<i>"Les linéaments similaires aux accidents les plus courts connus comme les traces de fracture, paraissent être la manifestation de surface des zones verticales voisines de fracturations et failles dans le socle sous-jacent".</i>

SCANVIC J.V. (1975)

parle d'alignements structuraux : "les détails linéaires observés sur les images Ertis correspondent à des phénomènes géologiques variés : failles, contacts géologiques, anomalies géophysiques, structures plissées, paléoreliefs, etc..."

BIJU-DUVAL B. et al.
(1976)

"Les alignements peuvent correspondre à des éléments variés, soit de simples traits physiographiques liés à la végétation, l'hydrographie ou la morphologie, soit des éléments structuraux clairs (plis, failles, flexures), soit peut-être à des cassures plus complexes, telles que réseau dense de diaclases. Leur crédibilité géologique croît en fonction de leur extension et de leur répétition dans une direction donnée".

O'LEARY D.W. (1976)

"Un linéament est une structure de surface simple ou complexe cartographiable, dont les éléments sont alignés d'une manière rectiligne ou légèrement curviligne(.....) et qui traduit probablement un phénomène profond".

CAZABAT C. (1977)

interprète les linéaments comme des failles.

CHUKWU-IKE I.M. (1977)

"Les linéaments sont des lignes significatives de la surface de la terre d'une précision sans égale. Bien que les linéaments se manifestent eux-mêmes comme des alignements linéaires de végétation, de variations topographiques (...), leurs origines sont douteuses. Excepté lorsque les données géophysiques évidentes indiquent une origine tectonique profonde, il est souvent difficile de différencier les linéaments liés à des faits tectoniques situés en profondeur de ceux liés à des phénomènes de nature plus extérieure".

DAVIE M.F. (1977)

"Les alignements décelables sur les images Landsat sont en fait des failles et cassures affectant l'ensemble des séries lithologiques".

FOOSE R.M. (1977)

différencie les linéaments en fonction de leur longueur ; il considère que les linéaments courts et droits sont causés par des failles normales traduisant un état de tension de la croûte terrestre, tandis que les linéaments longs correspondent à des failles inverses traduisant des conditions de compression.

- RIVEREAU J.C. et al. (1977) "Les linéaments correspondent à la juxtaposition ou à la superposition d'éléments physiographiques divers : morphologie, hydrographie, végétation, différences de tonalité de surface correspondant à des différences de sol et de lithologie".
- CROUZILLES et al. (1978) assimilent les éléments purement morphologiques détectés sur l'image satellite ("généralement appelés linéaments") à des accidents.
- SÔLE SUGRANES L. (1978) "Le mot linéament se comprend dans le sens défini par O'LETTY et al. (1976)".
- CADILLAC H. (1979) conserve la définition donnée par HOBBS (1904 et 1912) et considère "qu'il s'agit d'alignements rectilignes ou légèrement incurvés intégrant des éléments d'origines diverses : géomorphologiques, hydrographiques, tectoniques, occupation des sols... visibles sur les photos satellites d'une manière continue ou discontinue sur plusieurs dizaines de kilomètres".
- FOURCADE B. (1979) souligne l'aspect morphologique des linéaments. "Les éléments linéaires d'une image sont représentés par tous les objets filiformes tels que routes et rivières, pour ceux qui sont les mieux définis mais également par les limites de parcelle telles que haies, talus, etc...". Ils correspondent à des éléments variés. "Les linéaments correspondent souvent sur le terrain à plusieurs types d'éléments comme des ensembles de plis, des failles, des rivières et des anomalies de végétation".

VI - LES IMAGES TRAITÉES

6.1. Introduction

Les données utilisées sont issues du satellite Landsat. Les images Landsat sont obtenues soit sous forme d'images photographiques (film de 70 mm ou 240 mm), soit sous forme de bandes magnétiques numériques.

Dans les bandes magnétiques sont enregistrées les valeurs des pixels comprises entre 0 et 255. Mais au cours de la transmission des données par le satellite, toute l'échelle n'est pas utilisée. Le canal 7 est codé en 6 signaux binaires, ce qui donne $2^6 = 64$ niveaux (0 à 63), alors que les canaux 4, 5 et 6, le codage est fait avec 7 signaux binaires d'où un étalement des valeurs entre 0 et 127 ($2^7 = 128$ niveaux).

Au moyen de l'ordinateur, on peut opérer différentes transformations de ces valeurs pour les rendre "comparables". C'est ce qui se passe au cours du traitement numérique. Ces transformations permettent non seulement d'améliorer les contrastes des images mais aussi de créer de nouvelles images.

6.2. Traitement des données

Les images utilisées ont été traitées par le bureau de Télédétection de l'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre Mer) à partir de la bande magnétique numérique de la scène 209-51 du 6 novembre 1975. Le principe du traitement est basé sur la corrélation de deux canaux dans un plan orthogonal. La corrélation des canaux consiste à créer à partir des valeurs numériques des canaux d'origine (canal 4-5-6 ou 7) un nouveau (ou plusieurs) canal.

a) Principe

Soient les canaux 4 et 5. A partir des valeurs des pixels, on fait une projection en plan suivant deux axes perpendiculaires. Les axes sont gradués entre 0 et 255 (fig. 44).

On obtient un nuage de points sur l'écran du visualiseur. Pour pouvoir faire une discrimination des points du nuage, on essaie de déterminer un 3ème axe sur lequel les points sont projetés orthogonalement et de manière à ce qu'ils soient séparés les uns des autres. Ce troisième axe est choisi par l'opérateur dès qu'il est satisfait par les résultats à la vision de la nouvelle image à l'écran.

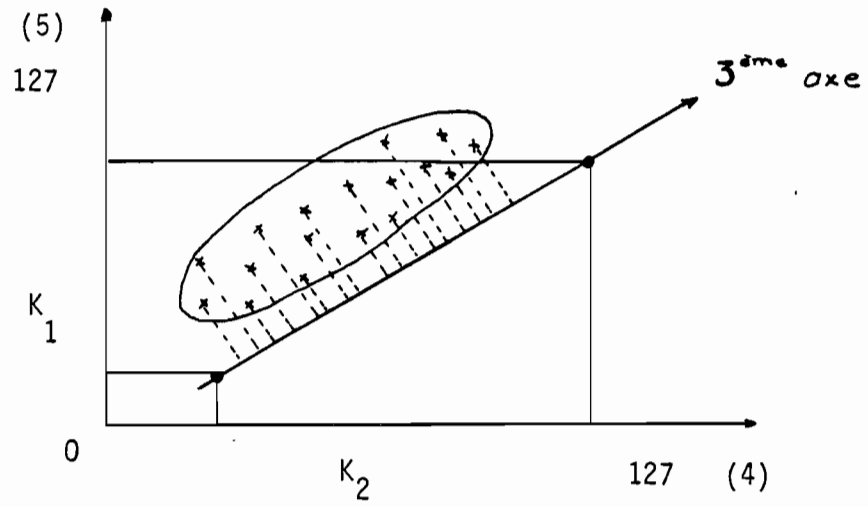


Fig. 44 - Nuage de points sur l'écran du visualiseur.

Prenons un exemple simple où le nuage est représenté par un ensemble de 9 points répartis comme sur la figure 45.

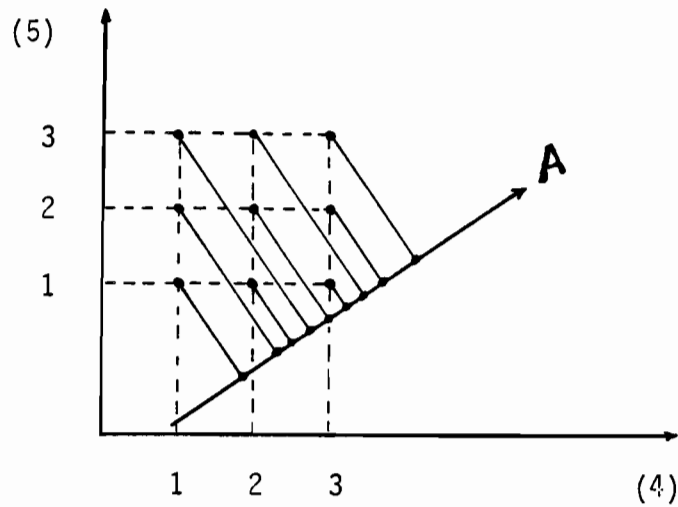


Fig. 45 - Projection d'un nuage de 9 points sur un axe.

* premier cas - On projette ces points sur l'axe 4 ou sur l'axe 5. Dans les deux cas, les 3 points sont confondus en un point sur chaque axe. On n'arrive pas à discriminer les 9 points.

* second cas - On veut donc arriver à discerner les 9 points. On crée alors un autre axe sur lequel seront projetés les points ; ce qui va permettre une discrimination (fig. 45). Sur ce nouvel axe s'opère une séparation des différents points suivant une nouvelle longueur d'onde (possible).

Le nouvel axe aura pour équation :

$$Q = k_1 (V_4) + k_2 (V_5) + c^{te}$$

Ce traitement permet la création d'un nouveau canal à partir d'une transformation linéaire. Toutes les opérations sont réalisées automatiquement par l'ordinateur.

b) Manipulation

La lecture de la bande magnétique par l'ordinateur permet d'obtenir sur l'écran TEKTRON le nuage de points correspondant aux valeurs de réflectance des pixels dans les canaux choisis (canaux 6 et 7) dans un système orthogonal (fig. 46).

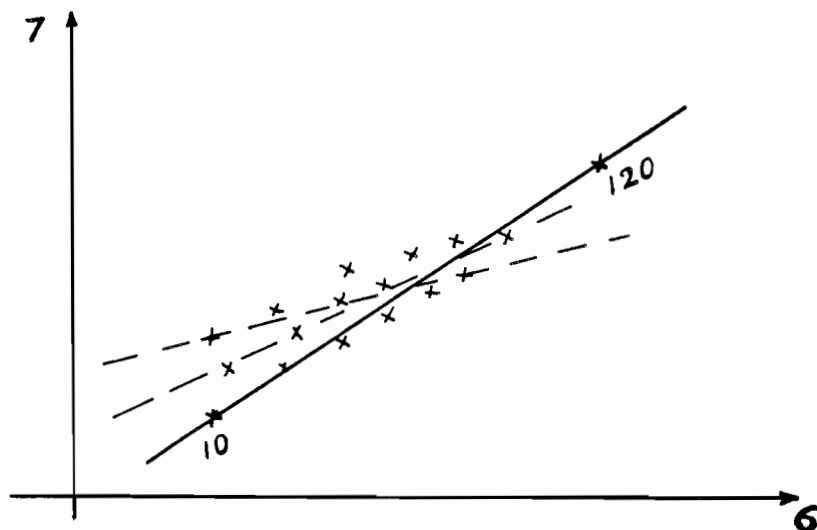


Fig. 46 - Positions possibles du nouvel axe de projection.

L'opérateur donne à la droite de projection des positions différentes jusqu'à ce qu'il estime avoir la meilleure discrimination. Il se fixe alors deux points sur cet axe (en général les points extrêmes) auxquels il attribue des valeurs arbitraires. Le nuage est projeté sur cette droite qui déterminera le nouveau canal. L'ordinateur lui calculera alors l'équation de cet axe.

Pour l'image de MOGTEDO, les bornes choisies sont comprises entre 0 et 120. L'équation des nouveaux canaux créés pour les deux combinaisons est :

$$A = 0,63(7) + 1,53(6) - 49$$

$$B = 1,70(5) + 1,04(4) - 47.$$

La zone tracée par ces équations correspond à une zone située entre les lignes 1800-2000 et les colonnes 1800-2000.

c) Avantages et inconvénients

* Avantages - Ce traitement présente de nombreux avantages :

- Création de nouvelles données permettant d'obtenir de nouvelles images. En effet les nouveaux canaux obtenus peuvent être traités comme les canaux d'origine.

- Possibilité d'étalement de la dynamique par des projections sur des bornes plus larges, ce qui entraîne une meilleure discrimination de l'information.

- Possibilité d'être utilisé pour l'analyse de thèmes variés.

* Inconvénients

- Le choix de l'axe de projection se fait par tâtonnement. Il dépend de la forme du nuage et de la connaissance de l'opérateur du problème posé.

- Les coefficients de corrélation sont constants pour une droite donnée. Ils varient, en fait, en fonction de la position de la droite par rapport à celle du nuage, donc de l'estimation visuelle de l'opérateur.

- Ce genre de traitement ne s'adresse pas à un thème précis (géologie, hydrologie, végétation, etc...). Il ne dépend que de la valeur des pixels.

6.3. Interprétation des images traitées

Ce traitement avait pour objectif l'amélioration de l'image en vue de la cartographie des linéaments. Donc seuls les linéaments ont été relevés sur ces documents.

Les autres éléments du paysage ne peuvent être analysés à cause de la détérioration de l'information. L'interprétation est faite sur une table lumineuse par transparence. Les documents issus des traitements sont à l'échelle du 1/100.000 pour les deux canaux A et B.

VII - CONCLUSION SUR LE CHAPITRE I

L'image satellite permet une cartographie rapide et détaillée des éléments linéamentaires. Ces linéaments s'identifient souvent au réseau hydrographique qui traduit la fracturation du socle. Ils constituent pour l'hydrogéologue du socle un guide important dans la recherche des fractures.

Les traitements numériques permettent d'améliorer la qualité de l'image. L'utilisateur pourra ainsi disposer de documents de meilleure qualité, ce qui facilite leur exploitation.

Chapitre II - LA PHOTOGRAPHIE AERIENNE

I - INTRODUCTION A LA PHOTOGEOLOGIE

La photogéologie constitue l'un des vastes domaines d'application des photographies aériennes. Elle peut être définie comme l'ensemble des applications géologiques de l'interprétation des photographies aériennes. Ces applications couvrent des domaines divers de la géologie : recherche minière, géomorphologie, stratigraphie et bien sûr l'hydrogéologie.

Une série de critères convergents : couleur, texture, structure, morphologie, réseau hydrographique et végétation, permet de reconnaître ou tout au moins de tracer une limite entre les différentes formations apparaissant sur les photographies aériennes.

1.1. Facteurs d'interprétation

"L'interprétation géologique (---) est un résultat combiné de raisonnement déductif et inductif, basé sur le principe de cause à effet" (RAY R., 1960).

L'interprétation géologique des photographies aériennes comporte donc deux étapes essentielles : la première est l'observation et l'identification des objets photographiques alors que la seconde nécessite un raisonnement permettant de traduire ces objets en terme géologique. Aussi, plusieurs facteurs aident à l'interprétation.

a) La tonalité

Le ton de la photographie est une mesure relative de la quantité de lumière réfléchiée par les objets et enregistrée sur les photographies noir et blanc. Il dépend bien sûr des caractéristiques de l'objet mais aussi de la position de ce dernier par rapport aux rayons solaires, par conséquent de l'heure du jour et du mois de l'année.

La tonalité peut être importante pour la reconnaissance des objets lorsque les différences de contrastes sont très fortes. Dans les zones à hauts reliefs, la présence d'ombre accentue les tons et peut faci-

liser la reconnaissance des structures. Mais l'utilisation des tons requiert une appréciation personnelle importante, ce qui lui confère un caractère subjectif.

b) La couleur

Sur les photographies couleur ou infrarouge, la couleur constitue l'élément essentiel de reconnaissance. Elle peut permettre une reconnaissance des structures et des formations géologiques par l'intermédiaire des changements visibles sur des ensembles bien contrastés. Lorsque les contrastes sont faibles, la couleur atteint aussi sa limite.

c) La texture et la structure

La texture d'une photographie est un élément unitaire dans l'analyse de celle-ci et en rapport avec la tonalité. CALWELL (1952) définit la texture comme "la fréquence de variation des tons d'une image ...". L'assemblage des unités texturales forme une structure.

L'étude des textures et des structures joue un rôle primordial dans la photointerprétation. Elle permet de caractériser sur les photographies aériennes des unités similaires.

1.2. Apport des photographies aériennes

a) Types d'informations

Les informations géologiques acquises par l'interprétation des photographies aériennes peuvent se classer en deux types :

- des informations lithologiques : distribution des roches,
- des informations structurales : reconnaissance des structures géologiques.

Les informations fournies dépendent du type de terrain (roches ignées, métamorphiques ou sédimentaires), du climat environnant et du stade d'évolution de la roche sous l'action des agents climatiques.

b) Indicateurs de la fracturation

Différents éléments visibles sur les photographies permettent de distinguer les zones de fractures. Ce sont en général :

- des alignements de tonalité généralement plus sombres que l'environnement. Ceux-ci soulignent les failles et constituent de ce fait le lieu de collecte d'eau. Généralement des sols hydromorphes s'y développent ce qui leur confère un aspect plus sombre sur les photographies IR.

- En photographie couleur ou IR, les différences de végétation ou de sols observées peuvent traduire des déplacements de couches dûs à des failles. On peut même observer des failles nettes dans des régions peu ou pas couvertes.
- Les ruptures de pente dans la topographie peuvent suggérer l'existence d'une fracture.
- Les alignements de cours d'eau qui sont probablement les indicateurs les plus communs de la fracturation.

Ces caractéristiques sont souvent évidentes sur les photographies aériennes et se marquent par des lignes rectilignes ou courbes. Cette linéarité des failles, fractures, fîssures, etc, constitue probablement la clé la plus importante de l'étude de la fracturation en photo aérienne.

II - EXPLOITATION DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES

La photographie aérienne est d'une grande utilité en Afrique intertropicale, en dépit de l'important recouvrement (altérites, sols, végétation) qui masque le substratum.

La photogéologie précède et oriente l'observation au sol. Elle permet d'acquérir des documents de base à grande échelle absents dans ces régions dont elle supplée le manque.

La photo-interprétation s'avère un outil indispensable pour l'hydrogéologue dans l'implantation de ses ouvrages, aussi ce dernier doit-il être un bon photo-interprète.

2.1. Données acquises

a) Morphologie

Les régions intertropicales, comme la Haute-Volta, sont caractérisées par une morphologie plane généralement monotone. La couverture herbeuse, le manteau d'altération épais, masquent les structures, ce qui rend difficile voire impossible les études de terrain.

Ces régions ont fait l'objet de nombreux travaux (HURAUULT, 1967 ; CHOUBERT, 1957 ; GUIRAUD, 1976 ; ENGALENC, 1975, 1978, etc...). Elles ont en commun une géologie assez monotone souvent formée de granites et de ro-

ches métamorphiques très anciens ; les formations sédimentaires sont peu répandues. Ces régions présentent une remarquable stabilité tectonique.

HURAUULT (1967) nous parle de "paysage à alvéoles" pour désigner en même temps le relief et le réseau hydrographique. Le relief à coupole est caractéristique des zones de granites et HURAUULT (1967) ajoute "ce type de relief ne doit donc pas être regardé comme lié à un cycle particulier de l'érosion, mais comme un trait permanent, intimement lié à la morphologie des roches granito-gneissiques" (photo 9).

b) Réseau hydrographique

"L'orientation des diaclases est fréquemment mise en évidence, dans les régions de savane à végétation clairsemée, par des alignements de végétation.... Mais elle est surtout mise en évidence par la configuration du réseau hydrographique ..." (HURAUULT, 1967).

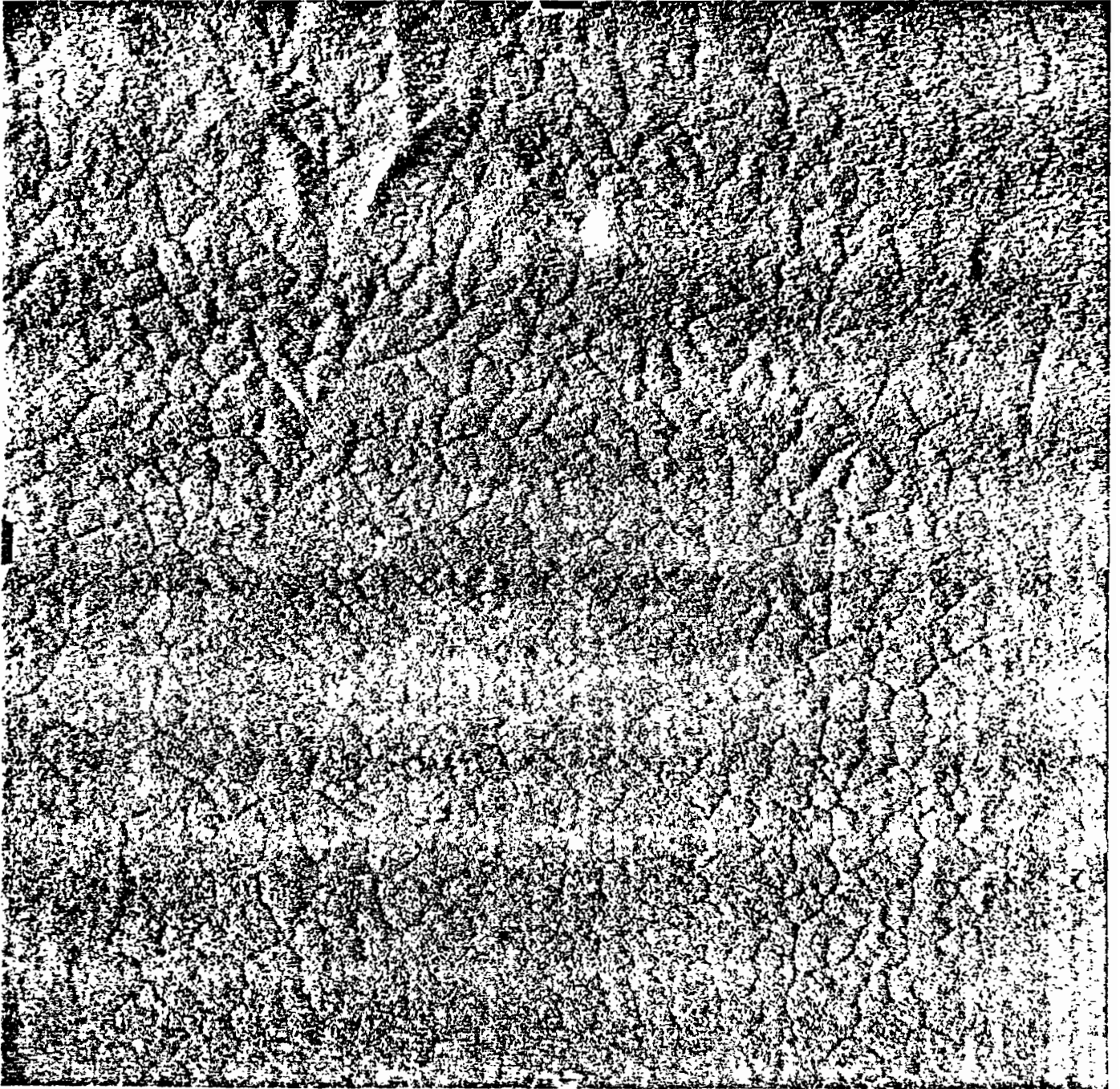
L'influence du système de fracturation sur la distribution du réseau hydrographique a été mise en évidence très tôt. Cette distribution du réseau de fracture conjuguée avec l'érosion qui entraîne les matériaux permet de comprendre la morphologie en coupole de ces régions. Les inselbergs seraient des zones où les fractures sont peu développées, ce qui a pour conséquence une faible altérabilité de la roche donc une érosion peu agressive.

Dans les régions intertropicales, l'analyse de la distribution du réseau hydrographique et des inselbergs permet d'avoir une idée de l'orientation des fractures. Des études statistiques réalisées en Côte d'Ivoire par G. PERON et R. GUIRAUD (1976) montrent des liens étroits entre l'orientation du réseau hydrographique et les orientations structurales du socle antécambrien.

2.2. Interprétation

a) Cartographie des reliefs et des cuirasses

L'analyse des documents aériens permet d'accéder, plus sûrement et plus rapidement, à des observations précises. Les principaux éléments de la morphologie sont facilement reconnaissables sur les photographies aériennes.



Cliché *Institut Géographique National*, 719-004-51

Photo 9 - Morphologie des régions granitiques
(Guyane française).

La photographie aérienne permet d'établir un support géomorphologique sur lequel on peut distinguer : les plateaux, les versants, les cuirasses, les affleurements rocheux, la répartition de la végétation, la densité du réseau hydrographique et sa répartition, etc...

Sur socle birrimien, l'accentuation des reliefs permet un relevé excellent des éléments tels que : buttes cuirassées, collines arrondies, dépression périphérique, etc... (photo 10). La correspondance avec le paysage au sol peut être saisie en se reportant à la photographie-terrain (photo 3).

Sur socle granito-gneissique, le paysage est plat. Les affleurements de taille métrique (cf. photo 2) sont difficiles à cartographier sur photographie aérienne (photo 11).

Du point de vue géologique, si les grandes structures sont reconnaissables : sillons birrimiens, domaines granitiques, il est souvent impossible de marquer les limites.

Néanmoins, la photographie aérienne constitue un support cartographique indispensable permettant de guider les travaux de terrain, notamment le repérage des fractures.

b) Relevé de la fracturation

Les traits morphologiques et topographiques observables sont directement tributaires de la lithologie, des discontinuités pétrographiques et structurales des formations du socle.

La photographie aérienne apporte à l'hydrogéologue un document sur lequel l'étude de la fracturation devient accessible. Le rôle de la fracturation, guide principal pour l'implantation des ouvrages, est bien établi dans le socle de l'Afrique de l'Ouest (GUIRAUD, 1975 ; ENGALENC, 1978 ; SAWADOGO, 1978 et autres).

Cette fracturation ne peut être observée et dessinée qu'à partir des documents aériens. Celle-ci est toujours mieux perçue sur les documents aériens que sur le terrain (présence d'un manteau d'altération généralisé).

Les critères d'interprétation de la fracturation sont variés :

- Un tracé rectiligne du réseau hydrographique traduit la présence de fracture, ainsi qu'une brusque déviation de celui-ci.

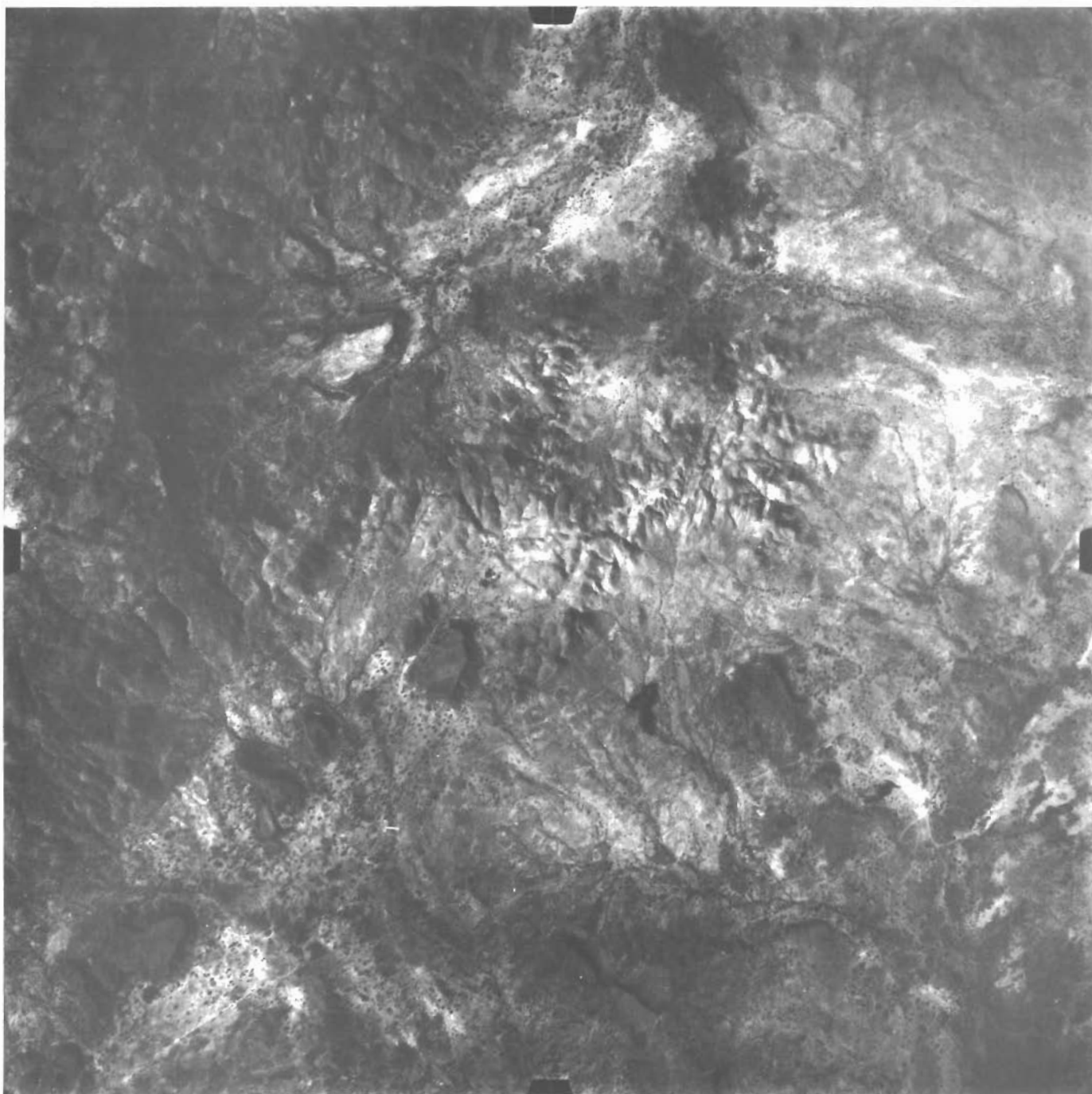


Photo 10 - Morphologie des régions birrimiennes
(Haute-Volta).



Photo 11 - Morphologie des régions granitiques
(Haute-Volta).

- Un alignement de la végétation indique une zone d'humidité, par conséquent une zone de circulation d'eau souterraine qui pourrait correspondre à une zone de broyage.
- un alignement de filons, lignes plus ou moins sombres, qui se présentent souvent en relief sur les photographies aériennes.

2.3. Implantation du forage

L'interprétation des photographies aériennes permet d'établir une carte de base sur laquelle sont portés tous les éléments du paysage :

- le village et les voies d'accès : routes, pistes, chemins, etc...
- les zones de reliefs : collines, cuirasses, etc...
- le réseau hydrographique détaillé,
- la fracturation telle qu'elle apparaît.

Muni de cette carte de base qui le renseigne et qu'il complète par des observations de terrains, l'hydrogéologue peut alors choisir le meilleur site pour son forage. Ce choix, qui tient compte de la répartition des fractures, de leur taille, est fondé sur plusieurs critères :

- l'association de fractures,
- la présence de noeuds des drains majeurs qui est une excellente caractéristique,
- une existence de zones d'affleurement, considérées comme relativement peu favorables.

Ainsi, les forages seraient localisés sur les zones les plus fracturées et les plus altérées qui sont considérées comme les plus favorables hydrogéologiquement (fig. 47).

Sur cette figure, sont représentées les directions supposées des écoulements souterrains susceptibles de drainer les eaux. Ces lignes de circulation déduites à partir de l'étude de la photographie aérienne, par analogie à l'écoulement superficiel, sont de caractère hypothétique. Seuls des forages exécutés le long des fractures pourraient confirmer ou infirmer ces directions.

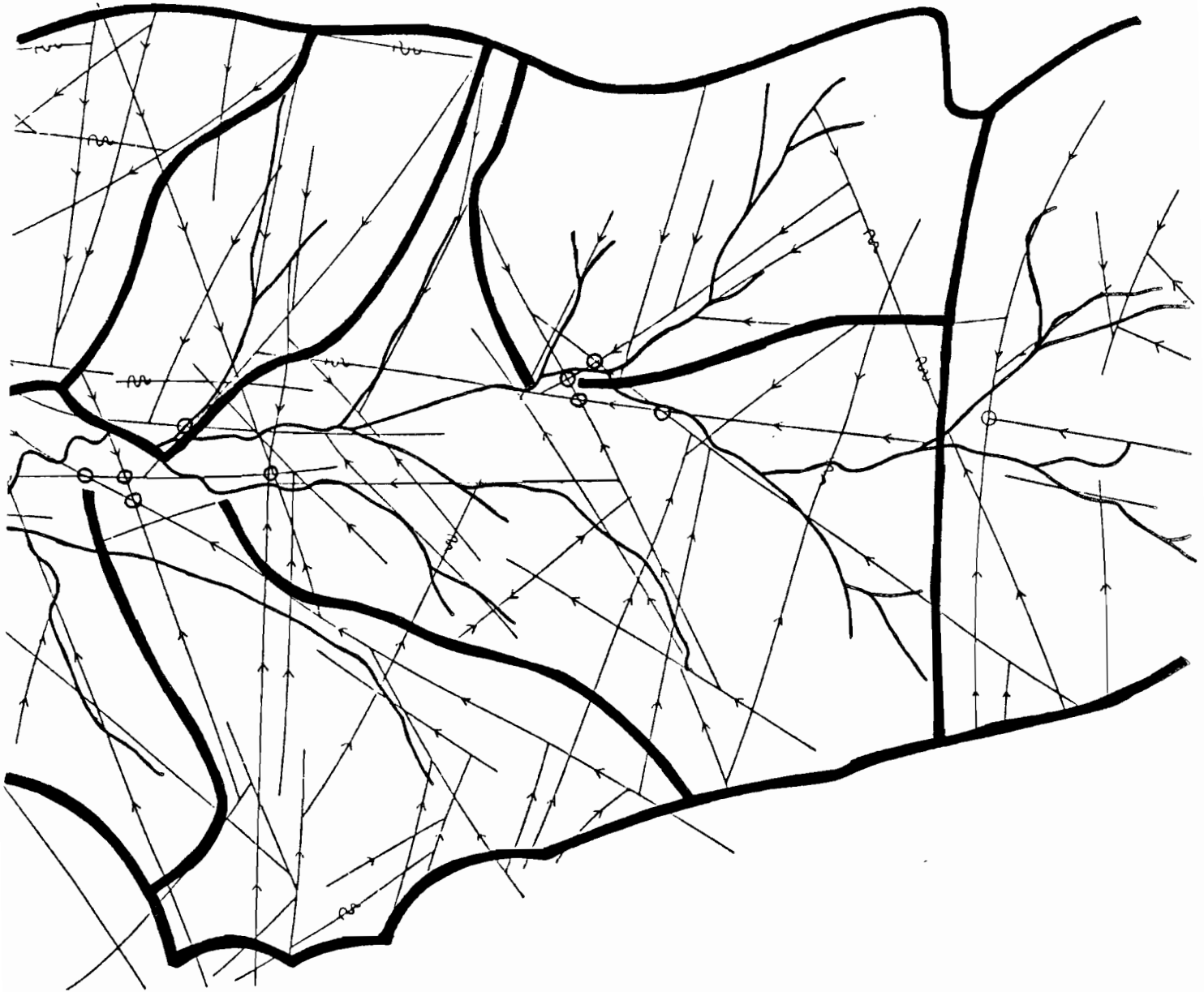







Fig. 47 - Positionnement des forages (BERARD, 1977)
(e = 1/25.000è).

- | | |
|---|---|
|  | Fracture et sens d'écoulement souterrain. |
|  | Marigot. |
|  | Écoulement incertain. |
|  | Limite de bassin versant. |
|  | Site de forage. |

III - CONCLUSION SUR LE CHAPITRE II

La photo-interprétation est la méthode la plus sûre, la plus rapide et la moins coûteuse pour positionner un forage avec certitude.

Le terrain se résume ainsi à une vérification des observations de photo-interprétation et à la réalisation des ouvrages.

Ainsi pour éviter de nombreux échecs, tout forage doit être précédé de l'analyse des photographies aériennes. La précision obtenue dans l'implantation des ouvrages justifie son emploi intensif par les hydrogéologues dans le milieu intertropical où le masque d'altération condamne souvent les observations de terrain.

Chapitre III - LA GEOPHYSIQUE

I - INTRODUCTION

Si l'utilisation des photographies aériennes pour le relevé des fractures s'avère une méthode aisée, pour autant que l'on sache lire une photographie aérienne, par contre la localisation de ces fractures sur le terrain reste encore, souvent dans bien des cas, incertaine.

Cette incertitude provient essentiellement de l'épais manteau d'altération qui recouvre et qui oblitère les structures. Aussi, pour plus de précision dans l'implantation des ouvrages, l'hydrogéologue doit faire appel à d'autres méthodes, en particulier à la géophysique.

"La prospection des eaux souterraines, comme celle de tout ce qu'on peut être amené à chercher dans le sous-sol, est d'abord affaire de géologie. S'il y a lieu ensuite de faire appel à la géophysique, c'est pour préciser les données géologiques qu'on a pu recueillir, pour les extrapoler avec quelque sécurité, pour les compléter si elles sont insuffisantes, parfois mais rarement pour les suppléer si elles s'avèrent à peu près inexistantes". Ainsi, L. CAGNIARD (1952) définissait le rôle de la géophysique dans la recherche des eaux souterraines.

L'utilisation de la géophysique pour l'implantation est devenue une méthode couramment employée en Afrique occidentale. Les premières interventions des méthodes géophysiques pour la prospection des eaux souterraines ont eu lieu autour des années 1955-56 (Alimentation en eau de Bouaké, Côte d'Ivoire).

Depuis cette époque, l'emploi des méthodes géophysiques à des fins hydrogéologiques n'a cessé de croître en Afrique Occidentale surtout en Haute-Volta et ceci en raison

- des faibles réserves d'eau potable liées à une pluviométrie capricieuse,
- de l'importance de la couverture d'altération qui couvre presque tout le pays,
- d'une géologie formée de granites et de roches métamorphiques couvrant les 3/4 du pays.

Dans un premier temps, la géophysique va intervenir pour déterminer les fortes épaisseurs d'altérations qui constituent à peu près les premières réserves exploitées.

Mais depuis quelques années, la prospection des eaux souterraines est orientée vers la recherche des zones fracturées. La géophysique est alors utilisée pour la localisation des discontinuités observées sur les photographies aériennes : fractures, failles, fissures, diaclases, etc... Cette recherche des fractures se justifie par l'amélioration des techniques de forage (marteau fond de trou) permettant de traverser les roches dures).

II - METHODES GEOPHYSIQUES - PRINCIPES

Les méthodes géophysiques sont basées sur l'étude d'un paramètre physique lié à la constitution des roches du sous-sol à partir de mesures faites à la surface du sol : densité, vitesse de propagation des ondes, propriétés électriques et magnétiques.

Deux grands types de méthodes sont utilisés :

- Les méthodes statiques dans lesquelles on mesure un champ naturel. Ce sont la gravimétrie, la magnétométrie, la tellurique, la polarisation spontanée, la radiométrie.
- Les méthodes dynamiques mesurent des champs artificiels. Elles comprennent les méthodes électriques et les méthodes sismiques.

Nous allons nous intéresser à ces dernières qui sont les plus utilisées en Afrique Occidentale pour l'étude de la fracturation en particulier les méthodes électriques. Nous donnerons un bref aperçu des autres méthodes.

2.1. Les méthodes électriques

a) Principe - Dispositif

La prospection électrique consiste à étudier les propriétés électriques des roches en profondeur au moyen de mesures effectuées en surface.

Le dispositif utilisé comprend deux circuits : un circuit d'injection entre deux bornes A et B, et un circuit de mesure (ou de réception) entre deux bornes M et N.

Les bornes M et N sont généralement situées entre A et B et l'ensemble constitue un quadripôle comme le montre la figure 48.

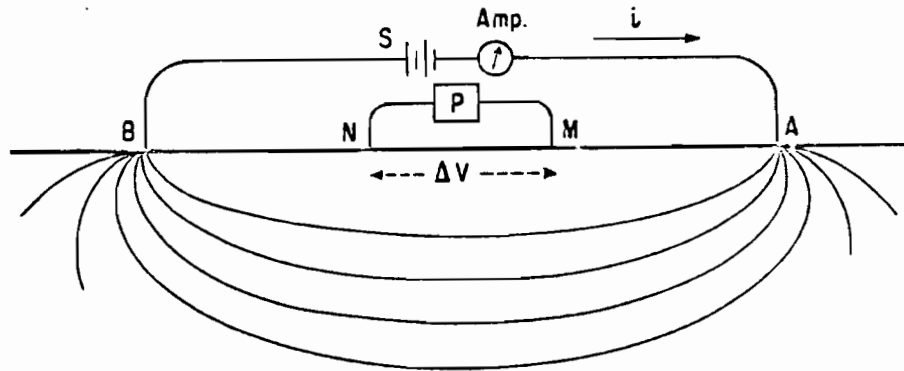


Fig. 48 - Dispositif utilisé en prospection électrique.

On envoie donc un courant d'intensité i (mesuré à l'aide d'un ampèremètre) connue dans le sol entre les bornes A et B. Le passage du courant dans le sol crée des différences de potentiel ΔV . On mesure aux bornes M et N ces ΔV provoquées par l'injection du courant.

L'intensité i du courant et la différence V sont caractéristiques du terrain traversé. Ils dépendent de la résistivité ρ du terrain. A partir de ces mesures, on peut calculer la résistivité apparente ρ_a du terrain par la relation :

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad \text{avec } K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN}\right)}$$

(K ne dépend que de la longueur de la ligne utilisée).

Les variations des ρ_a font bien ressortir les hétérogénéités du sous-sol car ρ_a est fonction des résistivités vraies des terrains mais aussi de leur épaisseur.

Il faut noter que la résistivité d'une roche dépend à la fois :

- de son faciès lithologique,
- de son état de fracturation,
- de la présence et de la quantité d'eau,
- de la composition chimique de l'eau d'inhibition,
- de la répartition de cette eau.

La résistivité d'un terrain diminue en général lorsque sa porosité augmente et le degré d'humidité et la salinité de l'eau d'inhibition augmentent.

b) Exploration du sous-sol

Le dispositif utilisé (fig. 48) permet de faire deux types d'exploration : une exploration verticale et une exploration horizontale.

- Exploration verticale

On exécute, dans ce cas au même point, une série de mesures en allongeant progressivement la longueur du quadripôle. La tranche explorée étant de plus en plus profonde, les ρ_a varient en fonction des résistivités vraies des terrains à la verticale de la station. Cette méthode est nommée sondage électrique (ou SE).

Le SE utilise le dispositif dit de Schlumberger et permet d'obtenir les résistivités vraies des terrains et leur épaisseur.

- Exploration horizontale

L'exploration horizontale s'effectue en déplaçant un quadripôle de longueur AB constante. Les ρ_a obtenues ainsi correspondent à une tranche de terrain d'épaisseur sensiblement uniforme. Cette méthode est appelée profil de résistivité (ou trainé de ρ). Elle permet de mettre en évidence les variations latérales de faciès ou de structure des terrains et convient à l'étude de couches redressées, de failles ou autres accidents tectoniques.

Le profil de résistivité utilise le dispositif de Wenner et permet l'étude d'un même volume de terrains.

c) Interprétation des données

- Profondeur d'investigation

La profondeur d'investigation d'un quadripôle est la profondeur extrême au-delà de laquelle le socle cesse de produire un effet sur la mesure. Elle croît avec la longueur de ligne AB et au mieux elle atteint AB/4.

On utilise dans ce cas le SE. Les résultats sont présentés sous forme d'un diagramme bilogarithmique où en abscisse sont portées la demi-longueur AB en mètres et en ordonnées la résistivité apparente correspondante en ohm-m.

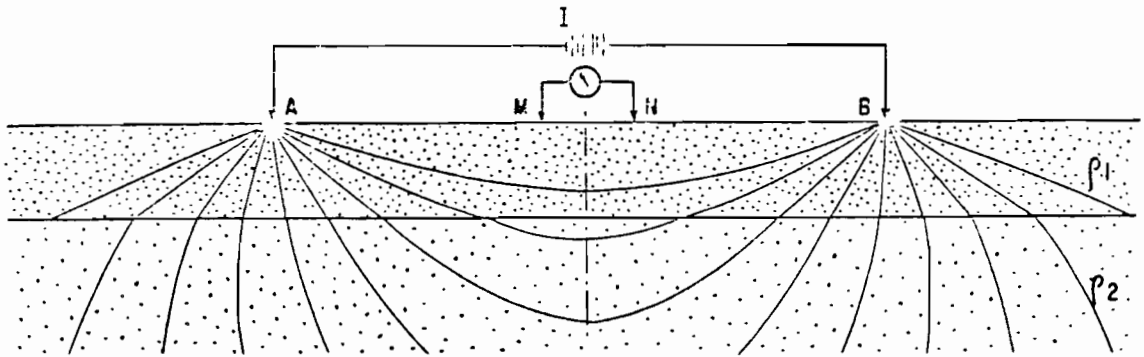


Fig. 49 - Sondage électrique sur deux terrains horizontaux.

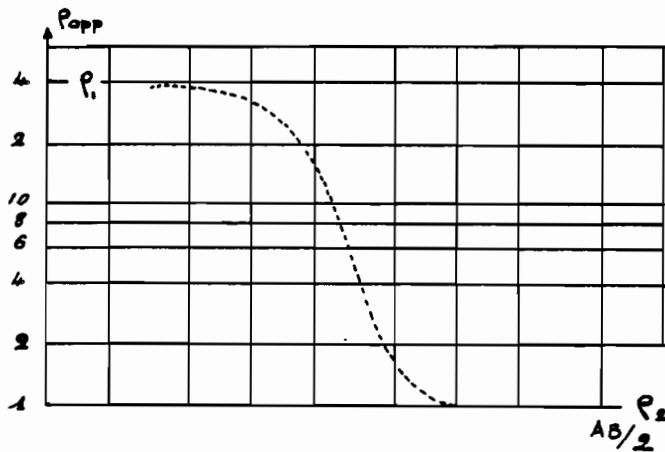


Fig. 50 - Courbe du sondage électrique 2 terrains.

Prenons le cas simple de deux terrains (fig. 49). On commence les mesures avec un AB très court et les filets de courant n'atteignent pas le second terrain. Le diagramme débute par une ρ_a égale à ρ_1 , la résistivité vraie du premier terrain.

On allonge ensuite la ligne et les valeurs atteintes se rapprochent de ρ_2 du second terrain. Si ρ_2 est infinie, la courbe tend asymptotiquement vers la résistivité ρ_2 du second terrain.

On obtient une courbe du type (fig. 50).

L'interprétation des résultats se fait à l'aide d'abaques comme le montre la fig. 51. L'objectif du SE est de déterminer la répartition des résistivités et des épaisseurs des terrains sur une même verticale. Aussi pour atteindre des profondeurs de plus en plus grandes, il faut allonger indéfiniment la longueur des lignes. La profondeur d'investigation est en général de l'ordre $AB/4$.

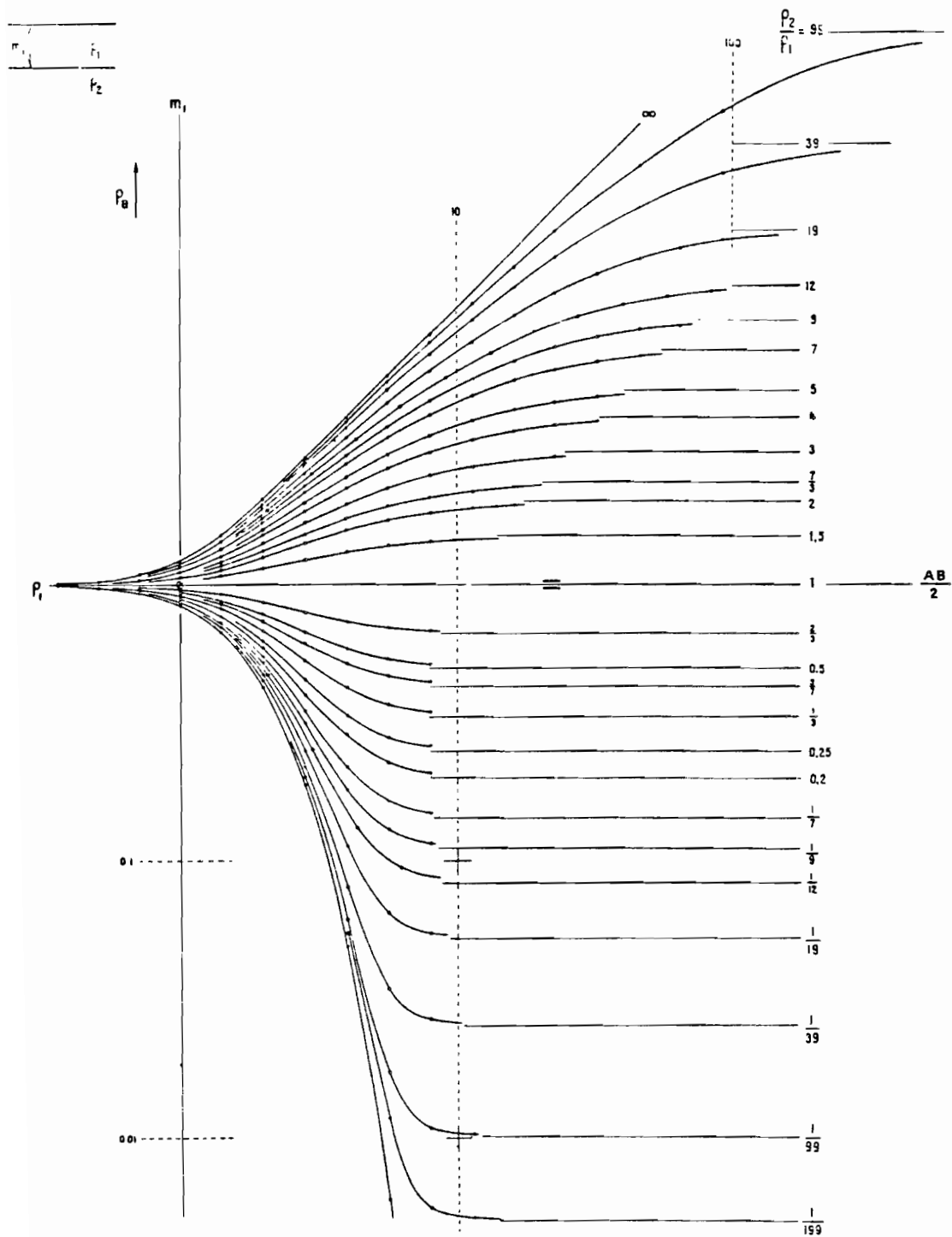


Fig. 51 - Abaque d'interprétation du diagramme.
2 terrains.

- Etude des structures

Quand les couches sont très redressées, il faut faire appel au profil de résistivité. On utilise encore un quadripôle de type du SE à la différence que MN est choisi très petit par rapport à AB et en plus on déplace l'ensemble du quadripôle d'une station à l'autre.

Les résultats peuvent se présenter soit sous forme de courbe ou de cartes d'isorésistivité (fig. 52).

d) Remarques

Le SE permet de déterminer le faciès des couches et leur profondeur par la détermination des épaisseurs tandis que le profil assure la détermination des discontinuités dans les structures.

Si quelques indéterminations demeurent dans certains cas difficiles, ces méthodes présentent l'avantage d'une mise en oeuvre facile et surtout leur interprétation est facile et s'adapte aux besoins de l'hydrogéologue. La réalisation des forages et le relevé des logs lithologiques permettent d'étalonner les résultats de la prospection géophysique.

2.2. Les méthodes sismiques

La sismique est une méthode "dynamique" qui utilise aussi un champ créé artificiellement au moyen d'un choc mécanique ou d'une explosion. On étudie la vitesse de propagation des ondes élastiques issues du choc ou de l'explosion dans le sous-sol. Les lois de propagation dépendent de la structure du sous-sol.

On mesure les temps de propagation au moyen de sismographes placés en surface à des endroits appropriés. On étudie les ondes réfléchies ou réfractées suivant les cas.

Pour les recherches d'eau, on utilise surtout les ondes réfractées : c'est la sismique-réfraction.

Ces méthodes permettent de lever les indéterminations rencontrées dans les méthodes électriques mais elles sont plus coûteuses et leur mise en oeuvre impose des servitudes lourdes : transport, sécurité, etc.

La sismique permet de déterminer surtout la nature et l'épaisseur du recouvrement par l'établissement de cartes d'isobathes.

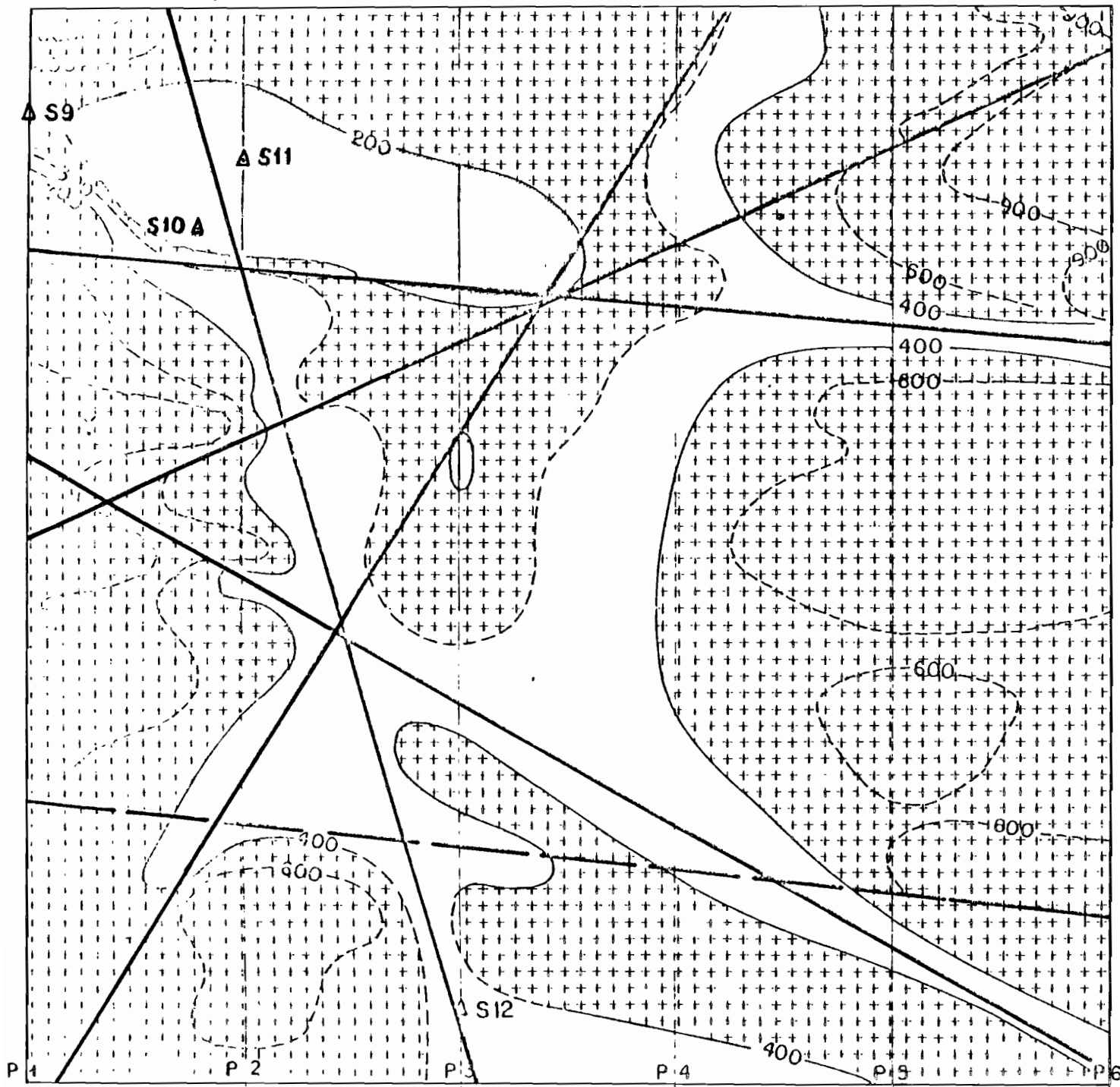


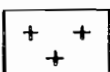

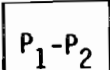
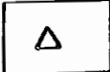


Fig. 52 - Carte de résistivités
(d'après BERGER-ENGALENC,
1975)

-  < 200 Ω.m - Altérites saturées
-  200/400 Ω.m - Altérites sèches
-  > 400 Ω.m - Cuirasse ou granite sain
-  Fracture
-  P₁-P₂ Profils de résistivité
-  Δ Sondage de reconnaissance

120

2.3. Les autres méthodes géophysiques

Parmi les autres méthodes géophysiques, nous allons donner un bref aperçu de celles qu'on peut utiliser dans les recherches d'eaux souterraines.

a) Le carottage électrique

Le carottage électrique ressemble aux méthodes électriques de surface mais les mesures s'effectuent dans un forage. On dispose d'un quadripole analogue à celui utilisé en surface mais les électrodes A d'injection et N de mesure sont placés à l'intérieur du forage non tubé tandis que B et N restent en surface. Les mesures sont enregistrées en plusieurs diagrammes de résistivité et de polarisation spontanée (PS).

Le carottage électrique permet le repérage des différentes couches, la détermination de l'eau contenue dans les niveaux perméables mais accessoirement la porosité de l'aquifère.

b) La polarisation spontanée (PS)

Surtout utilisée en prospection minière pour la localisation de gisements métalliques (surtout les sulfates), la PS est basée sur les phénomènes d'oxydation du minerai. Ce dernier, une fois oxydé, fonctionne comme une pile.

On mesure en surface des différences de potentiel. Les mesures permettent de tracer des courbes équipotentielles PS, lesquelles permettent de localiser le gisement.

Son utilisation en recherche d'eau souterraine est basée sur l'électrofiltration qui peut induire dans certains cas des différences de potentiel.

c) La polarisation provoquée

Utilisée aussi en recherche minière pour détecter des minerais peu conducteurs, la polarisation provoquée (ou induite) est basée sur l'excitation des terrains à l'aide d'un courant. Mais à la différence des méthodes électriques, le courant est coupé avant d'effectuer la mesure.

On mesure ainsi une différence de potentiel dite "résiduelle" qui serait en liaison avec la présence d'eau.

d) La gravimétrie

La prospection gravimétrique utilise les anomalies du champ de la

pesanteur pour dresser des cartes reflétant la distribution des densités dans le sous-sol. L'inégale répartition des densités reflète la structure profonde et peut permettre de repérer les niveaux perméables.

e) Le magnétisme

Le magnétisme est utilisé aussi en prospection minière :

- soit pour la recherche directe d'une substance minérale (exemple : la magnétite),
- soit pour la recherche indirecte : mise en évidence de contacts géologiques ou d'accidents tectoniques invisibles en surface. C'est cet aspect qui intéresse l'hydrogéologue.

Cette méthode est basée sur la mesure du champ magnétique terrestre lié lui-même à la susceptibilité magnétique des roches.

f) Remarques sur les méthodes géophysiques

De ce qui précède, on voit que la géophysique, grâce à la mesure des paramètres physiques des constituants du sous-sol, permet :

- de déterminer la nature des couches : argiles, sables, calcaires, marnes, granite, etc...,
- de préciser leur position en profondeur,
- de localiser avec précision les discontinuités existant dans le sous-sol : contacts géologique, accidents tectoniques.

La géophysique ne permet pas, sauf dans de rares cas de préciser l'existence d'eaux souterraines dans un site donné. L'hydrogéologue, aidé des données géophysiques, doit déduire de l'existence des eaux souterraines.

III - APPLICATIONS DES METHODES GEOPHYSIQUES EN AFRIQUE OCCIDENTALE

La géophysique est employée en Afrique occidentale depuis bientôt 25 ans (alimentation en eau de la ville de Bouaké, 1955-56). Nous ne reprendrons pas ici toutes les méthodes géophysiques susceptibles d'être employées en recherche d'eau dans les régions de socle, qui sont d'ailleurs bien exposées par MATHIEZ et HUOT (1966). Nous allons nous borner aux méthodes qui permettent de répondre rapidement et économiquement aux questions que se pose l'hydrogéologue en région de socle. Ces questions peuvent se résumer comme suit :

- Nature et épaisseur des altérations.
- Zones de forte épaisseur d'altération.
- Zones d'accidents tectoniques : failles, fractures, filons, contacts, etc...

3.1. Les méthodes électriques

Les méthodes les plus couramment employées sont les méthodes électriques. Elles ont été utilisées dès le départ de manière assez systématique pour la localisation des zones de forte épaisseur d'altération. Mais avec l'orientation nouvelle de la recherche, elles interviennent de manière ponctuelle, pour lever des cas d'ambiguïté et préciser la position des zones fracturées.

On demande à la géophysique alors de donner une géométrie assez précise des formations altérées, de confirmer l'existence et surtout la position d'une fracture ou d'un noeud de fractures repéré par photo-interprétation.

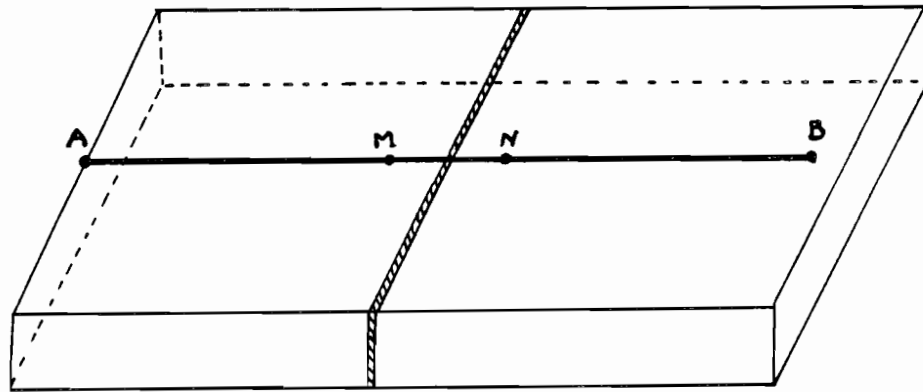
a) Les techniques les plus utilisées

Les techniques couramment employées dans ces recherches demeurent le sondage électrique et le profil de résistivité. Ce sont les deux que nous allons utiliser (voir partie 3, chapitre I, § IV).

Le principe des méthodes électriques étant basé sur la variation des propriétés électriques des roches (résistivité), la zone fracturée et altérée constitue dans le socle sain une anomalie géophysique. Celle-ci correspond à un compartiment conducteur dans un milieu résistant.

On mesure donc à l'aide d'un quadripôle AMNB, les résistivités des roches dans la zone de l'anomalie. En général un seul sondage électrique, implanté sur et parallèlement à l'anomalie peut donner une idée de l'épaisseur et de la nature de la couverture d'altération.

Le trainé (ou profil) de résistivité est implanté de manière à recouper l'anomalie : fracture ou accident supposé (fig. 53). La réalisation d'un profil a pour but de vérifier l'existence d'anomalies conductrices au droit de l'accident tectonique supposé et de préciser la position centrale de celle-ci.



Fracture

Fig. 53 - Implantation du trainé par rapport à la fracture présumée.

En fait, le profil unique est souvent employé car sa mise en oeuvre est simple, rapide et peu coûteuse. Pour vérifier l'extension latérale de l'anomalie et donc sa direction, il est nécessaire de faire plusieurs profils parallèles régulièrement espacés.

b) Caractéristiques

L'efficacité des mesures électriques dépend essentiellement de la nature du recouvrement et de son épaisseur. Le choix d'une longueur de la ligne AB dépendra donc, de la profondeur qu'on veut atteindre, donc de l'épaisseur de recouvrement. La longueur de la ligne AB sera d'autant plus grande que le manteau d'altération est épais.

En fait, on utilise des longueurs peu variables. On utilise couramment :

AB = 180 m avec MN = 20 m en Haute-Volta (C.G.G.)

AB = 200 m avec MN = 20 m en Haute-Volta (IWACO).

AB = 250 m avec MN = 50 m au Nord-Cameroun (Hydrogéologie).

De nombreuses études ont été effectuées dans le socle ouest-africain en vue de repérer les meilleurs sites d'implantation d'ouvrages (BARRAUD J.P., 1960 ; HUOT et MATHIEZ, 1966 ; ENGALENC M., 1975 ; SAWADOGO A.N., 1978, FAILLAT J.P., 1979, etc). De l'ensemble des travaux, nous pouvons dégager avec ENGALENC (1978), l'échelle suivante des résistivités vraies (tableau 10).

Tableau 10 - Valeurs des résistivités vraies en socle de l'Afrique de l'Ouest (d'après des résultats de travaux géophysiques) par ENGALENC (1978).

Roche mère	Nature du faciès du terrain	Valeurs des résistivités ohms-m
GRANITE	Carapace ferrugineuse	300-10.000
	Cuirasse	300-2.000
	Argile	3-30
	Sable argileux	30-50
	Arène argileuse	50-60
	Arène grenue	15-90
	Granite fissuré et altéré	30-200
	Granite sain	> 200
AMPHIBO-LITE	Argile	~ 10
	Roche verte altérée	10-80
SCHISTES	Altérite de schistes	10-30
	Schistes altérés	250-400
	Schistes sains	> 1000

c) Résultat de mesures

Le diagramme type du sondage électrique (SE) est donné en figures 54 et 55. C'est une courbe en fond de bateau qui se termine par une branche montante à environ 45°. Cette branche correspond au socle sain plus résistant.

D'après l'allure de la courbe, la couverture d'altérites se comporte comme un ensemble de couches horizontales au-dessus du socle sain. L'épaisseur maximum d'altération se traduit par des valeurs faibles des résistivités apparentes.

Le sondage électrique donne en général d'assez bons résultats sur la nature du recouvrement et son épaisseur. Cependant la distinction des différents niveaux, arènes argileuses, arènes grenues, socle fissuré et altéré, s'avère quelquefois délicate.

En outre le SE ne permet pas la localisation des zones de fracture. Aussi, on procède à l'étude des variations latérales par la technique du profil de résistivité. Le profil de résistivité permet de situer, de manière précise, un accident repéré sur une photographie aérienne. On obtient une courbe en fond de bateau dont le fond indique la position de l'accident (fig. 56).

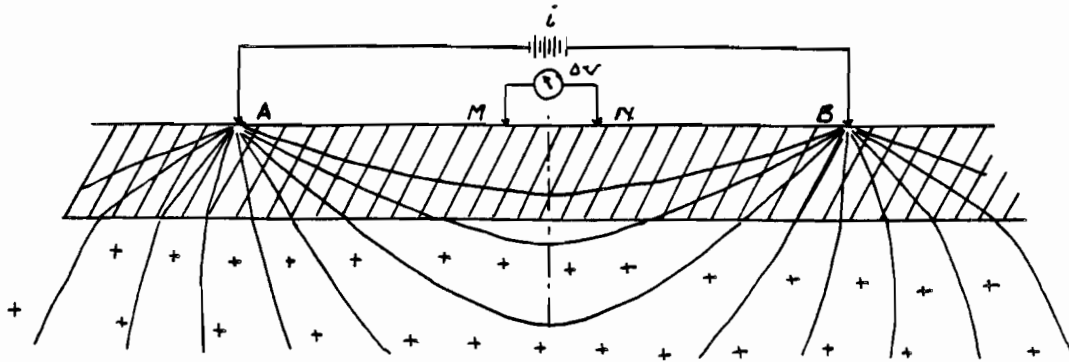


Fig. 54 - Sondage électrique sur un socle granitique recouvert d'un manteau d'altération.

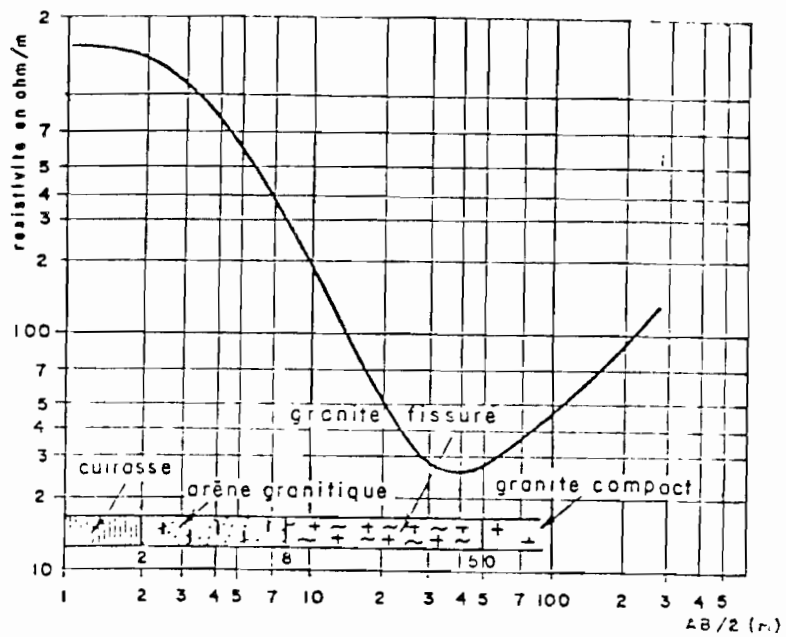


Fig. 55 - Diagramme du SE sur socle granitique et son interprétation (d'après VAUBOURG, 1977).

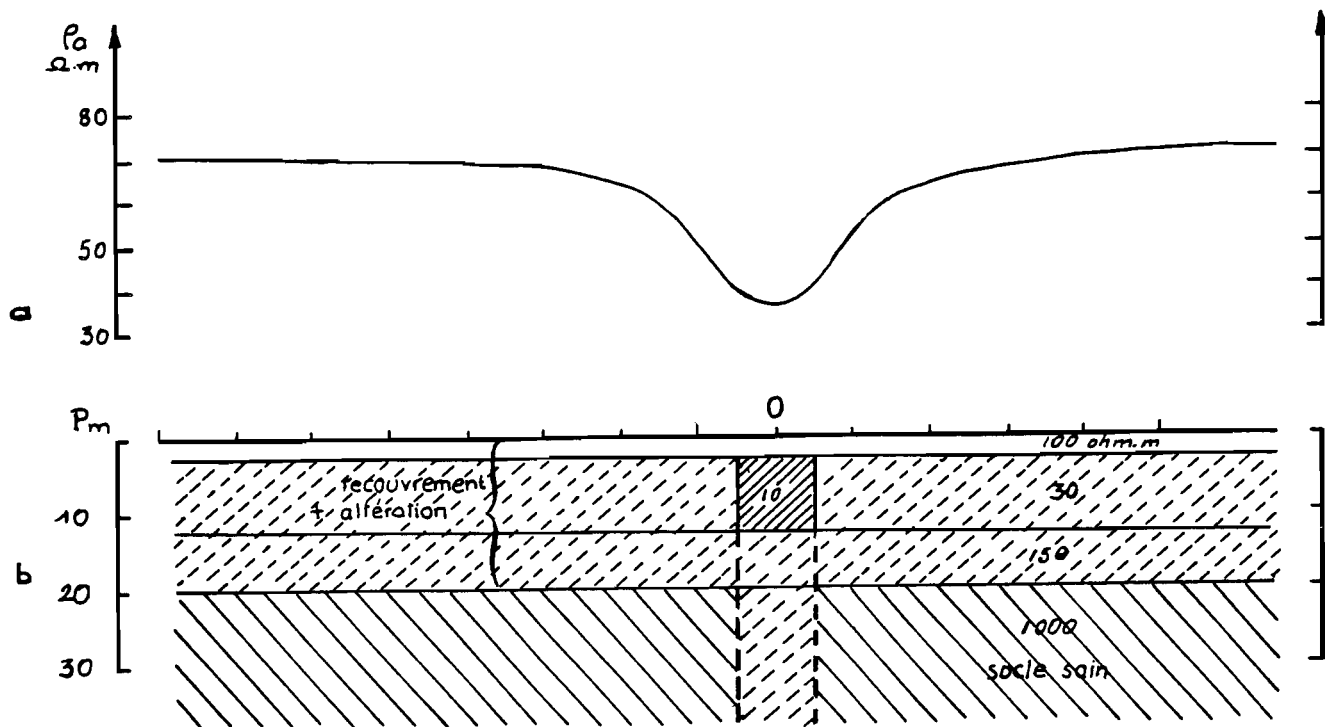


Fig. 56 - Profil électrique au-dessus d'un corps conducteur infiniment allongé.

a - Courbe du profil.

b - Interprétation de la courbe.

On peut dresser des cartes de résistivités apparentes des profils par des mesures faites sur des profils parallèles entre eux. On repère ainsi plusieurs anomalies à la fois (fig. 52). Mais en général, compte tenu du problème posé, on effectue un seul profil (suivi d'un sondage électrique) ou un nombre réduit de profils (2 ou 3) pour repérer la direction de l'accident. Ensuite on peut effectuer un SE pour établir la coupe probable des terrains (profondeur d'altération) au droit de la fracture. C'est cette méthode simplifiée que nous avons utilisée (voir partie III).

3.2. Les autres méthodes géophysiques

a) La sismique-réfraction

Dans la recherche des eaux souterraines en Afrique, la sismique-réfraction est jusqu'ici très peu employée. Pourtant elle se prête bien à la détermination précise du toit de la roche saine par le contraste de vitesse entre la roche saine et l'ensemble : manteau d'altération, plus roche fissurée.

Elle est utilisée en général comme technique d'appoint à la méthode électrique. Son utilisation serait recommandée en zone schisteuse où l'altération est souvent très épaisse (60 mètres de puissance).

b) Les méthodes statiques

Les méthodes statiques : gravimétrie, prospection magnétique, électromagnétique, etc, sont peu ou pas employées en Haute-Volta pour la recherche. Si leur emploi à l'heure actuelle se réduit à la recherche minière, cela se justifie par leur coût assez onéreux. Bien que chères, ces méthodes sont susceptibles d'apporter de bons résultats pour la recherche des eaux souterraines.

IV. AUTRES TECHNIQUES EMPLOYEES EN PROSPECTION ELECTRIQUE

4.1. Sondages pluridirectionnels

Ce type de sondage est depuis peu employé en Haute-Volta par BRIOM H. et LACHAUD J.C. (1979). La méthode utilise le SE classique mais dans ce cas, on réalise plusieurs SE sur un même site dans des directions différentes. Les valeurs des ρ_a obtenus sont portées sur un diagramme pour chaque direction et pour chaque longueur de ligne AB.

Cette méthode met en évidence les directions prédominantes de la fissuration et permet de suivre l'évolution d'une fracture en profondeur (BRION, LACHAUD, 1979).

Le dispositif utilisé pour ce type de sondage peut être le dispositif Schlumberger, les dispositifs carrés ou hexagonaux.

4.2. Trainé en double ligne

Réalisé en Côte d'Ivoire par FAILLAT J.P. (1980), le trainé en double ligne consiste à effectuer des trainés avec deux longueurs de ligne différentes AB. sur un même site. Cette méthode permettrait la détermination de la profondeur du socle sain et de la présence d'altérites épaisses.

4.3. Remarques

Nous venons de décrire les méthodes géophysiques les plus utilisées en Afrique Occidentale pour la recherche des eaux souterraines. Les méthodes les plus employées sont celles électriques. Elles sont basées sur la capacité

plus ou moins grande des roches à conduire le courant.

La conductivité d'une roche dépend de :

- sa composition minéralogique (les schistes sont plus conducteurs que les granites) ;
- son degré d'altération et sa teneur en eau (la conductivité augmente avec teneur en argile et l'état de saturation en eau).

En général, en milieu granitique, les arènes marquent bien en géophysique ; leur extension et leur puissance se déterminent sans difficulté majeure. Les zones fracturées également marquent bien en général par une modification des caractéristiques au niveau de l'accident.

Mais il n'est pas toujours aisé de distinguer l'accident si la chute des ρ_a est due à une augmentation de la teneur en argile ou à la présence d'eau.

V - CONCLUSION SUR LE CHAPITRE III

La géophysique en particulier la prospection électrique, apparaît comme un complément indispensable et déterminant de la photointerprétation surtout dans les zones difficiles (zones de cultures par exemple). Elle permet notamment de :

- déterminer sur le terrain le passage de l'accident photo-aérien,
- préciser la nature de la photo-fracture (simple, complexe ou contact géologique, etc...),
- choisir la zone la plus favorable le long de la fracture ou de la zone fracturée,
- préciser éventuellement le pendage de la zone fracturée.

En outre, la géophysique permet de déterminer l'épaisseur des altérites et la profondeur du socle sain.

Mais, l'emploi de la géophysique se limite à des cas difficiles, surtout dans des pays où avec la décennie de l'eau les forages sont devenus un "commerce", donc la rapidité d'exécution s'impose. La faible utilisation de la géophysique est aussi liée à sa mise en oeuvre plus difficile (transport du matériel sur le terrain, difficultés liées aussi à l'exécution des mesures) et à son coût élevé (une journée de géophysique peut coûter de 50.000 à 75.000 F.CFA).

CONCLUSIONS SUR LA PARTIE II

L'hydrogéologue, en Afrique Occidentale en particulier en Haute-Volta, dispose donc en dehors des études de terrain à l'échelle de l'affleurement, plusieurs méthodes indirectes qui lui permettent de Localiser ces fractures.

La photographie aérienne a fait ses preuves. Dans une zone où la couverture d'altération est de règle, la photo-interprétation s'avère une méthode rapide, efficace et peu onéreuse pour l'étude des structures, en particulier la fracturation.

La géophysique donne de bons résultats quant à la précision qu'elle donne au positionnement des ouvrages sur les zones fracturées et à la détermination des épaisseurs d'altération. Mais sa mise en oeuvre ainsi que son coût plus cher, en limitent l'utilisation aux zones difficiles pour lever les indéterminations.

La télédétection ou plutôt l'image satellite, nouvel outil au service de l'hydrogéologue et du géologue tout court, commence à faire ses preuves. De nombreuses études, réalisées dans d'autres pays, sous d'autres climats : U.S.A., France, Canada, montrent qu'elle permet une analyse structurale globale, en particulier les grands ensembles. La télédétection, à cause de son échelle, s'avère être d'un grand secours pour l'hydrogéologue dans ces zones de sahel pour l'analyse des grandes directions de fractures.

TROISIEME PARTIE
L E S R E S U L T A T S

Chapitre I - PRESENTATION DES RESULTATS

I - INTRODUCTION

1.1. Objectifs de l'étude

L'objectif de ce travail est de tester les données de l'imagerie spatiale pour l'implantation des forages en région de socle sous climat intertropical. Pour cela, on doit établir les relations entre linéaments de l'image et fractures du socle.

Pour réaliser ce travail, nous avons procédé de la manière suivante :

- sélection des zones-tests,
- interprétation des linéaments sur l'image,
- interprétation de la photo-fracturation,
- vérification-terrain,
- analyse comparée des données : image satellite, photographie aérienne et d'autres méthodes (géophysique, forages, etc...).

Nous allons exposer les résultats zone par zone, les données (géophysique, etc...) n'ayant pu être réalisées sur une même zone comme nous l'avions souhaité.

Trois zones ont servi de base à notre étude :

- zone 1 correspond à la zone de Tensobentenga,
- zone 2 est la zone de Mogtedo,
- zone 3, zone de Pilimpikou.

1.2. Remarques sur la méthode

Notre étude s'est effectuée à plusieurs échelles compte-tenu des documents à notre disposition. L'image satellite peut être obtenue aux échelles allant du 1/1000.000^e au 1/200.000^e pour des agrandissements photographiques de bonne qualité. Au-delà du 1/200.000^e, on commence à agrandir les pixels qui deviennent visibles. Ce qui a pour conséquence de faire ressortir le lignage. Néanmoins, on peut obtenir des images de bonne qualité aux échelles plus grandes mais en ayant recours au traitement numérique.

La photographie aérienne disponible est à l'échelle du 1/50.000è. Pour une analyse comparée des deux documents : image et photographie, nous avons agrandi le premier pour l'amener à l'échelle du second et réalisé un document unique en effectuant un report des linéaments sur la photographie aérienne au 1/50.000. Une pareille carte a l'avantage de présenter les résultats sur un même fond topographique mais le dessin est délicat surtout quand les photo-fractures et les linéaments se superposent.

Ainsi pour rendre plus lisibles les résultats, nous avons, par la suite, réalisé des documents séparés. Bien que l'agrandissement ait été effectué manuellement à partir des calques d'analyses ; les documents obtenus sont satisfaisants et superposables.

De la première à la dernière zone-test, certains "outils" d'analyse comme l'analyse structurale et la géophysique ont été utilisés pour obtenir des résultats proches de la réalité.

Ce travail se situe à la charnière linéaments-fractures du socle. Il est d'autant plus important que la fracturation joue un rôle certain dans la circulation des eaux souterraines. La localisation de ces fractures constitue pour l'hydrogéologue du socle, surtout en zone altérée, et érodée, un vrai problème.

II - ZONE DE TENSOBENTENGA

2.1. Cadre géographique et climatique

La zone de Tensobentenga se trouve située à 160 km environ à l'Est de Ouagadougou dans la sous-préfecture de Koupela.

A cheval sur deux cartes I.G.N. au 1/200.000è (feuille de Boulsa ND-30-IV et feuille de Tenkodogo NC-30-XXIV), cette zone a une topographie très plane. Le réseau hydrographique est constitué d'un marigot principal : le Zouli (sur lequel est construit la retenue de Tensobentenga) et de son affluent. Ils présentent de petites digitations qui divaguent sans lit précis sur cette pénéplaine.

Cette zone se situe "en plein" dans le domaine soudanien (fig. 57). Les précipitations ne tombent que pendant 3 à 4 mois dans l'année et la sécheresse, pendant les autres mois, est pratiquement absolue. Comme dans

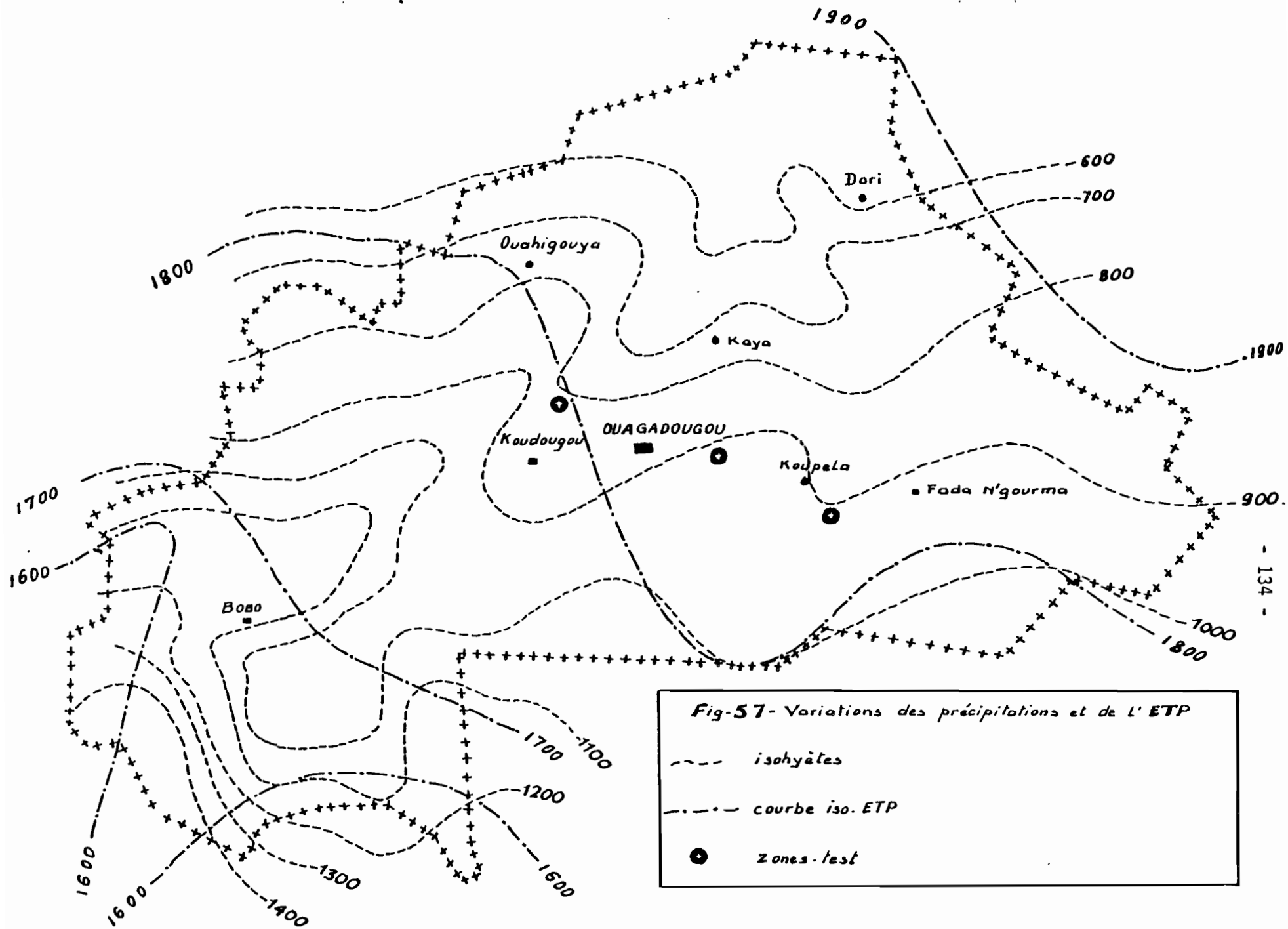


Fig-57- Variations des précipitations et de L' ETP

- - - isohyètes
- · - courbe iso. ETP
- zones-test

toute cette zone soudanaise, la variabilité des précipitations est assez importante : précipitations décennales sèches : 650 mm ; précipitations décennales humides : 1050 mm (ROOSE, 1980). L'ETP très élevée est comprise entre 1800 et 1900 mm. ROOSE (1980) a calculé que dans ces conditions la hauteur de précipitations infiltrées est voisine de 100 mm en année moyenne sous végétation naturelle pour des sols à faibles réserves hydriques (60 mm). Mais quand le sol a une capacité de stockage plus élevée, la hauteur d'eau infiltrée en profondeur peut s'annuler et à fortiori en année pluviométriquement déficitaire.

La végétation de type savane est détruite par la présence d'une population très dense. On y rencontre actuellement la savane "parc" constituée surtout d'espèces présentant un intérêt économique certain : le karité et le néré.

2.2. Cadre géologique et hydrogéologique

a) Cadre géologique

Le substrat géologique peu varié est constitué essentiellement de formations granitiques (fig. 58).

Le socle antébirrimien recouvre toute la zone d'étude. Ce socle est constitué de granites et magmatites indifférenciés. Ce sont en général des granites calco-alcalins variés présentant des affleurements en boules. Des roches basiques leur sont associées ; ce sont essentiellement des amphibolites et des schistes amphiboliques observables dans les villages de Goin-Balogo.

Cet ensemble constitue une ride du bâti antébirrimien et se trouve encadré de formations d'âge birrimien constituées de :

- granites. Ce sont des granites à biotite à gros grains affleurant à l'Est de la zone d'étude. Ils présentent des variations de faciès avec association d'amphiboles (HOTTIN H. et OUEDRAOGO O.F., 1975). Selon ces mêmes auteurs, ces granites qui affleurent depuis la région de Tenkodogo présentent une orientation générale NE-SW. Ces granites affleurent au Sud-Est de Tenso-bentenga et au Nord-Ouest où ils forment "l'assise" de la ville de Koupela.

- formations volcano-sédimentaires. Ce sont des formations d'âge birrimien constituées essentiellement de metabasaltes et d'amphibolo-schistes à la base surmontées d'un ensemble volcano-sédimentaire complexe formé de

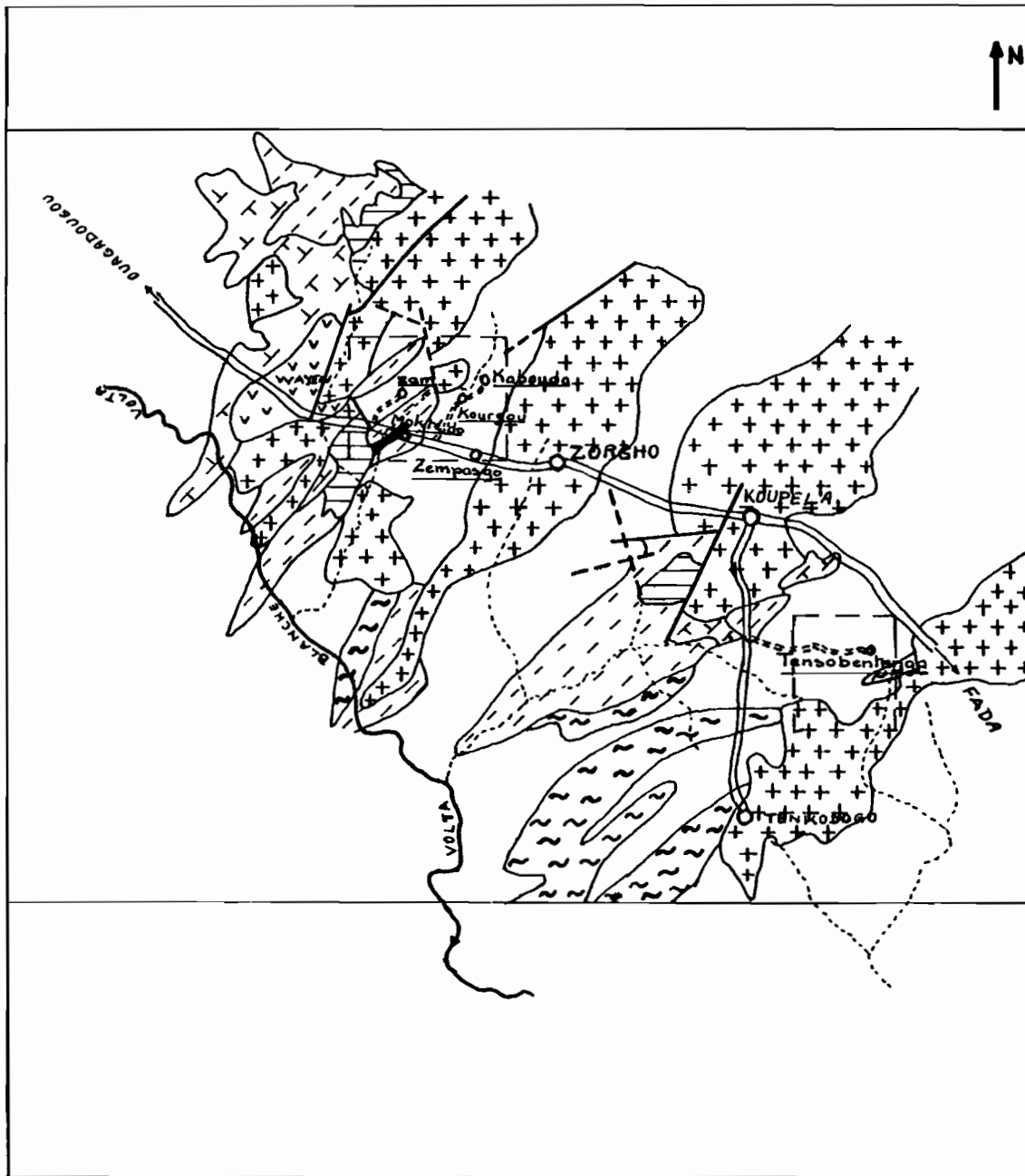


Fig-58 Extrait de La carte géologique de
HAUTE-VOLTA au 1/1 000 000.

(d'après HOTTIN et OUEDRAOGO-1975)

LEGENDE

- | | |
|--|---------------------------------------|
| | Syénite |
| | Granite birrimien. |
| | Métasédiments argileux |
| | Volcanites pyroclastiques |
| | Schistes argileux |
| | Schistes amphiboliques |
| | Leptynites |
| | Granites et migmatites indifférenciés |
| | Fleuve |
| | Rivière |
| | Centre important |
| | Village |
| | Route principale |
| | Route secondaire |
| | Zone d'étude |

sédiments associés à des tufs et des laves. Cet ensemble, très sensible à l'altération, présente très peu d'affleurement. Ce volcano-sédimentaire se localise au Sud de Koupéla.

b) Hydrogéologie

L'hydrogéologie de la zone est simple et on peut distinguer trois principales formations hydrogéologiquement favorables.

- Les formations alluviales. Elles font l'objet d'exploitation intense en fin de saison humide à l'aide de puisards villageois. Localisées le long des marigots, ce sont des formations argilo-sableuses et d'épaisseur généralement faible (1 m à une dizaine de mètre au plus). Elles sont alimentées par les marigots et peuvent constituer dans certains cas de bons aquifères. Mais elles présentent souvent le désavantage de s'assécher très vite et d'être de mauvaise tenue.

- Les formations d'altération. Elles sont issues de l'action de l'eau sur les roches. Très répandues en climat intertropical, elles peuvent donner de bons aquifères si leur épaisseur est importante. Ces formations d'altérations sont exploitées quelquefois par des puits villageois. Elles renferment souvent de grandes quantités d'eau par leur position plus profonde et surtout leur nature plus sableuse en région granitique. Souvent la présence d'une cuirasse les préserve de l'évaporation intense à laquelle sont exposées les nappes d'alluvions.

- Les zones fracturées. Profondément situées, les "nappes" de fractures peuvent donner des réserves en eau exploitables, car elles sont à l'abri de l'évaporation, si elles sont alimentées. Elles constituent donc un "espoir" pour l'alimentation en eau potable des villages dont les besoins en général sont peu importants et oscillent entre quelques dizaines de litres et quelques centaines de litres par jour par habitant.

2.3. Analyse qualitative de la fracturation

a) Objectif

Cette analyse a pour but de sélectionner les meilleurs sites possibles pour l'implantation de forages pour le compte de AJACS (Organisme non

gouvernemental) chargé de l'alimentation en eau des villages de Balogo, Ten-sobentenga, Péotenga, Zéologin, Tougmetenga. Cette sélection, faite en relation avec la position des linéaments, doit permettre de tester ces derniers par des forages.

b) Documents utilisés

Nous disposons pour ce faire de :

- l'image Landsat au 1/500.000^e de la scène 209-52 du 19 mars 1978. Sur le quart nord-est de cette scène couvrant la zone d'étude, seront interprétés les linéaments sur les canaux 5 et 7 sur du papier kodatrace. Le document obtenu sera agrandi à l'échelle de 1/50.000^e pour faire la superposition avec la photographie aérienne.

- des photographies aériennes au 1/50.000^e couvrant le secteur ont été faites par l'IGHV (Institut Géographique de Haute-Volta) en deux missions (18 mars 1978 et 9 novembre 1979). Ces photos prises sensiblement à la même époque que l'image (mars 1978) nous permettaient d'avoir les mêmes conditions de surface sur la zone.

- la carte géologique au 1/1000.000^e de Haute-Volta de HOTTIN G. et OUEDRAOGO O.F. (1975).

c) Réalisation d'une carte de synthèse (planche 1)

- Sur l'image satellite, en plus des linéaments, le réseau hydrographique a été tracé. Ce dernier servira au choix des points repères lors du recalage avec la photographie aérienne.

- L'étude de la photographie aérienne a été faite de manière classique sous stéréoscope à miroir. Nous avons relevé les voies d'accès (routes principales et secondaires), le réseau hydrographique, la morphologie (cuisse, zones d'affleurements visibles, etc...) et enfin la fracturation a été relevée avec le maximum de détails.

Une douzaine de photographies aériennes ont servi à l'interprétation. Les calques issus de cette interprétation ont été assemblés pour donner un document unique présenté à la planche 1. Sur cette carte ont été reportés les linéaments de l'image satellite après agrandissement du calque au 1/500.000^e au 1/50.000^e.

Remarque : La carte géologique ne révèle pas l'existence de fracture au niveau de notre zone d'étude. Celle-ci mentionne seulement l'orientation des structures qui est généralement de direction NE-SW.

d) Résultats et discussion

La carte présentée hors-texte (planchel) est remarquable par l'absence de reliefs surtout en son centre. Les seuls reliefs se limitent à des zones de cuirasses réparties au Nord, au Sud-Est et au Sud-Ouest de la zone. C'est dans ces mêmes zones que se rencontrent des affleurements visibles sur les photographies aériennes. Ailleurs, la plus grande partie de la zone est recouverte d'une couche d'altérites quasi-uniforme.

Si la densité de la fracturation observée sur photographies aériennes est forte, par contre on retient la faible densité des linéaments (au nombre de 7) localisés dans la partie ouest. Leur absence dans la partie est est due au fait que l'image ne couvre pas cette partie. La faiblesse de leur densité serait probablement liée à l'échelle de l'image étudiée (1/500.000). Après agrandissement du calque d'interprétation, on obtient seulement quelques linéaments sur la zone. La direction générale des linéaments est NE-SW avec une direction secondaire NW-SE.

La photo-fracturation présente une direction NE-SW très développée. La direction NW-SE est aussi très bien représentée. Les deux directions dominantes se retrouvent aux deux échelles d'observation : image satellite au 1/500.000 et photographie aérienne. On note par ailleurs une direction N-S surtout à Tougmetenga correspondant à une orientation probablement locale des structures.

Une étude de la fréquence de la photo-fracturation en fonction de la direction donne pour différents secteurs de la planche 1, les résultats suivants :

Secteur	Direction			
	N-S	E-W	NE-SW	NW-SE
Balogo	1	3,8	1,6	2
Tougmetenga	1,8	4,8	1,8	3,6
Zeologin	2	4,2	2,2	3,4

Tableau 11 - Fréquence de répartition des photo-fractures de la planche 1 (par kilomètre).

On peut déduire de ce tableau que : les orientations N-S et NE-SW qui donnent de faibles valeurs de fréquence sont parallèles à la fracturation tandis que les directions E-W et NW-SE donnent de fortes valeurs. Ces deux dernières orientations sont donc perpendiculaires à la fracturation, celle-ci ayant des directions générales N-S et NE-SW.

Enfin, on peut noter aussi la présence de filons généralement de quartz au Nord dans le village de Silmiougou et à l'Ouest de Balogo. Ces filons visibles sur photographie aérienne présentent des directions générales NE-SW.

2.4. Contrôle de terrain

a) Problèmes rencontrés

Dans le cadre d'un programme de réalisation de forage de AJACS concernant le secteur de Tensobentenga, il a été possible de procéder à l'étude de contrôle sur le terrain de la trace des linéaments et photo-fractures relevés par l'étude des documents.

Cette démarche est essentielle. Si ces traces sont nettement visibles, on procède à l'implantation en repérant le site retenu.

Dans le cas contraire, il faut soit avoir recours à d'autres méthodes indirectes, par exemple la géophysique (on en verra un exemple dans le chapitre III), soit implanter les forages sans critères de terrain ; ce qui est très ennuyeux compte tenu des erreurs de positionnement des photo-fractures et surtout des linéaments. Ainsi au 1/50.000^e, 1 mm d'écart d'appréciation entraîne une incertitude de 50 mètres sur le terrain. A l'échelle de 1/200.000 au 1/500.000, échelle des images satellite utilisées, l'incertitude atteint 200 à 500 mètres.

Le contrôle présente des difficultés dues à la conjugaison de plusieurs causes. Il n'existe pas, à notre connaissance, de travaux antérieurs précis sur cette zone (cartes géologique, topographique..). Les cartes disponibles sont au plus à l'échelle de 1/200.000^e. En plus, c'est une région pénéplanée par l'érosion (modèle granito-gneissique) où les activités humaines, en particulier les cultures ont oblitéré les informations de détails de surface.

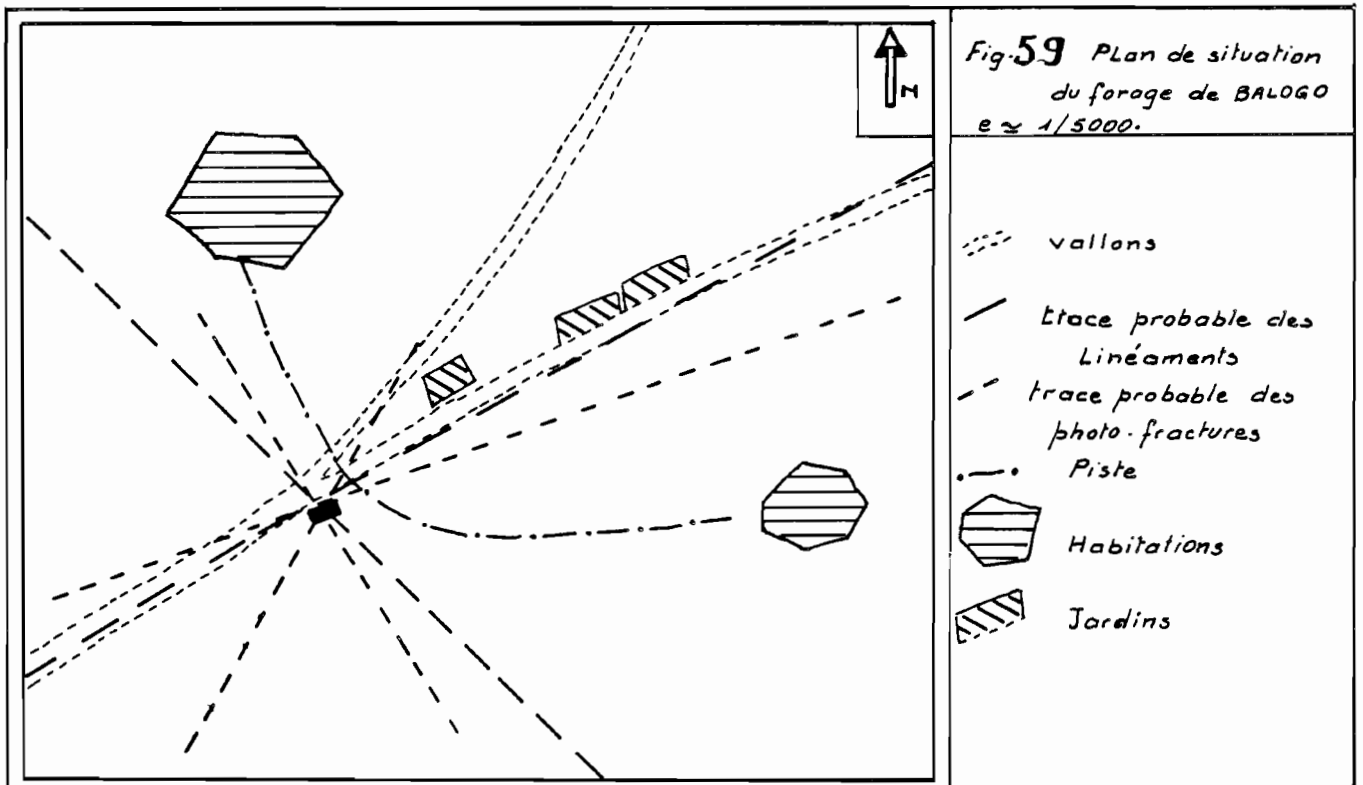
b) Résultats du contrôle

Présentés ici par village, ils se veulent de répondre au souci de l'hydrogéologue pour qui ce contrôle permet de préciser l'emplacement de son ouvrage sur le terrain.

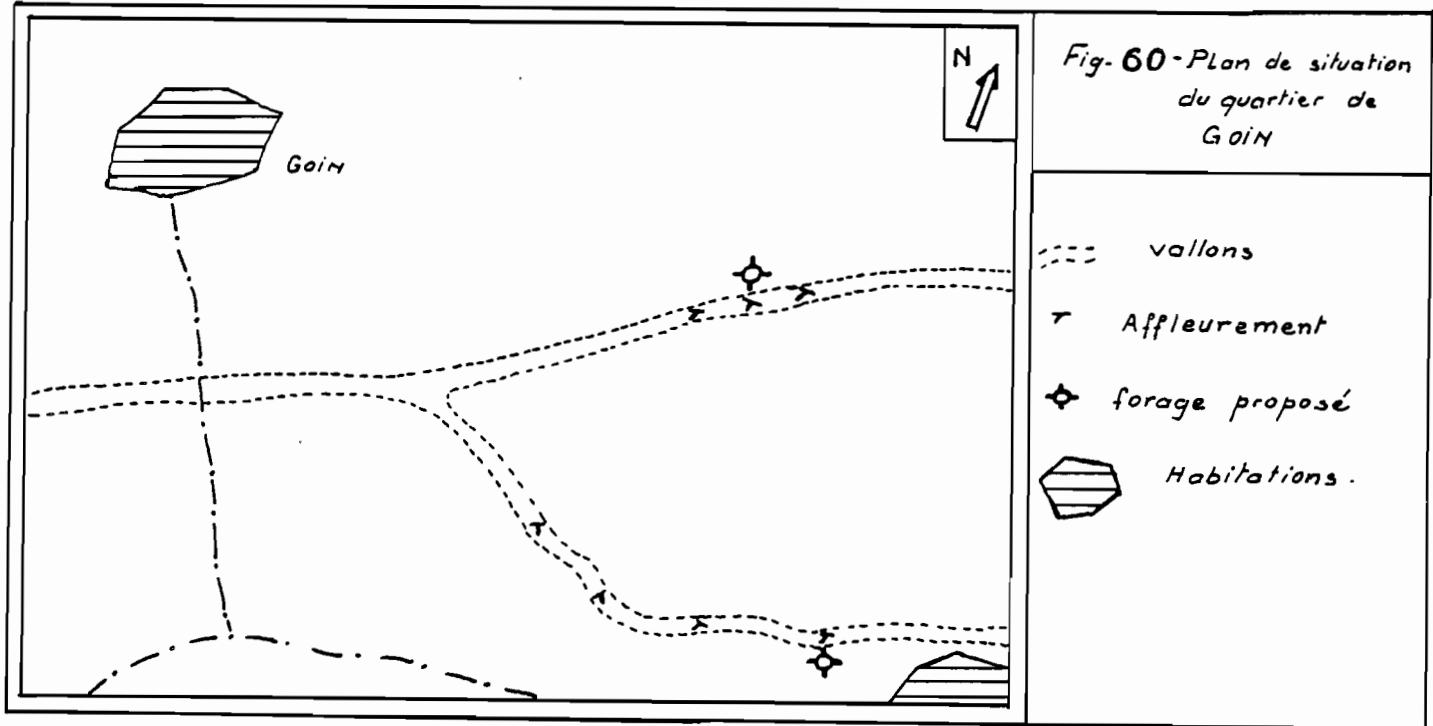
Le village de Balogo

Ce village est situé sur un interfluve sur lequel se sont développés des sols ferrugineux sur altérites aréniformes. Bien qu'un ensemble d'éléments aient été repérés par l'interprétation des documents, la fracturation est difficilement observable sur le terrain à cause des cultures. Un forage réalisé en Novembre 1978 et produisant environ $1,4 \text{ m}^3/\text{h}$ se trouve situé au croisement des deux linéaments. On observe ici une bonne corrélation entre photographie aérienne, image satellite et réalité de la présence d'eau.

On doit noter que ces linéaments sont difficiles à suivre sur le terrain. On ne dispose pas d'éléments vraiment marquants en surface mais on devine assez bien ces linéaments dans la morphologie par un alignement de vallons, c'est le cas en particulier du linéament NE-SW (fig. 59).



Au Sud-Ouest du village de Balogo, à la tête d'un marigot, affleure un granite injecté de schistes amphiboliques et de filons de quartz (fig.60). Cet ensemble apparaît très tectonisé et pourrait constituer une zone favorable pour l'implantation d'un forage. La photographie aérienne nous révèle l'existence d'un croisement de fractures à cet endroit.



A l'Est du village, dans le quartier Natenga, se trouve un puits creusé dans une épaisse couche d'altérites. Le fond du puits situé à 15 mètres environ de profondeur atteint l'arène. Ce puits fournit de l'eau jusqu'en fin de saison sèche. Mais ce puits qui ne traverse pas toute la tranche altérée, mérite d'être surcreusé afin de capter toute la nappe située dans ce niveau.

Le village de Silmiougou

Situé à l'Est de Balogo, on observe des affleurements d'inselbergs de granite notamment dans le quartier de Nabikienga. Les photo-fractures observées sont un mélange de ces inselbergs plus peut-être des fractures. Cette zone d'inselbergs apparaît peu favorable hydrogéologiquement car elle peut correspondre à un centre de maille de fracturation.

Au Nord du village près du marigot, un site estimé favorable a été retenu. Plusieurs facteurs permettent de penser que ce dernier peut être hydrogéologiquement favorable. Il est situé d'une part sur un croisement linéament-photo-fracture et d'autre part en bordure d'un marigot important. La vallée de ce marigot pourrait correspondre au linéament. En plus, cette zone semble correspondre à une bordure de maille, donc fracturée. Mais si l'emplacement retenu s'avère hydrogéologiquement favorable, il ne résout pas le problème de distance dans un village très dispersé.

Le village de Tensobentenga

Un forage existe déjà dans ce village et couvre les besoins de la population. Il y a aussi un barrage qui sert non seulement à arroser des cultures maraîchères à l'aval mais aussi à l'alimentation en eau des animaux. En principe le besoin en eau n'est donc pas impératif.

Mais compte tenu de l'habitat dispersé dans la région, certains habitants pour se ravitailler en eau doivent couvrir des distances non négligeables (de 3 à 5 km à pied). C'est le cas pour le quartier de Zomerboangin, situé plus à l'Est. Dans ce quartier une maille polygonale (fig. 61) est mise en évidence dans la morphologie. Le centre de la maille est occupé par les habitations tandis que ces bordures sont soulignées par de petites dépressions. Dans ce système de maille, les zones favorables se situent dans les raccords des bords de maille.

Nous avons retenu deux sites : le premier est un croisement de linéament et d'une photo fracture formant le bord de la maille, le second situé à proximité du marigot est un croisement de photo-fractures.

Enfin on doit noter que la maille visible sur le terrain fait environ 1 km de côté alors que la photographie aérienne montre des sous-maillles de 400 mètres environ de côté. Par ailleurs le linéament n'est pas visible sur le terrain.

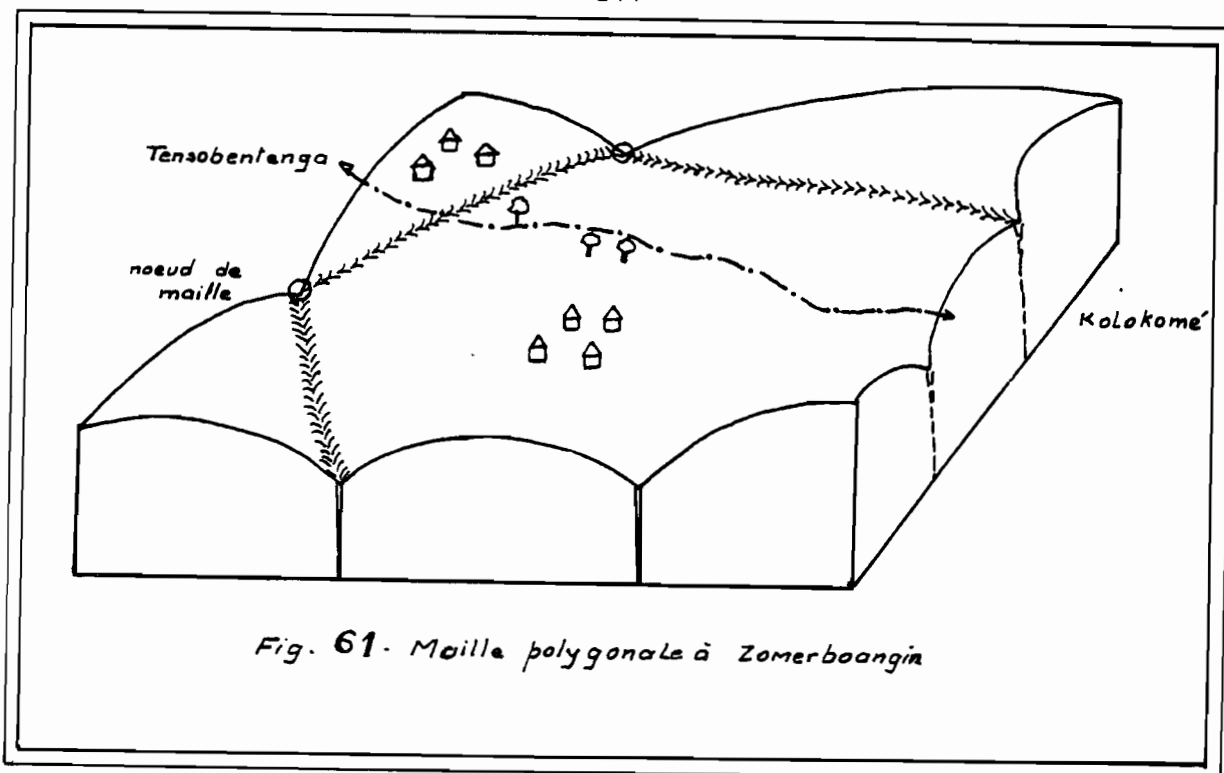


Fig. 61. Maille polygonale à Zomerboangia

Le village de Péotenga

Le village de Péotenga est situé en bordure d'un grand marigot. Les habitants s'alimentent en eau grâce aux puisards creusés dans les alluvions de ce dernier. Dans le Sud du quartier de Kolokomé, se trouve un puits busé. Deux autres puits busés existent aussi plus à l'Est. Ces trois ouvrages arrivent à satisfaire les besoins en eau des villageois. Le problème d'eau n'est donc pas crucial.

La photographie aérienne permet de relever trois grandes directions de fractures (fig. 62). Ces trois photo-fractures se croisent en un point où aboutit le linéament satellite. Sur le terrain, il n'a pas été possible de vérifier la trace du linéament. Par contre les photo-fractures correspondent d'une part à des vallons et d'autre part à un petit rebord de cuirasse. Le site retenu aura valeur de contrôle pour le linéament.

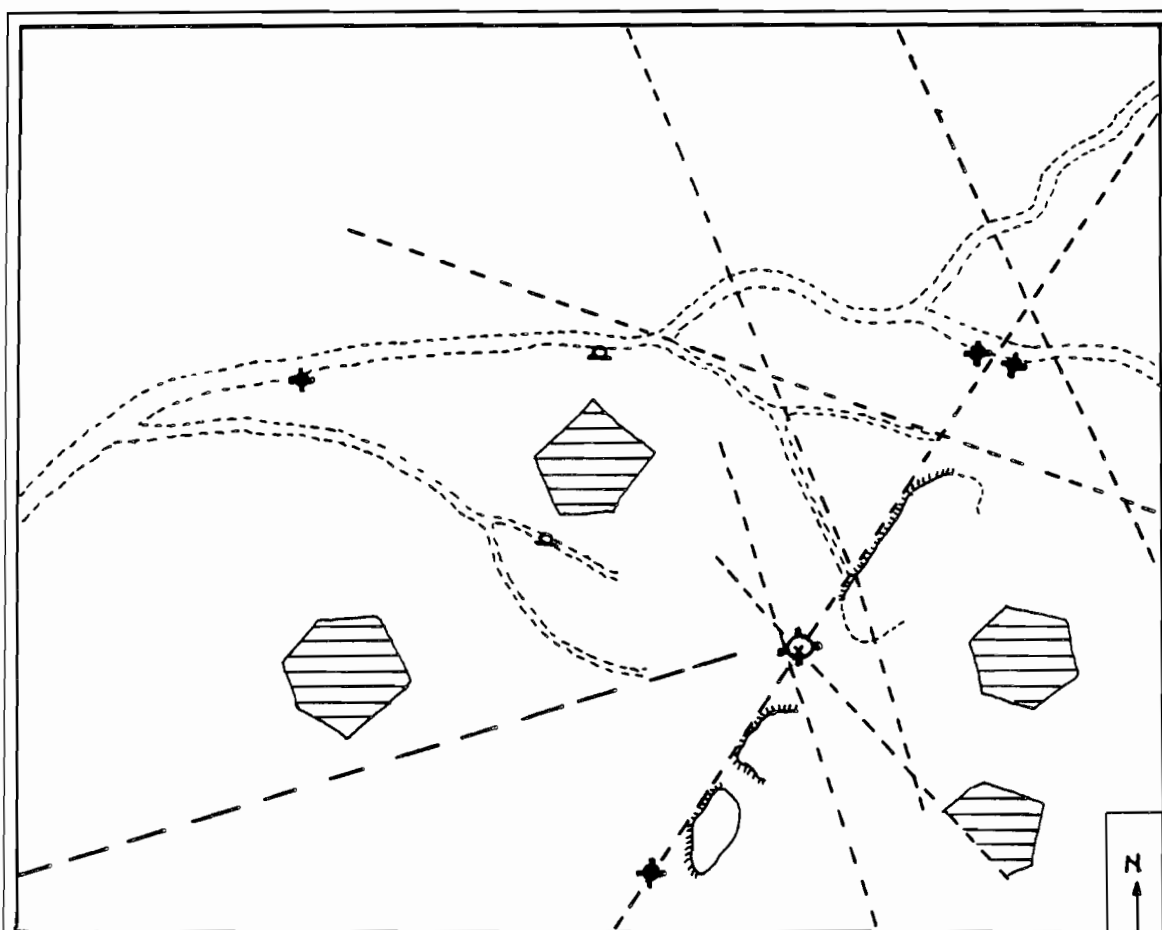


Fig. 62 Plan de situation des ouvrages à Kolokomé

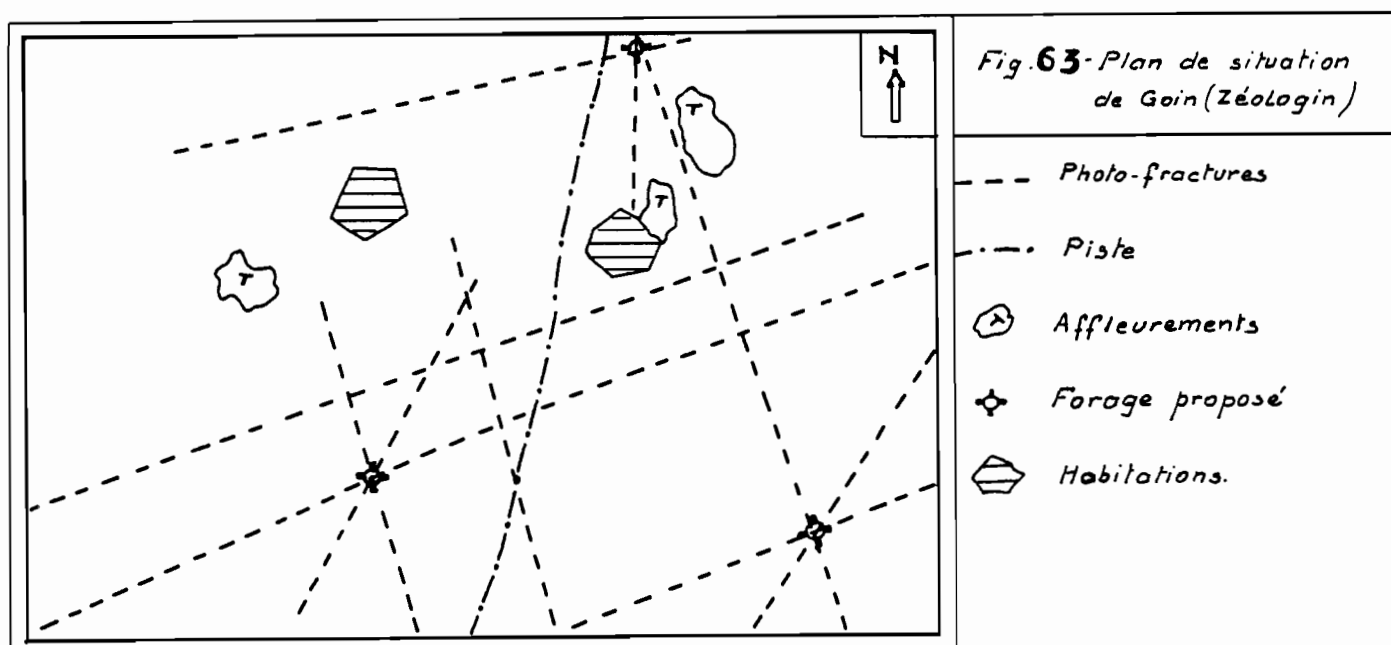
- | | |
|--|--|
|  Vallées |  Puits traditionnel |
|  Linéament |  Puits busé |
|  Photo-fracture |  Forage proposé |
|  Cuirasse |  Habitations. |

Le village de Zeologin

Le problème de l'eau dans ce village a trouvé une solution par l'exécution d'un forage en décembre 1978 dans le quartier de Natenga. Ce forage produisant $1 \text{ m}^3/\text{h}$ atteint une profondeur de 40 mètres. Il est situé au croisement de fractures visibles sur les photographies aériennes. Sur le terrain ces fractures se traduisent par un alignement de vallons.

Cependant le problème d'eau reste posé aux habitants du quartier Goin qui est situé à environ 2 km plus au Nord. Goin est placé sur un sommet (fig. 63). On y observe de nombreux affleurements granitiques injectés d'amphibolites. Des croisements de fractures importantes peuvent être observés au Sud, au Sud-Ouest et au Nord du quartier.

Ces fractures sont marquées à l'Ouest et au Nord par un alignement de ces inselbergs. Les fractures au Sud correspondent à un point de rencontre de petites vallées. Ces trois sites ont été retenus comme favorables mais le dernier (celui du Sud) semble le meilleur parce que situé loin des affleurements et surtout sur des vallées qui pourront favoriser la réalimentation. Par contre il est le plus éloigné du centre du quartier (environ 1 km).



Le village de Tougmétenga

Dans le village plusieurs linéaments se croisent. Ceux-ci sont marqués dans le paysage par des alignements d'affleurements beaucoup plus nombreux et plus importants.

Les altérites sont généralement peu épaisses et la cuirasse a été complètement érodée à l'exclusion du quartier Lealin où on peut observer un morceau de cuirasse encore en place.

Deux puits busés ont été creusés dans les quartiers de Tamasgo et de Natenga. Le premier est situé sur un linéament matérialisé sur le terrain par une vallée à fond plat. Il atteint une profondeur d'environ 10 mètres et fournit de l'eau toute l'année. Le second se situe sur un croisement de photo-fractures dont la matérialisation au sol est difficile à faire.

Dans les quartiers de Lealin et Tempialin, les affleurements granitiques sont abondants. Pour résoudre le problème d'eau, un barrage a été construit en 1980 sur une petite rivière.

Trois sites estimés favorables ont été retenus pour l'alimentation en eau des quartiers de Oudgin et Soum di. Dans le premier, la photographie aérienne révèle deux points de croisement de fractures au Nord et au Sud-Ouest du quartier. Le point nord se situe en même temps sur un linéament de l'image satellite, aussi il a été retenu. Le second croisement au Sud Ouest du quartier semble le meilleur car situé à proximité d'une rivière. Les fractures sont indiquées par des affluents de cette rivière. Dans le second quartier un puits d'une profondeur d'environ 15 m est creusé au centre du quartier. Ce puits traverse toute la couche d'altération et la roche saine est visible au fond. On aperçoit des fractures dans la roche et des venues d'eau faibles. Ce puits surcreusé pourrait fournir assez d'eau au quartier mais cela ne pourrait se faire avec les moyens traditionnels. A l'Est du quartier, la photographie aérienne permet de déterminer un site matérialisé par un croisement de fractures soulignées par des vallons. Un linéament passe sur ce croisement mais au sol il n'existe pas de critères visibles permettant de le retrouver à cet endroit.

2.5. Conclusion

L'analyse qualitative des linéaments et des photo-fractures permet de faire la constatation suivante. Malgré l'énorme écart des deux échelles, les deux documents font ressortir principalement les directions NE-SW et NW-SE. La carte géologique permet de constater que la direction NE-SW coïncide bien avec l'orientation des structures géologiques. Cette coïncidence des directions montre que les linéaments ne sont pas seulement le reflet de phénomènes superficiels mais peuvent "trahir" l'existence de fractures cachées.

L'étude de l'orientation de la densité des photo-fractures suivant plusieurs azimuts et dans différents secteurs de la planche 1 confirme l'importance de la direction NE-SW. De plus, cette quantification montre que localement la direction N-S peut être importante. Celle-ci pourrait traduire la tendance originelle des fosses birrimiennes à l'orientation N-S.

Si le relevé des linéaments sur l'image satellite s'avère assez simple et si la photographie aérienne donne une image assez précise de la fracturation probable, par contre la vérification au sol de cette dernière demeure très délicate. Dans ces régions altérées et couvertes d'une couche d'altérites généralisée et à morphologie très plane, le contrôle sur le terrain rencontre d'énormes problèmes. Le manque de repères, de documents à grande échelle (cartes topographique et géologique), l'oblitération des faciès de surface par les cultures ainsi que la très petite échelle de l'image satellite le justifient.

Néanmoins, le contrôle effectué montre que le repérage se trouve facilité lorsque le linéament correspond à des vallées ou des vallons ou encore à des rebords de cuirasse encore conservée, éléments facilement identifiables dans ce type de paysage (modèle granitique). Comme les rivières y sont souvent surimposées, on retrouve alors les fractures.

Cette étude montre que les linéaments de l'image peuvent bien correspondre à des fractures du socle. C'est ce que nous allons tenter de faire ressortir dans notre deuxième zone-test par une analyse statistique directionnelle des linéaments, de la photo-fracturation et de la petite fracturation au sol.

III - ZONE DE MOGTEDO

3.1. Justification du choix

Plusieurs raisons nous ont amenés à choisir la zone de Mogtedo après les résultats insuffisants obtenus sur la zone de Tensobentenga. Nous en donnons quelques-unes qui sont :

- l'absence presque totale de relief dans la zone de Tensobentenga,
- la situation de cette zone 2, proche de Ouagadougou, nous permettant des vérifications sur le terrain beaucoup plus rapprochées,

- la géologie est plus variée que celle de la zone précédente. On se trouve sur une zone où sont cartographiés à la fois des granites et des formations birrimiennes,
- nous pouvons disposer d'images satellite traitées fournies par l'ORSTOM (cf. Partie II, chap. I, § VI).
- enfin, cette zone fait partie de la zone d'activité de l'A.V.V.*
Ainsi nous pourrons tôt ou tard disposer d'études effectuées par cet organisme.

3.2. Cadre géographique et climatique

a) Cadre géographique

Le village de Mogtedo se situe à environ 85 km à l'Est de Ouagadougou dans la sous-préfecture de Zorgho. La zone étudiée est comprise entre 12°15 et 12°25 de latitude nord et 0°40 et 0°55 de longitude ouest.

Cette zone présente une morphologie beaucoup plus contrastée que la précédente. Elle est recouverte d'une altération latéritique qui donne çà et là de petits reliefs à pente douce recouverts quelquefois d'une cacapace indurée épaisse (environ 1 à 2 mètres) formant des abrupts. Par ailleurs, de nombreux inselbergs en forme de pain de sucre ou de chaos de boules peuvent être observés dans le paysage. Quelquefois ces affleurements peuvent donner des reliefs importants tel le massif de la petite Suisse à Wayen (environ 100 mètres de hauteur de commandement).

Le réseau hydrographique est très irrégulier et se trouve complètement à sec en saison sèche. En saison pluvieuse après une forte pluie, on observe un ruissellement intense avec une forte énergie qui entraîne d'énormes quantités de terre. D'autre part, ce réseau véhicule de grandes quantités d'eau, ce qui pose des problèmes de communication en saison pluvieuse.

Le secteur étudié est arrosé par une rivière principale, la Bombore sur laquelle est construit le barrage de Mogtedo. Un ensemble de petits et grands marigots s'y jettent à plusieurs niveaux et contribuent au remplissage du lac.

*A.V.V. : Autorité de l'Aménagement des Vallées des Voltas.

b) Cadre climatique

Le climat, comme dans la zone précédente, est de type soudanéen à deux saisons bien marquées : une saison sèche très longue d'octobre à mai, et une saison pluvieuse courte de juin à septembre au cours de laquelle se concentrent les précipitations.

La hauteur moyenne interannuelle des pluies est de 850 mm. La concentration des pluies sur une courte période de l'année conjuguée au ruissellement important entraîne un manque d'eau pendant de très longues périodes de la saison sèche. Ce manque est accru par une forte évaporation provoquée par des températures élevées. La température moyenne annuelle est d'environ 35°C. Ces facteurs justifient l'effort mis dans la recherche et la mise en exploitation des eaux souterraines.

La végétation est une savane arborée formée en majorité de *Butyrospermum parkii* (le Karité), de *Parkia biglobosa* (le Néré), de *Adansonia digitata* (le baobab), etc... espèces protégées qui constituent la savane parc.

3.3. Cadre géologique et hydrogéologique

a) Cadre géologique (fig. 58)

La zone de Mogtado se situe dans le sillon birrimien de Zorgho. Les formations birrimiennes forment une bande allongée de direction NE-SW. Elles sont constituées généralement de schistes de composition minéralogique variée : chloritoschistes, séricito-schistes (DUCELLIER, 1963 ; HOTTIN et OUEDRAOGO, 1975). Associés à ces schistes, on rencontre des tufs et des laves, témoins de manifestation volcanique, d'où le nom de volcano-sédimentaire attribué à ces formations par les géologues. On rencontre aussi dans cette zone des granites divers.

Un évènement tectonique majeur affecte cet ensemble birrimien. C'est l'orogénie éburnéenne dont le paroxysme se situe autour de 2000 M.A.*. Cette phase entraîne un redressement des couches birrimiennes et la mise en place de granites syn à tardi-tectoniques.

b) Cadre hydrogéologique

Dans ce secteur, on peut distinguer aussi trois principales unités hydrogéologiques : alluvions-colluvions des rivières, altérites et zones fracturées.

* M.A. : millions d'années.

* Les alluvions-colluvions - Localisés le long des rivières elles constituent les seules sources d'alimentation après le dessèchement de celles-ci. Leur épaisseur est variable et peut aller de quelques mètres à une dizaine de mètres dans les vallées des rivières importantes. De nombreux puisards y sont creusés dont certains peuvent fournir d'assez bons débits (environ 500 l/jour) mais ils se dessèchent tous en fin de saison sèche.

* Les altérites - sont épaisses sur les formations birrimiennes schisteuses mais par suite de leur nature très argileuse, elles constituent de mauvais aquifères. Aussi elles sont très peu sollicitées. Par contre sur les formations granitiques, les altérites sont généralement moins épaisses et plus sableuses. Sur ces formations, elles peuvent donner de bons débits. Les niveaux aquifères des altérites sont captés par l'exécution de puits modernes.

* Les zones fracturées - Les formations birrimiennes : schistes volcano-sédimentaires peuvent donner des débits d'eau importants. Dans son étude "Hydraulique villageoise dans le département du Sahel (Haute-Volta)", SOURISSEAU (1981) donne un taux de succès de 81 % (débit supérieur à $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$) dans ces formations dans l'O.R.D.* du Sahel. Ces zones fracturées seront par conséquent recherchées en priorité pour l'implantation des forages.

3.4. Analyse de la fracturation

L'analyse de la fracturation peut se faire par deux approches :

- une approche qualitative qui permet de dresser les cartes de fracturation,
- une approche quantitative qui permet de caractériser les cartes précédentes par des études statistiques (rose de direction par exemple).

a) Approche qualitative

L'analyse qualitative peut être effectuée à partir des images satellites, des photographies aériennes mais aussi par la géologie. Elle consiste à repérer et à cartographier le plus fidèlement possible les fractures. Au sol, les fractures sont souvent cachées par des éléments superficiels : couvert végétal, altérites, etc... Leur repérage est facilité avec les documents aériens.

* O.R.D. : Organisme Régional de Développement.

* Les images satellites brutes

L'étude de la fracturation sur les images satellites consiste à repérer et à tracer sur un calque les linéaments. Les images utilisées ont été agrandies au 1/200.000.

Pour la zone de Mogtedo, l'étude des linéaments a été faite sur les canaux 5 et 7. Une synthèse issue des deux interprétations a été agrandie au 1/100.000 (fig. 64). On remarque sur cette figure une prédominance des orientations linéamentaires de direction NNE-SSW à NE-SW. La longueur de ces linéaments est variable allant parfois du kilomètre à une dizaine de kilomètres. Cette direction correspond à celle de la tectonique birrimienne.

La carte ainsi obtenue intègre divers éléments : fracturation, lithologie, limite de sols, végétation, etc... C'est une carte de linéaments et de "structure".

* Les images satellites traitées

Le principe du traitement effectué est exposé dans la partie méthodes d'étude, chapitre I, § VI.

Les figures 65 et 66 présentent les linéaments reportés à partir du canal A (combinaison entre les canaux 6 et 7) et du canal B (combinaison des canaux 4 et 5).

Sur le canal A, les linéaments interprétés sont assez denses. On retrouve la direction NNE-SSW à NE-SW prédominante correspondant à la direction birrimienne. Il en est de même du canal B mais ce dernier présente une densité plus faible de linéaments.

Cette différence de densité pourrait avoir au moins trois explications :

Fig- 64 - Linéaments de L'image satellite.



Linéament



Rivière avec vallée inondable



Barrage



Route



Village

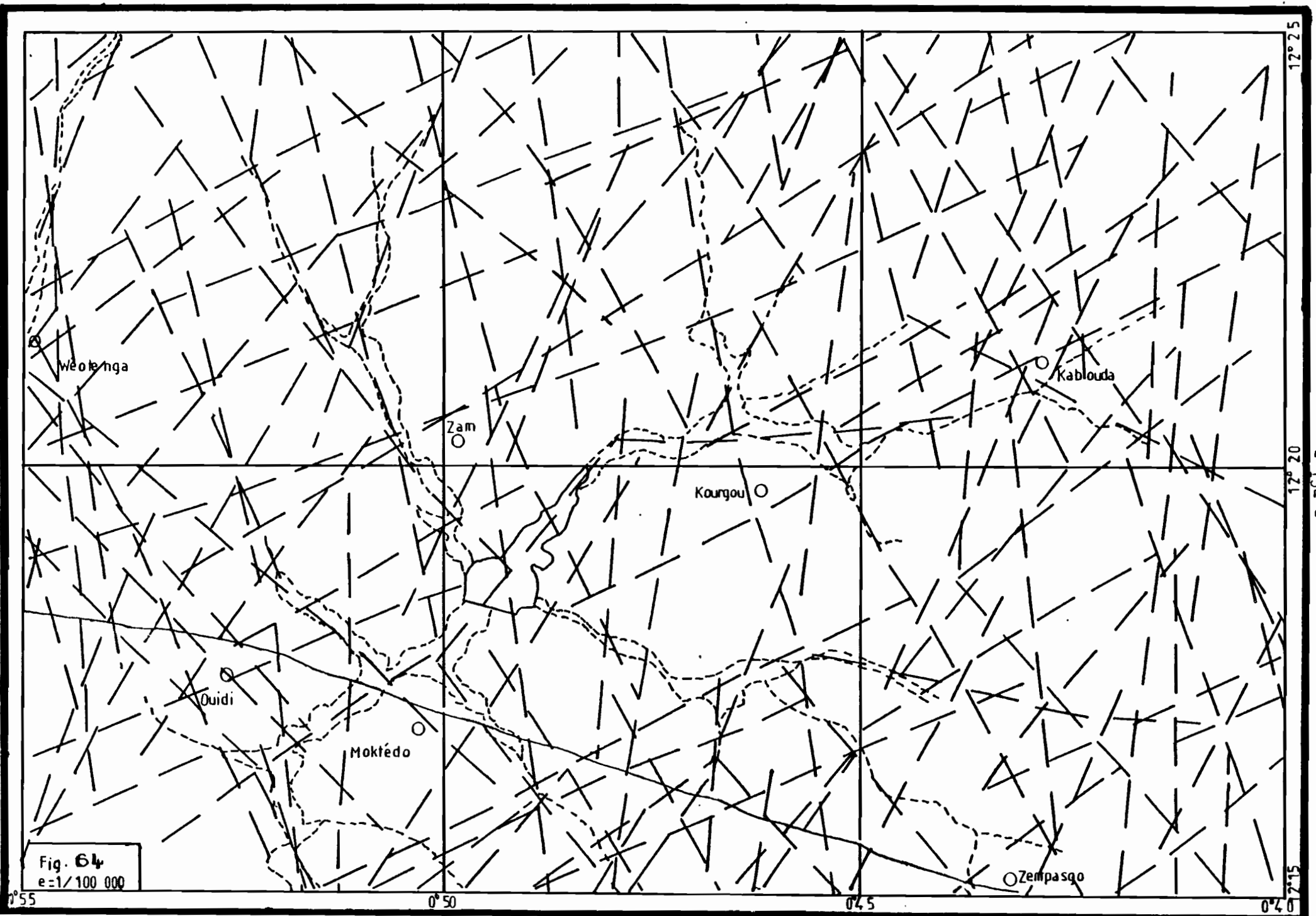


Fig. 64
e=1/100 000

12° 25

12° 20

12° 15

- 154 -


0° 55


0° 50

0° 45

0° 40

Fig-65-Carte de linéament
du canal A

 Linéament

 Barrage

 Village

e = 1/100 000

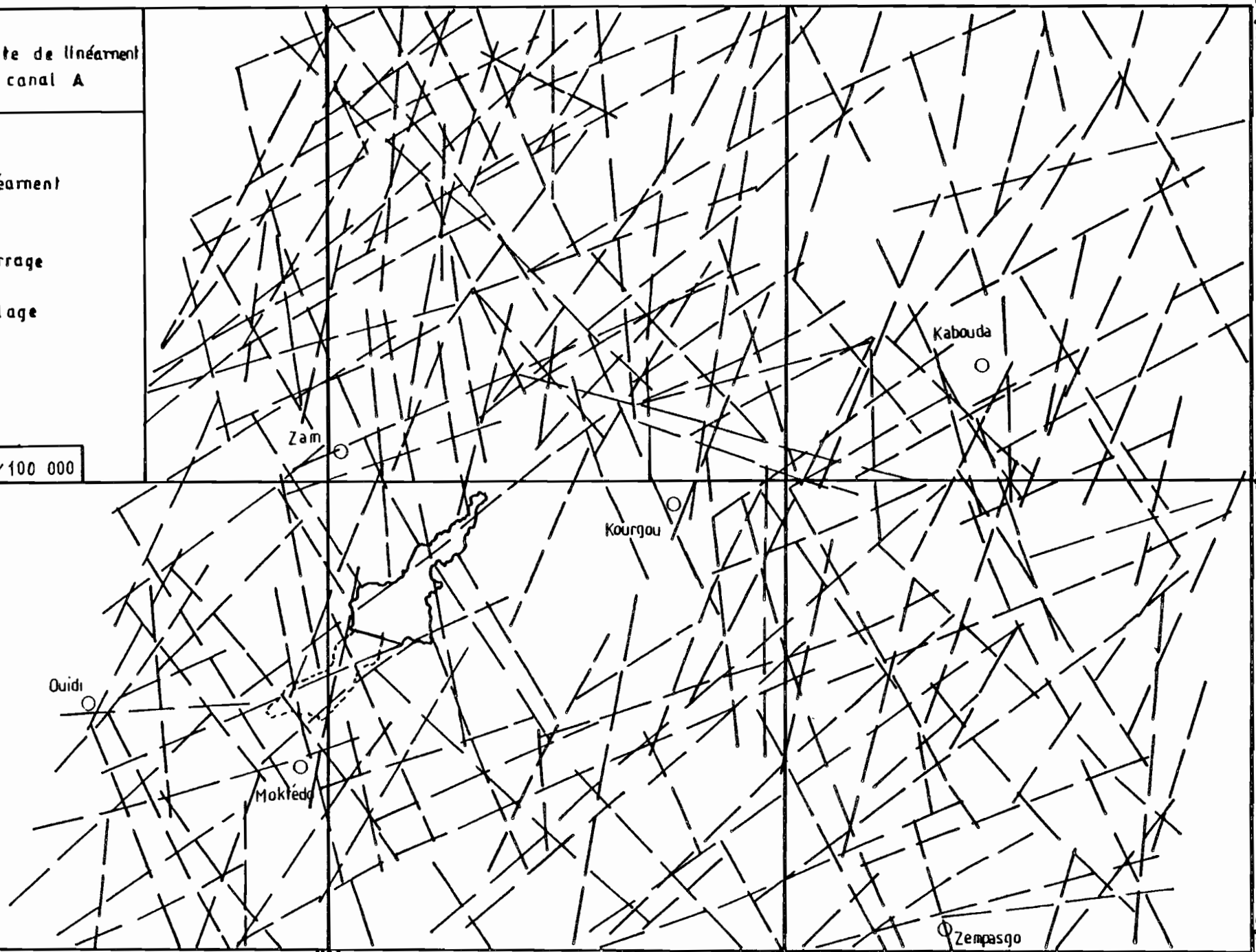


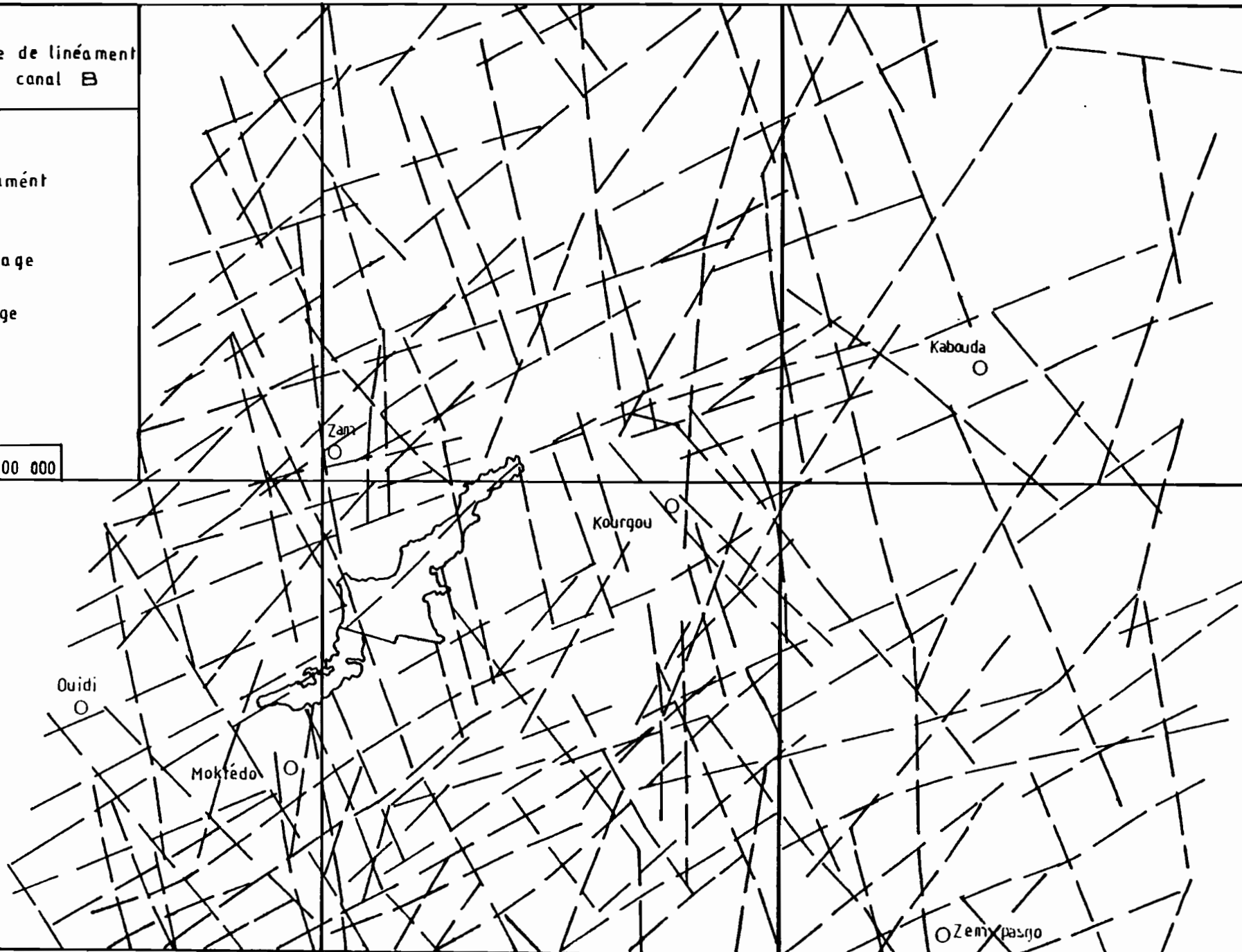
Fig-66-Carte de linéament
du canal B

 Linéament

 Barrage

 Village

e: 1/100 000



0°55

0°50

0°45

0°40

12°25

12°20

12°15

- les canaux A et B sont situés dans deux zones différentes du spectre électromagnétique : le canal A se trouve dans le proche infra-rouge et le canal B dans le visible. La réflectance des objets varie en fonction de leur capacité d'émission ou de réflexion, donc du domaine du spectre, les énergies enregistrées au niveau du capteur varient dans le même sens ;

- le traitement numérique, qui entraîne une détérioration de l'information, peut faire apparaître ou disparaître des linéaments dans un cas comme dans l'autre ;

- enfin, il existe une certaine subjectivité de l'interprétation liée à l'interpréteur. Nous en négligerons les effets en émettant l'hypothèse que la même personne interprète de la même manière.

* Les photographies aériennes (fig. 67)

L'intérêt des photographies aériennes dans l'étude de la fracturation a déjà été souligné au chapitre I.

L'étude des photographies aériennes utilise les traits remarquables de la morphologie. Ce sont les ruptures de pentes, les alignements de vallons ou de crêtes mais aussi les variations de la flore ou de la teinte du sol.

Le relevé de ces traits divers souligne des structures géologiques telles que les limites lithologiques, les failles, les fractures et autres discontinuités (filons, foliations, diaclases...).

Les contacts granites-schistes ne sont pas identifiables sur les photographies aériennes à notre disposition. Nous pensons que cela s'explique par la présence d'une couverture d'altération généralisée et par le faible nombre et la petite taille des affleurements. Les ensembles très reconnaissables sont constituées par des buttes cuirassées. Celles-ci se présentent généralement sous forme de petits reliefs recouverts d'une carapace indurée bien visible. En plus, à l'Est du barrage une colline schisteuse est reconnaissable par sa forme arrondie caractéristique des collines birrimiennes.

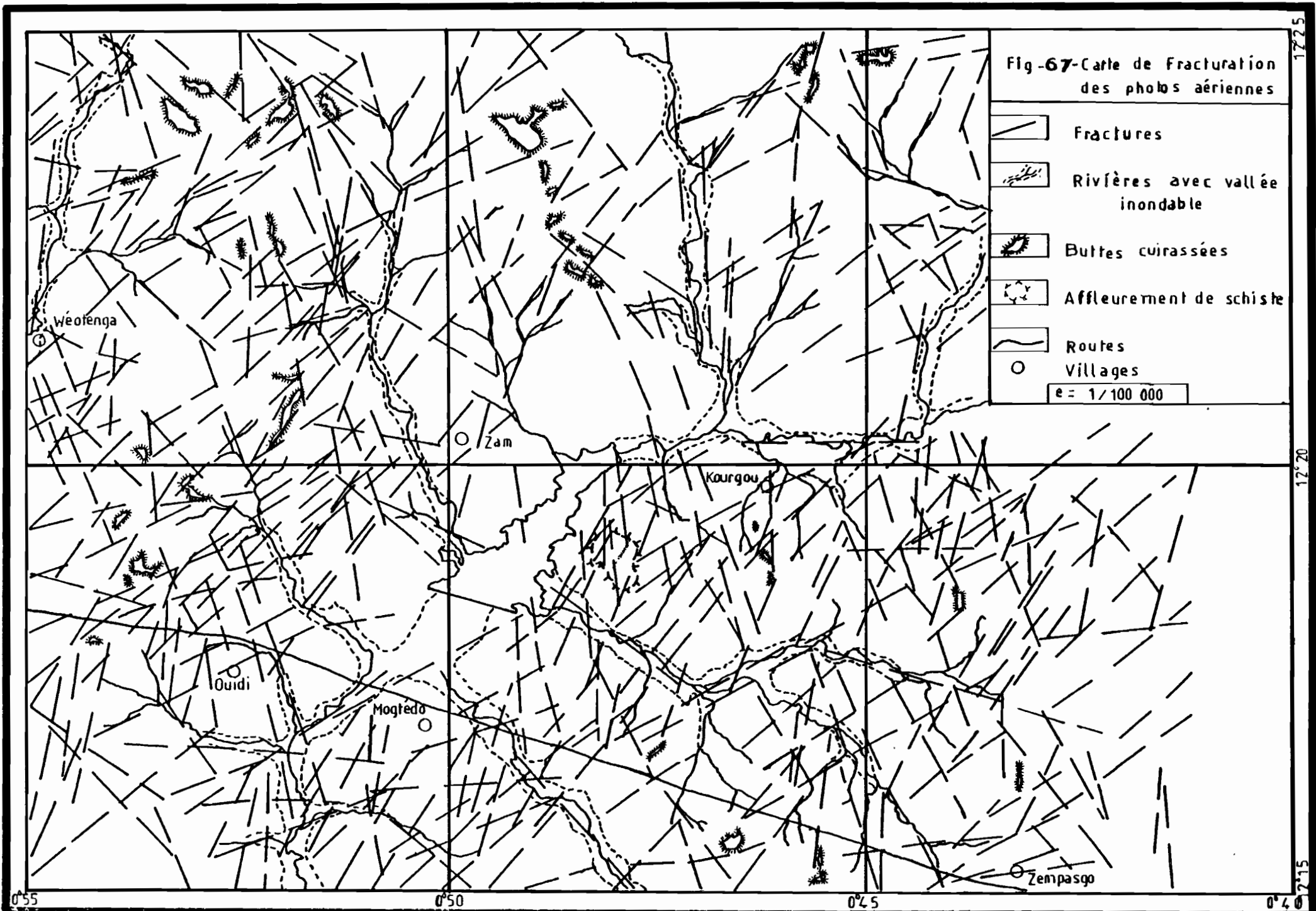


Fig -67- Carte de Fracturation des photos aériennes

- Fractures
- Rivères avec vallée inondable
- Buttes cuirassées
- Affleurement de schiste
- Routes
- Villages

e = 1/100 000

172.5

17.21

17.15

0°55

0°50

0°5

0°4.0

La zone de Mogtedo est couverte par six photographies aériennes à l'échelle du 1/50.000 prises en 1979 par l'Institut Géographique de Haute-Volta (I.G.H.V.). L'interprétation réduite à l'échelle du 1/100.000 est donnée par la figure 67.

La fracturation analysée sous stéréoscope à miroir présente une direction dominante NNE-SSW à NE-SW. Les directions N-S et E-W sont rares voire inexistantes. On retrouve par contre la direction secondaire birri-mienne NNW-SSE à NW-SE.

* Les réalités du terrain

Sur le terrain, l'observation de la fracturation se trouve compliquée non seulement par le manque d'affleurement mais aussi par l'échelle et les critères d'observation qui ne sont pas adaptées pour une personne non entraînée.

Néanmoins sur l'affleurement schisteux à l'Est du barrage recouvert d'une altération en surface, on peut distinguer la direction générale des couches. Celles-ci sont généralement redressées et présentent une direction NE-SW. Dans le village de Ouidi, nous avons mesuré une direction N35°E sur un filon de quartzite et une direction N45°E 75°SE sur un petit affleurement de gneiss. Ce qui correspond assez bien à la direction des photo-fractures représentée sur la figure 67 et des linéaments de l'image brute (fig. 64).

Des alignements de buttes cuirassées de direction NE-SW ont pu être observés sur des distances importantes (1 à 5 km voire davantage). Ces alignements pourraient avoir pour origine des zones fracturées, l'érosion ayant entraîné les parties les plus fracturées de la roche-mère.

* Discussion

L'observation de la carte présentée à la figure 67 permet de constater que la densité des photo-fractures n'est pas homogène sur toute l'étendue de la zone. La variété dans la géologie de la zone étudiée explique ce phénomène. En effet les domaines à forte densité de photo-fractures correspondent aux domaines schisteux alors que les domaines granitiques présentent une faible fracturation. Les observations de terrain ne permettent pas de confirmer ou d'infirmer cette constatation. Par contre les ensembles cuirassés sont plus développés et mieux conservés par les

formations schisteuses. La superposition des figures 64 et 67 montre que certains linéaments de l'image correspondent à des alignements de buttes cuirassées. Le plus remarquable est l'alignement des buttes au Nord du barrage (fig. 67).

b) Approche quantitative

L'analyse quantitative de la fracturation se fait par une approche statistique. Des classes d'orientation arbitrairement établies (2° , 4° ou 10° , etc...) permettent de définir des familles d'orientation.

Des traitements statistiques par ordinateur ont été mis au point pour cette méthode d'analyse (RAZACK M., 1978 ; DUTRARTRE Ph., 1981). Nous ne nous sommes pas servis de ces traitements informatiques, le C.R.T.O. ne disposant pas encore d'ordinateur. Les roses que nous allons présenter ci-dessous ont donc été établies manuellement.

* Etablissement des roses

A partir des figures précédentes, nous avons mesuré les directions des alignements par rapport au Nord. Ensuite, les divers alignements ont été rangés dans des classes de 10° en 10° . Les roses ont été construites en pourcentage de nombre et de longueur des alignements selon les classes choisies. L'objectif de ce travail est de pouvoir hiérarchiser la fracturation en familles d'alignement distinctes.

* Avantages et inconvénients de l'analyse statistique

Si l'analyse statistique présente des avantages tels que :

- différenciation des familles d'orientation,
- caractérisation de ces familles (nombre, longueur, densité, etc...),
- comparaison de familles en fonction du document utilisé (images satellite, photographie aérienne, terrain, etc...),

elle a cependant l'inconvénient de ne prendre en compte que la direction seule de l'alignement. Cette méthode intègre dans une même famille des éléments qui n'ont en commun que leur seule direction mais dont la signification géologique n'est pas toujours certaine.

* Analyse des rosaces

- Rosace de l'image brute

Les rosaces sont présentées à la figure 68 en nombre de linéament et en longueur de linéament. Etablies sur un pas de 10° , elles permettent d'isoler des familles de linéaments :

- en nombre de linéaments, on distingue par ordre d'importance

$N 35^\circ E > N 55^\circ E = N 65^\circ E > N 165^\circ E = N 175^\circ E > N 105^\circ E$

- en longueur des linéaments :

$N 175^\circ E > N 55^\circ E > N 35^\circ E$

Les directions $N 35^\circ E$ et $N 165^\circ E$ font un angle de 50° entre elles. Elles peuvent être considérées comme "conjuguées".

La comparaison des deux rosaces permet de faire les observations suivantes :

- La famille $N 35^\circ E$, la plus importante en nombre de linéament arrive en troisième position sur la rosace des longueurs (fig. 68a).

- On peut dire que la famille $N 55^\circ E$ est formée par une succession de linéaments de petite longueur alors que la direction $N 175^\circ E$ correspond à des linéaments de plus grande importance en longueur.

- Rosace de la photographie aérienne

Sur la figure 69 représentant la distribution de la photo-fracturation, on peut constater que par ordre d'importance les familles qui ressortent sont :

- en nombre de photo-fractures : $N 55^\circ E > N 65^\circ E > N 35^\circ E = N 45^\circ E > N 175^\circ E$

- en longueur de photo-fractures : $N 65^\circ E > N 55^\circ E > N 35^\circ E = N 175^\circ E$

En comparant les deux rosaces, les remarques suivantes s'imposent. Les familles $N 55^\circ E$ et $N 175^\circ E$ faisant un angle de 60° pourraient être des familles "conjuguées". La direction $N 65^\circ E$ devient la plus importante en longueur de photo-fractures mais est en deuxième position en nombre de fractures. La direction $N 175^\circ E$ passe au troisième rang pour la longueur.

La comparaison des figures 68 et 69 montre une coïncidence assez bonne des directions principales (en nombre) mais en longueur l'image satellite fait ressortir la direction $N 175^\circ E$ alors que sur la photographie aérienne c'est la direction $N 65^\circ E$ qui est la plus importante. L'échelle des deux documents et l'orientation générale des formations birrimiennes permet de comprendre cette différence. Le réseau hydrographique principal de la zone a une orientation NE-SW sensiblement $N40-60^\circ$. Il suit la direction

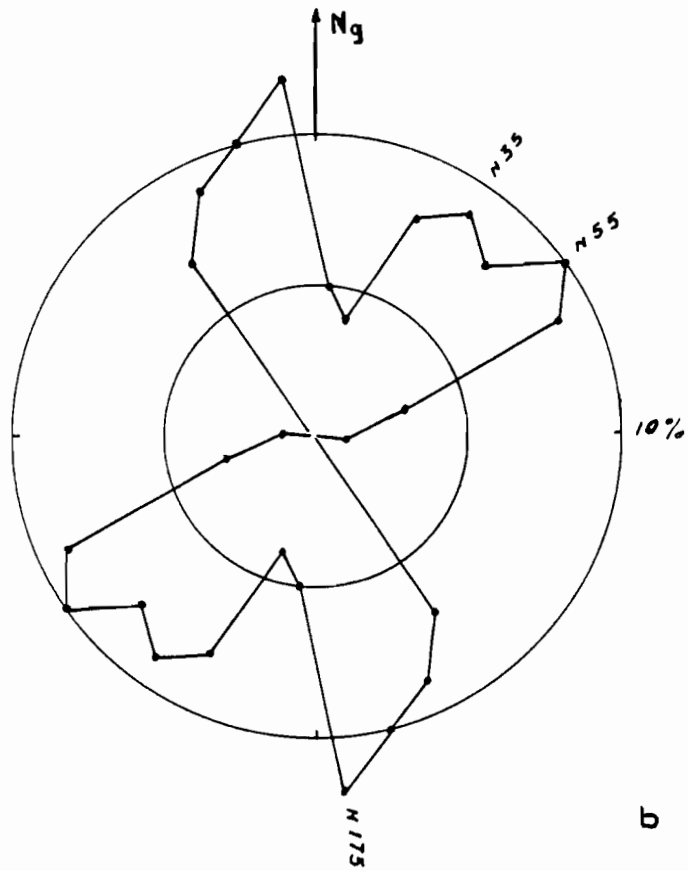
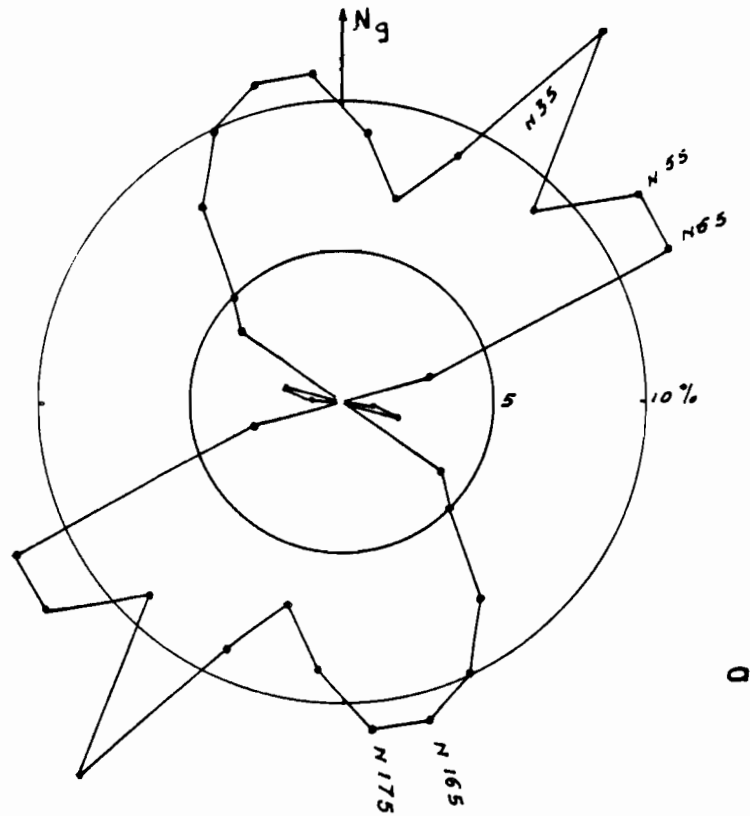


Fig. 68 - Caractérisation statistique des populations de linéaments (pas de 10°) de l'image satellite.

a - nombre de linéaments.

b - longueur de linéaments.

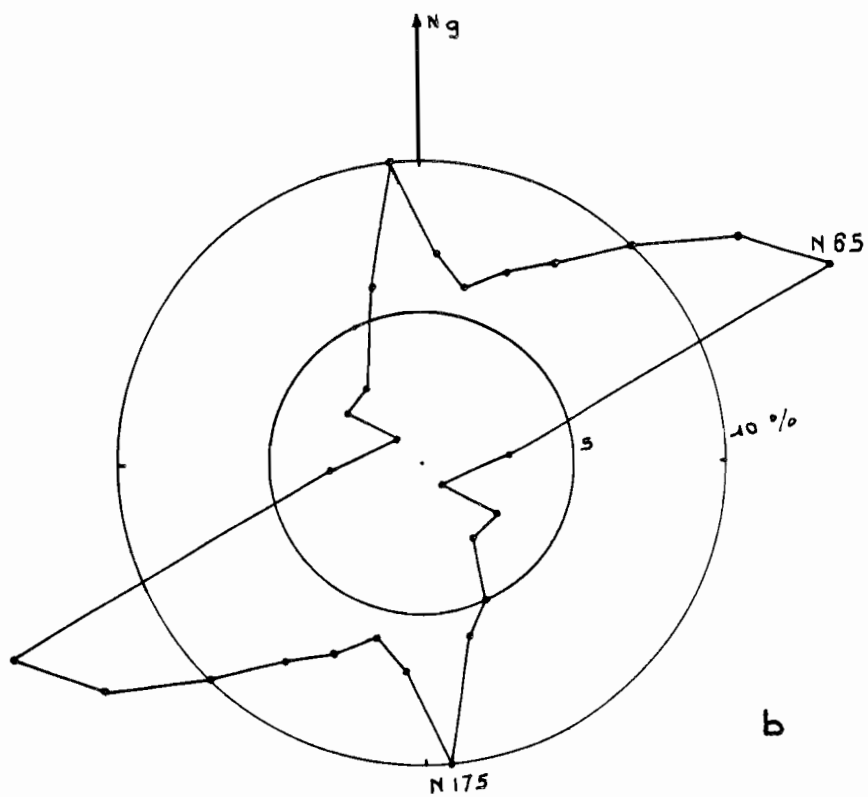
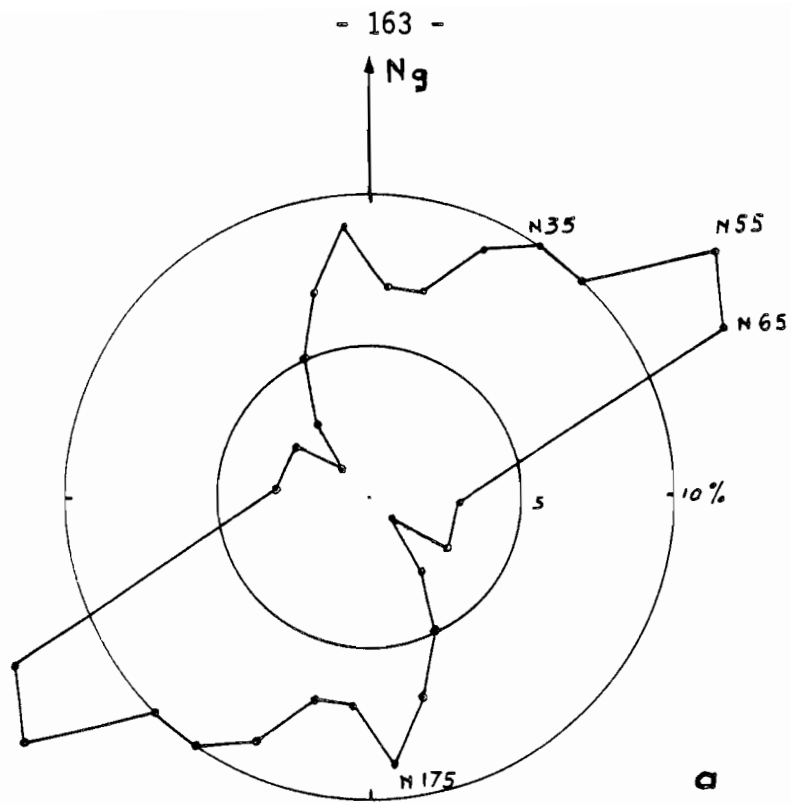


Fig. 69 - Caractérisation statistique de la fracturation de la photo aérienne (pas de 10°).

a - nombre de photo-fractures.

b - longueur de photo-fractures.

de la tectonique régionale, alors que les affluents de ce réseau s'orientent suivant une direction NW-SE à N-S. La photographie aérienne ne permet pas de percevoir dans sa continuité cette direction alors que l'image favorise cette intégration. La direction principale NE-SW ressort bien en nombre sur les deux documents mais seule l'image satellite permet une meilleure intégration de la famille N 175°E, faible en nombre mais importante en longueur.

- Rosace du canal A (fig. 70)

Rappelons que ce canal est issu de la combinaison des canaux 6 et 7 en projection orthogonale. Les principales familles obtenues par ce canal sont :

- en nombre de linéaments :

$N 55^{\circ}E = N 65^{\circ}E > N 25^{\circ}E = N 35^{\circ}E > N 05^{\circ}E = N 145^{\circ}E$

- en longueur de linéaments :

$N 55^{\circ}E > N 65^{\circ}E > N 35^{\circ}E > N 145^{\circ}E > N 05^{\circ}E$

On observe une certaine homologie des deux rosaces. La famille N 55°E apparaît aussi bien en nombre qu'en longueur de linéaments. Le pic N 25°E disparaît sur la rosace des longueurs, seule demeure la famille N 35°E.

- Rosace du canal B

Le canal B est obtenu par une combinaison des canaux 4 et 5 de l'image satellite, tous deux situés dans le visible. Sur ces rosaces (fig. 71), il apparaît nettement quatre familles de linéaments bien distinctes,

- en nombre de linéaments :

$N 65^{\circ}E > 165^{\circ}E > N 45^{\circ}E > 145^{\circ}E$

- en longueur de linéaments :

$N 65^{\circ}E > 165^{\circ}E > N 45^{\circ}E > N 145^{\circ}E$

Les quatre familles ressortent dans le même ordre quelle que soit la rosace, d'où une certaine homogénéité de représentativité aussi bien dans la quantité que les longueurs. Cette nette discrimination donnant quatre familles s'explique non seulement par le traitement mais surtout par la longueur d'onde des canaux ayant servi à celui-ci.

Les directions (N 65°E et 165°E) et (N 45°E et N 135°E) formant entre elles un angle de 80° pourront "à la limite" être considérées comme des familles conjuguées.

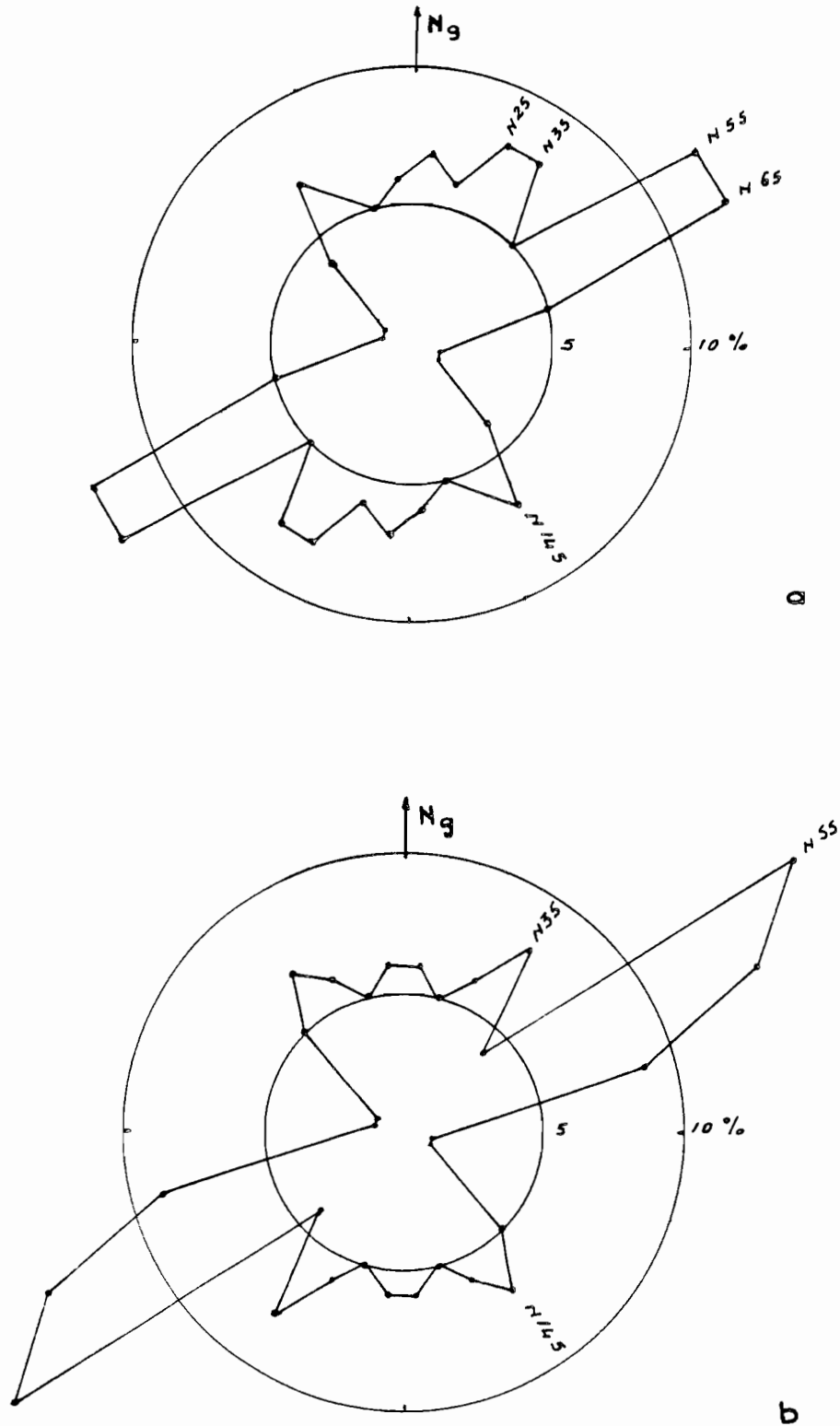


Fig. 70 - Caractérisation statistique des linéaments du canal A (pas de 10°).

- a - nombre de linéaments.
- b - longueur de linéaments.

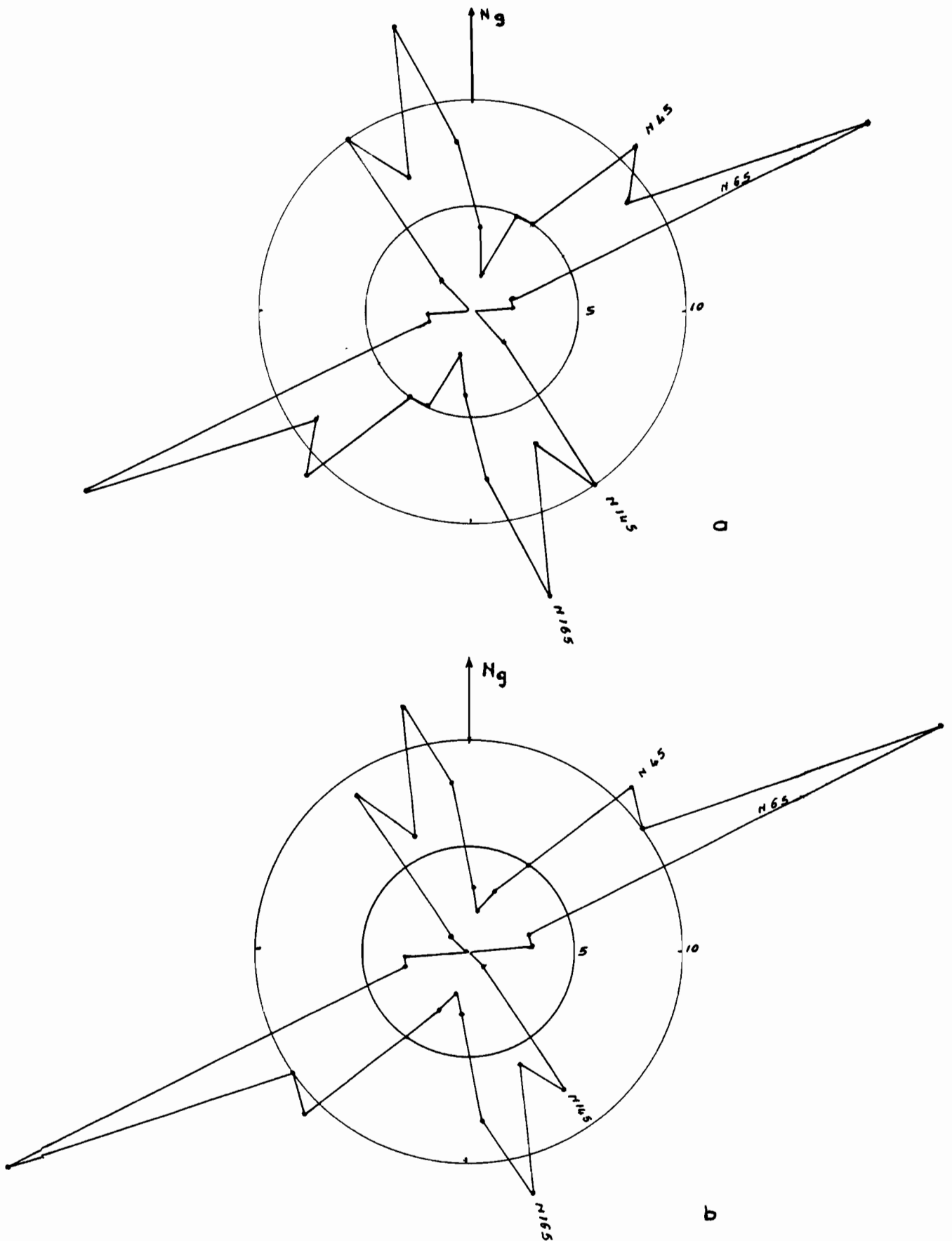


Fig. 71 - Caractérisation statistique des linéaments du canal B (pas de 10°).

a - nombre de linéaments.

b - longueur de linéaments.

- Analyse comparée des rosaces

L'observation des figures 68, 69 et 70 montre que les trois rosaces montrent une bonne corrélation pour les directions N 55°E et N 65°E aussi bien en nombre qu'en longueur ; par contre la direction N 175°E disparaît sur la rosace du canal A. On en déduit que le traitement utilisé entraîne un filtrage de cette direction sur les deux rosaces. La direction N 55°E acquiert une importance avec le traitement en particulier pour la longueur (19 %).

La figure 71 comparée aux rosaces de la photographie aérienne et de l'image satellite montre un renforcement très net de la direction N 65°E (20 % en nombre et 28 % en longueur). On remarque une meilleure discrimination des familles N45°E, N65°E, N145°E et N175°E. Ces directions se retrouvent sur les figures 68 et 69 avec moins de netteté.

Les canaux A et B sont situés dans des domaines différents du spectre électromagnétique : le canal A se trouve dans l'infrarouge alors que B est situé dans le visible. En effet la capacité d'absorption et de réflexion varie selon le domaine considéré du spectre.

L'eau et les zones hydromorphes apparaissent en gris sombre voire noir dans le canal 7 (à cause d'une forte absorption du rayonnement IR) et en gris clair sur le canal 5 (dû à une forte réflexion du rayonnement rouge). Tandis que la végétation apparaîtra en noir dans le canal 5 (forte absorption du rayonnement rouge par les feuilles des végétaux) et en gris clair sur le canal 7 (faible absorption du rayonnement IR par la végétation chlorophyllienne).

On peut dire que la famille N175°E qui disparaît sur le canal A (infrarouge) est soulignée par des éléments qui ont une faible absorption dans ce domaine du spectre. Il pourrait s'agir d'alignements de végétation. Par contre la direction N40°E à N60°E qui sort bien sur ce canal et qui se trouve renforcée sur le canal B correspond à des éléments à forte absorption dans le visible et moyenne dans l'infrarouge. Cette direction serait soulignée probablement par une végétation abondante développée sur des zones hydromorphes.

Comme des sols hydromorphes sont plus abondants le long des grands marigots qui ont une orientation N40°E à N60°E, on comprend alors que cette direction soit accentuée sur le canal B. Alors que la direction N175°E, qui

correspond à des affluents de petite taille portant une végétation active mais sans développement d'hydromorphie, disparaît dans le canal A. Ceci explique aussi les différences observées sur les rosaces 68 et 69.

Ainsi les rosaces de chaque document montrent une répartition particulière des linéaments que l'on peut résumer par le tableau suivant :

Caractérisation	image satellite	Photographie aérienne	Canal A	Canal B
Directions les plus nombreuses	N35° N55° = N65° N165° = N175°	N35° = N45° N55° N65° N175°	N25° = N35° N55° = N65° N145° N 05°	N65° N165° N 45° N145°
Directions les plus longues	N175° N 55° N 35°	N 65° N 55° N175° = N45°	N 55° N 35° N145° N165°	N 65° N165° N 45° N145°
Directions probablement "conjuguées"	N35°-N165° 2θ = 50°	N55°-N175° 2θ = 60°	-	N45°-N165° 2θ = 80° N65°-N145° 2θ = 80°

Tableau 12 - Comparaison des principales directions de fractures et de linéaments par différents documents d'analyse.

- Avantages du traitement numérique

La comparaison des rosaces de l'image satellite et des rosaces des canaux permet de tirer les enseignements :

* Le canal A favorise une meilleure sélection de la direction N40°E à N60°E qui correspond à la tectonique régionale reconnue dans les formations birrimiennes.

* Le canal B fait ressortir deux directions complémentaires mais la direction NNW-SSE est moins accentuée.

Grâce à l'analyse quantitative de la fracturation, on peut caractériser les familles de fractures et même définir les familles hydrogéologiquement favorables. En effet, on peut essayer d'expliquer le comportement hydraulique des familles majeures par les hypothèses suivantes :

* La famille N40°E à N60°E comporte des fractures importantes accompagnées probablement de panneaux de broyage où se développent des zones hydromorphes. Les fractures de cette famille auraient tendance à "attirer" les eaux infiltrées mais elles s'avèrent hydrogéologiquement défavorables

si elles ne sont pas accompagnées de filons, l'altération argileuse colmatant les fissures.

- * La direction N165°E à N175°E comporterait des fractures "discrètes" sans broyage, peu nombreuses mais de grande longueur. Elle permet probablement de canaliser les eaux d'infiltration vers les zones broyées. En milieu altéré comme dans la zone-test, elle pourrait être hydrogéologiquement favorable car l'altération devrait y être moins épaisse.

Nous ne disposons pas de résultats de forages qui nous permettent de soutenir ces deux hypothèses mais HOTTIN et OUEDRAOGO (1975) et autres ont reconnu l'existence de ces deux directions dans les formations birriennes. Ces directions se retrouvent sur les documents utilisés mais seules les images traitées offrent une meilleure discrimination.

3.5. Etude de la petite fracturation à l'affleurement

a) Introduction

L'étude de la petite fracturation a pour buts principaux :

- de déterminer les principales familles directionnelles de fractures qui affectent la zone analysée,
- de préciser la nature, l'orientation et la chronologie des différents épisodes tectoniques qui ont généré cette fracturation,
- la connaissance de la répartition dans l'espace de cette fracturation (densité de fractures).

Pour ce faire, cette étude a donc consisté :

- en un relevé systématique des types de fractures suivants : failles diaclases, fentes d'extension, fentes en échelon, etc... Les deux dernières n'ont pas été observées. Les directions et les pendages de ces structures ont été mesurées lorsqu'on pouvait les observer.
- à une recherche de tous les critères permettant de préciser la cinématique des failles et d'établir une chronologie des différents événements tectoniques (stries, décalages, fentes).
- à la mesure de la fréquence de la petite fracturation (espacement interfractural moyen des fractures d'une même famille). Ce dernier aspect n'a pas été abordé.

La connaissance de la cinématique et de la chronologie des fractures peut avoir une grande importance dans l'appréhension des zones dans lesquelles les circulations des fluides risquent d'être les plus importantes (zones en extension, fractures tardives, etc...).

L'étude d'un nombre d'affleurements suffisamment représentatif d'une zone peut permettre :

- d'établir une chronologie relative de l'évolution tectonique de cette zone,
- de sélectionner les directions qui semblent les plus favorables pour l'implantation des forages,
- d'évaluer l'apport des différents documents d'étude de la fracturation (images, photographies aériennes, etc...).

Pour notre zone-test, nous avons dû nous contenter d'un seul affleurement, le massif de la Petite Suisse situé en bordure Ouest de la zone sur l'axe Ouagadougou-Koupéla.

b) Méthodes d'études

Les méthodes d'étude de la fracturation ont été largement traitées par différents auteurs (ARTHAUD, MATTAUER, 1969 ; CHOUKROUNE, 1969 ; MATTAUER, 1973 ; DELAIR, LEROUX, 1978 ; BONIJOLY, 1980 ; DUTARTRE, 1981 ; BLES, GROS, 1980 ; BLES-FEUGA, 1981).

Ces méthodes sont basées sur deux démarches complémentaires :

- l'étude de la géométrie, de la morphologie et des relations mutuelles entre les objets tectoniques. Cette étude se fait par l'observation :
 - . des failles et joints avec mouvement relatif des deux compartiments,
 - . des diaclases et joints sans mouvement relatif des compartiments.
- l'étude des systèmes de fractures et relation cinématique des différents stades de la déformation. Celle-ci permet de définir les principales directions de la déformation ainsi que leur chronologie.

c) Fracturation du massif de la Petite Suisse (WAYEN)

Ce massif se situe à environ 65 km à l'Est de la ville de Ouagadougou, sur l'axe Ouaga-Koupéla (fig. 58).

Il est constitué par une syénite à faciès porphyroïde faisant environ 800 m sur 1800 m et atteignant la hauteur de 100 m. Les travaux de

HOTTIN et OUEDRAOGO (1975) montrent que cette syénite a une composition à dominance sodique. Elle présente une association de perthite et albite en grands cristaux xénomorphes avec aegyrine-angite et biotite interstitielle, zircon, sphène, apatite, fluorine.

HOTTIN et OUEDRAOGO (1975) estiment sa phase majeure de mise en place vers 1500 M.A. c'est-à-dire postérieure à la phase tectono-métamorphique majeure du Birrimien située autour de 1900 M.A.

* Observations générales (photo 12)

- Les fractures visibles sur ce massif sont verticales à subverticales.
- Quelques mouvements ont pu être observés le long de ces plans. Ces décalages observés en plans déterminent des mouvements relatifs généralement sénestres.
- Des stries n'ont pas été relevées sur les plans de fractures.

* Détermination des familles de fractures

Le report des mesures* effectuées pour un pas de 10° donne les rosaces visibles sur les figures 72 et 73.

Sur la figure 72 nous avons reporté indifféremment toutes les structures (fractures et filons) en ne tenant compte que de leur direction seulement. On peut distinguer par ordre d'importance en nombre les familles suivantes :

$N 35^{\circ}E > N 05^{\circ}E > N115^{\circ}E = N125^{\circ}E > N 85^{\circ}E$

La figure 73 représente deux rosaces correspondant au report séparé des fractures (fig. 73a) et des filons (fig. 73b).

La rosace 73a donne la représentation des fractures seules. On retrouve les familles précédentes : $N 35^{\circ}E > N 05^{\circ}E > N115^{\circ}E = N125^{\circ}E$. La famille $N 85^{\circ}E$ disparaît sur cette rosace.

* Les mesures ont été faites par rapport au Nord magnétique. La déclinaison magnétique est d'environ 8° vers l'Ouest dans la région.



Photo 12 - (PION-SAWADOGO)

Fracturation du sommet nord du massif de la Petite Suisse (Wayen, Haute-Volta).

- . La fracturation principale est subverticale à verticale.
- . Les fractures à faible pendage s'observent au sommet des blocs.
- . Les filons ressortent peu, on en observe au coin droit de la photo.

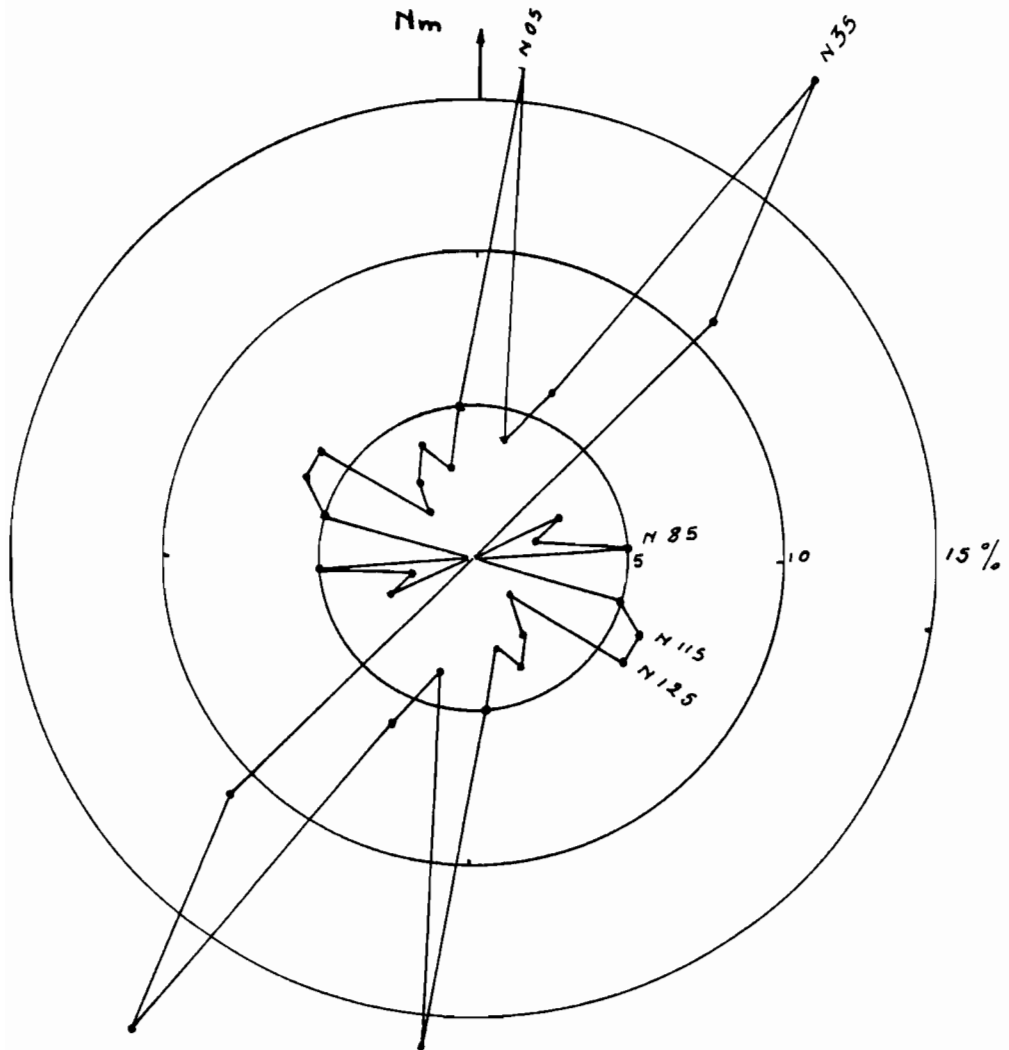
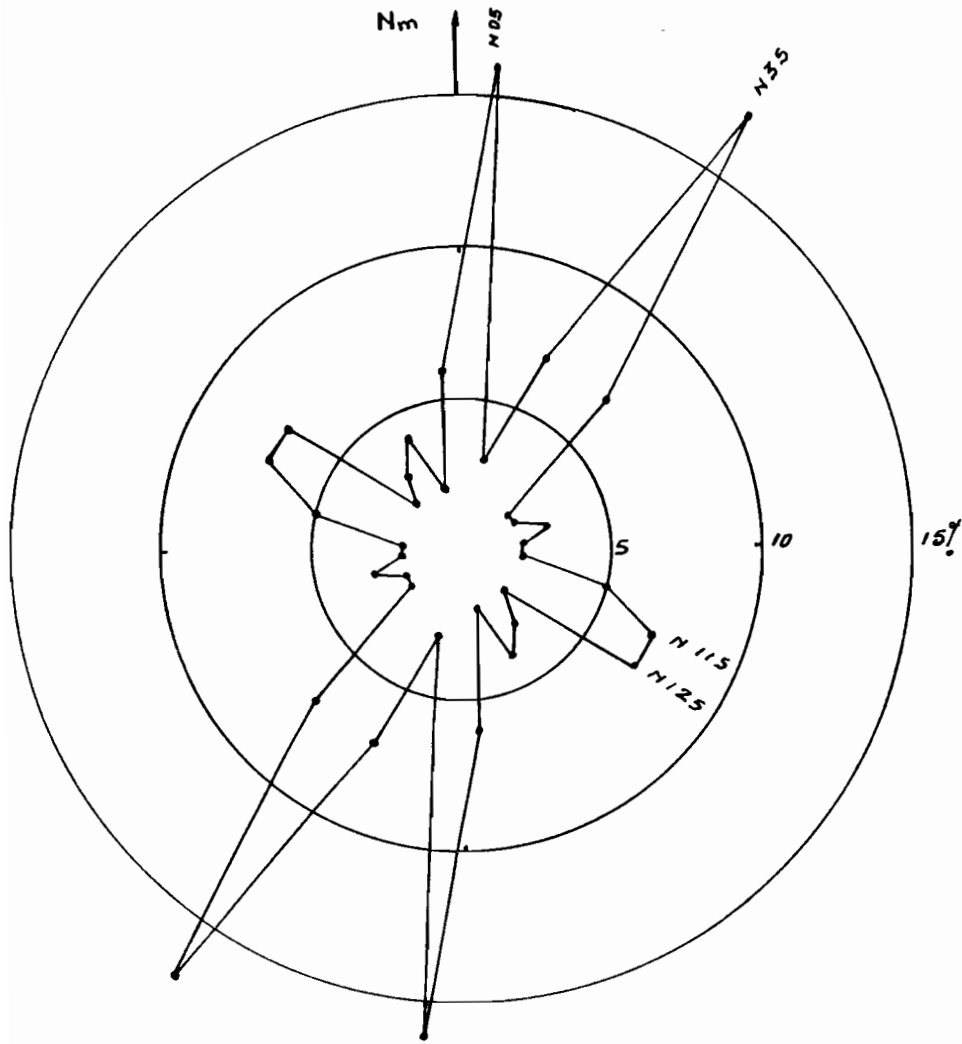
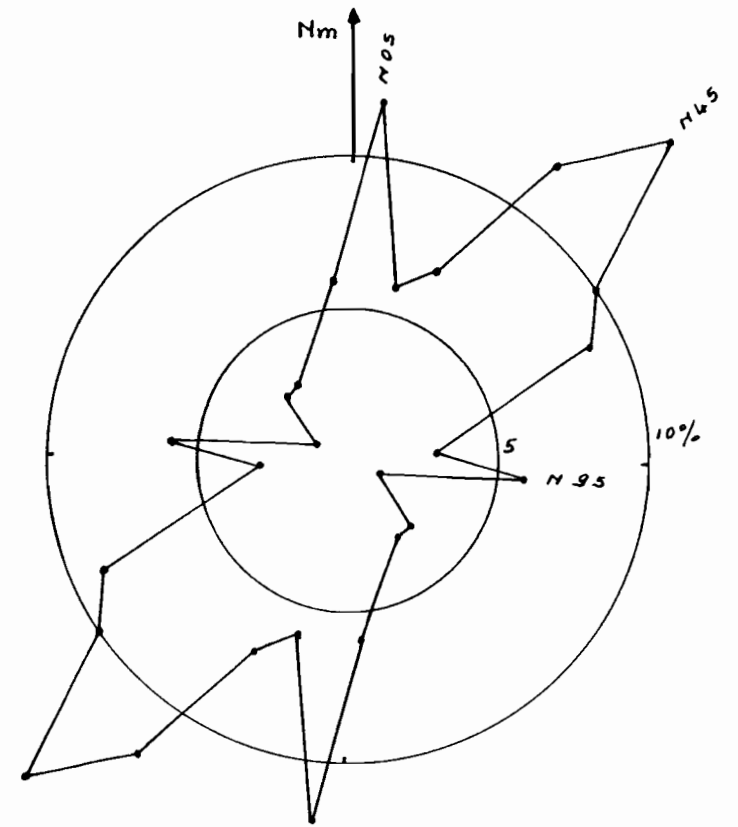


Fig. 72 - Rosace de distribution du nombre de discontinuités (fractures et filons) du massif de la Petite Suisse (pas de 10°).



a - Rosace de distribution des fractures seules du massif de La Petite Suisse (pas de 10°).



b - Rosace de distribution des filons seuls du massif de la Petite Suisse (pas de 10°).

Fig. 73 - Distribution des fractures et filons du massif de la Petite Suisse (WAYEN).

Sur la figure 73b ne sont reportés que les filons. Les familles N 45°E > N 05°E > N 95°E se distinguent nettement et à un degré moindre la famille N 95°E. La direction N115°E = N125°E n'apparaît pas sur cette rose.

* Interprétation

La comparaison des trois rosaces nous amène aux observations suivantes :

- La direction N 95°E correspond à des fractures toutes cicatrisées par des remplissages filoniens. On peut les relier aux fractures synchrones de la mise en place du magma. Les pendages relevés sur ces filons sont en général faibles (moins de 30°) et confirment leur origine magmatique (DUTARTRE, 1980).

- La famille N115°E-120°E qui disparaît sur la rose des filons, serait probablement la direction la plus récente, donc formée de fractures ouvertes. Elle pourrait jouer un rôle déterminant dans la circulation des eaux souterraines.

- Les faisceaux directionnels N 05°E et N 45°E comportent aussi bien des fractures sans filons que des fractures avec remplissages filoniens. Les filons sont abondants dans la direction N 45°E et le pic montre un éventail de N 35°E à N 65°E avec un maximum à N 45°E. Ces directions sont probablement les plus anciennes et ont dû rejouer plusieurs fois.

d) Chronologie de la tectonique cassante

* Observations

Avant de faire une tentative d'interprétation génétique de la fracturation de la zone, nous nous devons de faire quelques observations afin d'orienter le lecteur.

Les mesures utilisées pour cette interprétation sont celles obtenues sur la syénite de WAYEN. La syénite est une roche plutonique mise en place dans les formations birrimiennes. Les fractures observées peuvent donc avoir deux origines :

- une origine interne liée à la mise en place du magma chaud qui présente une fracturation au cours de son refroidissement (pression des fluides). Dans ce cas, la fracturation relevée est caractéristique de la syénite ;

- une origine tectonique c'est-à-dire liée à la tectonique régionale qui a affecté la région. Dans ce second cas, la fracturation observée sur le massif peut être étendue à toute la zone étudiée.

Cette syénite est cartographiée comme post-tectonique par rapport à l'orogénie éburnéenne qui est la dernière phase orogénique reconnue dans la région. Comme cette phase n'a pas pu affecter la syénite, la fracturation serait seulement liée au refroidissement du magma lors de sa montée. Donc son extension est locale et se limite à la masse syénitique.

Pourtant, une fracture de direction NE-SW met son seulement en contact anormal la syénite avec les granites birrimiens syntectoniques mais surtout affecte la masse syénitique elle-même (HOTTIN-OUEDRAOGO, 1975). Cette observation montre que des phénomènes tectoniques postérieurs à la mise en place de la syénite (1500 MA) ont affecté la région. Ils ont entraîné une fracturation du massif de la syénite indépendante de la mise en place du magma. Ces phénomènes tectoniques pourraient être liés à l'orogénie panafricaine dont les effets ont été cartographiés dans le Nord et le Sud-Est du pays.

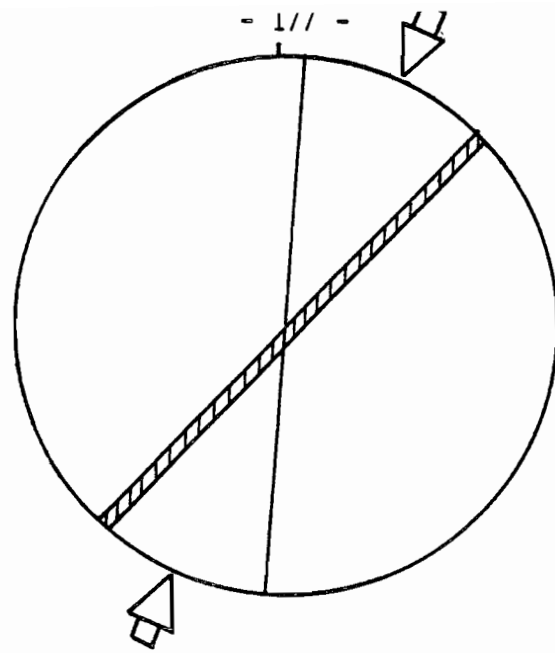
La fracturation relevée serait celle produite par ces phénomènes tectoniques postérieurs à l'intrusion syénitique. Leur étude pourrait permettre de comprendre la tectonique de la zone étudiée et permettrait une caractérisation de leur comportement hydraulique.

* Principaux épisodes de la tectonique cassante (fig. 74)

Les épisodes de la tectonique cassante que nous allons décrire sont essentiellement dûs à la tectonique régionale post-mise en place de la syénite. Les critères ayant permis d'établir cette chronologie sont relativement peu nombreux.

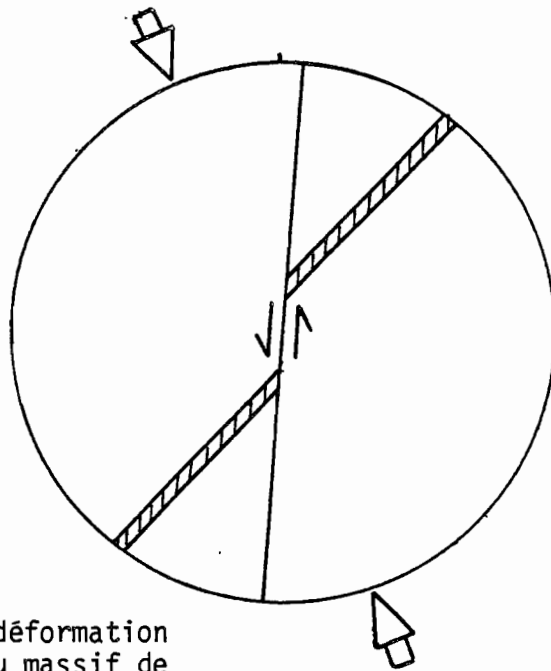
Néanmoins trois phases peuvent être reconnues d'après les observations de terrain.

- Première phase. C'est une phase de compression subhorizontale de direction NNE-SSW qui a créé les fractures N 05°E et N 45°E (fig. 74a). Ces deux familles, malgré leur faible angle d'écart peuvent être considérées comme deux directions conjuguées. En effet, BLES J.L. et GROS Y. (1980) ont mesuré dans des formations plutoniques (granite) des angles très faibles de l'ordre de 40° à 20° entre des directions conjuguées. Cette compression a pu entraîner l'ouverture partielle et faciliter la mise en place de filons nombreux dans la direction N 45°E.



a

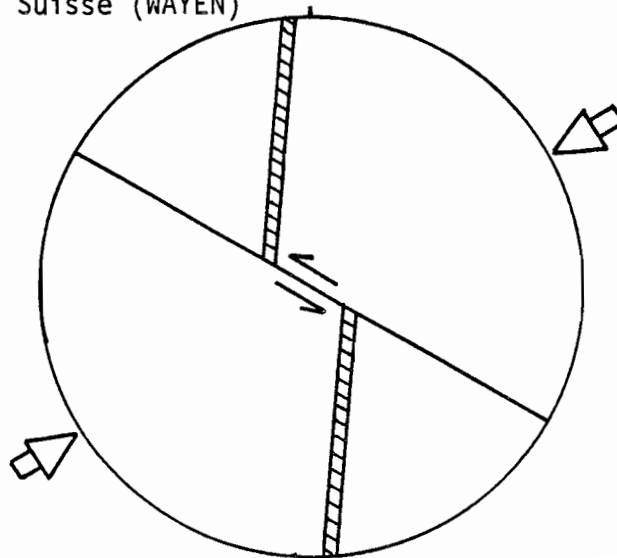
Compression NNE-SSW



b

Compression NNW-SSE

Fig. 74 - Phases de déformation cassante du massif de la Petite Suisse (WAYEN)



c

Compression ENE-WSW.

- Deuxième phase. Elle est aussi subhorizontale (fig. 74b) de direction NNW-SSE à NW-SE. Cette phase est responsable des décrochements de la famille N 45°E par la direction N-S. L'observation de stries n'ayant pas été faite, le sens réel du déplacement ne peut être précisé, celui-ci ayant été observé en plan. Nous considérerons que le décrochement est horizontal. Enfin, cette compression a pu entraîner une ouverture partielle de la direction N-S dans laquelle des filons se sont consolidés.

- Troisième phase. (Fig. 74c). Celle-ci serait la dernière phase de compression ayant affecté la zone. Elle serait aussi subhorizontale et possède une direction ENE-WSW. Elle provoque les décrochements des directions N-S par la direction N 120°E. Cette phase a pu entraîner d'autre part, l'ouverture des fractures N 120° E. Elle est probablement la dernière phase de compression ayant affecté la zone. L'absence de filons dans cette direction confirmerait cette hypothèse.

e) Analyse comparée des roses : petite fracturation, photo-fracturation et linéaments

La comparaison des roses de la petite fracturation au sol avec les rosaces des documents aériens (figures 68, 69, 70, 71) présente des différences explicables par les échelles d'observation.

* Rosaces de la petite fracturation

Deux directions N 90°E et N 110-120°E n'apparaissent pas sur les roses des documents aériens.

- La direction N 90°E formée uniquement de filons a une origine interne liée à la fracturation primaire apparaissant lors de la montée et du refroidissement au magma (pendage généralement faible : environ 30°). Elle est donc localisée seulement au niveau du massif étudié.

- La direction N 110-120°E apparaît formée de fractures récentes. Elle ne contient pas de remplissage filonien. Son absence sur les documents aériens traduirait l'existence d'une famille de petites fractures observables uniquement à l'échelle de l'affleurement.

* Roses des documents aériens

Celles-ci montrent une direction principale N 40-60°E qui n'apparaît pas sur la rose 73a. On peut penser que cette famille est constituée de grandes fractures probablement accompagnées de zones broyées. Aussi, elle

n'est pas observable à l'échelle de l'affleurement et en particulier en région couverte d'une couche d'altération épaisse. Cette constatation confirme l'hypothèse déjà émise sur l'origine de cette famille (cf. § 3.4 b). Par contre, la rose 73b permet de dire que cette direction est partiellement soudée de remplissages filoniens.

Cette analyse montre que l'image satellite peut permettre un relevé assez précis de la fracturation du socle même altéré. Cependant, compte-tenu du nombre très réduit d'affleurements observés, de la particularité génétique de l'affleurement étudié, les résultats doivent être approfondis. Néanmoins l'évolution tectonique proposée semble conforme aux observations effectuées sur le terrain. La principale phase des contraintes étant de direction NNE à NE explique l'importance de cette direction sur les documents aériens.

3.6. Intérêt hydrogéologique des familles fracturales

L'implantation d'un forage sur le terrain commence en région de socle par l'étude des documents aériens. Ceux-ci précèdent et dirigent les travaux de terrain qui s'avèrent souvent très difficiles.

L'étude des familles directionnelles, suivie de travaux de terrains permettent de déterminer les directions les plus productives. Comme le démontre les travaux sur la fracturation, les directions présentant des remplissages filoniens sont considérés comme fermées, donc ne peuvent servir de drains à la circulation des eaux souterraines.

Dans les régions de socle, fortement altéré, comme en Haute-Volta et pour certains types pétrographiques, les schistes notamment, de nombreux travaux (GUIRAUD, 1975, ENGALENC, 1978 et autres, etc...) soulignent l'intérêt hydrogéologique de ces filons. Ces auteurs indiquent que les filons jouent le rôle de drain dans les écoulements des eaux souterraines dans les zones des schistes altérés. Les fractures sans remplissage filonien joueraient par contre le rôle inverse à cause du développement de l'altération argileuse.

Aussi, les directions E-W, essentiellement filoniennes, seront de bons sites si elles sont repérées. La direction N 45°E qui correspond à la direction N 55°-65°E sur les documents aériens et qui est partiellement soudée de filons, sera considérée aussi direction favorable.

Par contre, en zone non altérée ou dans les parties profondes sous altération accessibles par forage, c'est peut être la direction de fracturation la plus récente et sans remplissage filonien (N 115°-125°) qui pourrait être la plus favorable.

Mais en l'absence de résultats de forages effectués sur ces directions, ces remarques restent des hypothèses de travail qui pourront être contrôlées ultérieurement.

3.7. Conclusion

L'analyse statistique de la fracturation permet de caractériser la distribution des linéaments par la définition des principales familles de fractures. Elle permet de prévoir l'orientation des grandes familles et leur longueur.

Cette analyse nous fournit les résultats suivants :

- Les grandes directions fracturales peuvent être repérées par l'étude de l'image satellite. L'utilisation combinée des images traitées permet une meilleure discrimination de ces familles.
- Toutes les directions n'ont pas la même signification géodynamique. Le contrôle sur le terrain (analyse structurale des affleurements) peut permettre de retrouver la nature des déplacements successifs, leur chronologie relative, leur effet mécanique (tension, compression, cisaillement), leur rôle dans le remplissage filonien et enfin de proposer des hypothèses sur leur intérêt hydraulique.

Ainsi en zone birrimienne, les directions N 40°-60°E et N 90°E de fractures à remplissage filonien peuvent servir de drain dans les massifs schisteux altérés alors que dans les massifs sains, la dernière direction de fracturation repérée NW 115°-125°E pourrait être la plus favorable. Malheureusement la vérification hydrogéologique de ces hypothèses n'a pas pu être faite.

- L'individualisation des familles fracturales peut donc permettre de sélectionner les directions favorables pour l'implantation des forages.

- Même si l'image peut nous révéler ces directions, les observations de terrain demeureront toujours nécessaires pour étalonner les linéaments repérés car ceux-ci traduisent aussi des éléments morphologiques divers.

IV - ZONE DE PILIMPIKOU

4.1. Introduction

Les exigences des projets hydrogéologiques en Haute-Volta ne permettent pas toujours de suivre les travaux sur la même zone-test. En effet, entre les études préliminaires, la reconnaissance de terrain, l'implantation des forages et la phase d'exécution réelle des ouvrages, il se passe souvent de nombreux mois. Cet étalement des travaux nous a permis d'utiliser l'imagerie Landsat sur de nombreux sites à géologie variée mais présente l'inconvénient de ne pas pouvoir suivre chaque projet d'un bout à l'autre.

De plus, n'ayant pas la maîtrise de réalisation des projets d'hydraulique, il nous a été impossible de pouvoir appliquer la méthode jusqu'au bout sur une même zone-test. Tel est le cas de Pilimpikou de la sous-préfecture de Samba où les études géophysiques ont pu être faites. Par contre, les forages ne sont toujours pas effectués dans ce village.

4.2. Présentation de la zone

a) Cadre physique

Le village de Pilimpikou ($L = 12^{\circ} 42' N$ et $l = 2^{\circ} 15' W$) est situé à une trentaine de kilomètres au Sud de la sous-préfecture de Yako, département du Centre-Ouest.

Localisée comme les précédentes dans la zone nord-soudanienne, cette zone reçoit en moyenne 800 mm de précipitations par an. Mais cette eau est évacuée rapidement à cause du relief relatif de la zone.

La végétation se résume à la savane-parc. Seules les espèces économiquement utiles sont préservées de la coupe lors du défrichement des champs.

La zone est sillonnée par un réseau hydrographique divergent descendant de la colline schisteuse. On n'observe pas vraiment de rivières importantes.

Le village de Pilimpikou est localisé au pied de la colline schisteuse dont le point culminant se situe autour de 500 m.

b) Cadre géologique et hydrogéologique

* Géologie (fig. 75)

La géologie rencontrée est très homogène et se résume aux formations birrimiennes qui peuvent se subdiviser en deux types distincts :

- Le type basique. C'est un ensemble de volcanites basiques qui correspondent essentiellement sur la zone d'étude aux amphibolites schisteuses. Cette formation affleure surtout sur les pentes de la colline lorsque la couverture d'altération est érodée. Cet ensemble comporte aussi en son sein des filons de quartz (direction 70°N) qui servent d'armature aux couches.

- Le type volcano-sédimentaire. Il est formé d'un ensemble de roches schisteuses auxquelles sont associées des laves, des tufs et grau-wackes. On trouve dans cette formation des sédiments argileux, ce qui lui confère la dénomination de schistes argileux. Cet ensemble affleure essentiellement au Sud du village de Pilimpikou.

A ces formations birrimiennes, il faut ajouter un granite qui affleure surtout à l'Est de notre zone, à Nanoro. Ce granite constitue le socle antébirrimien.

A cette description sommaire de la géologie, on peut ajouter l'existence d'une couche d'altération très épaisse qui donne de nombreuses buttes cuirassées.

* Hydrogéologie

L'alimentation en eau des habitants se fait généralement dans les petites mares ou les petits ruisseaux pendant la saison pluvieuse. Pendant la saison sèche, ces sources tarissent et on est obligé de se tourner vers les eaux souterraines qui sont localisées principalement dans les formations suivantes :

- Les alluvions-colluvions. Ces formations généralement localisées sur les bords des cours d'eau sont très peu développées, le réseau hydrographique se limitant aux vallons sur les pentes de la colline et aux petits ruisseaux de la plaine.

Dès le début de la saison sèche, dans ces alluvions sont creusés des puisards qui s'assèchent très vite.

- Les nappes d'altération. L'épaisseur d'altération dans cette zone est importante. Ces altérites peuvent renfermer d'importantes quantités

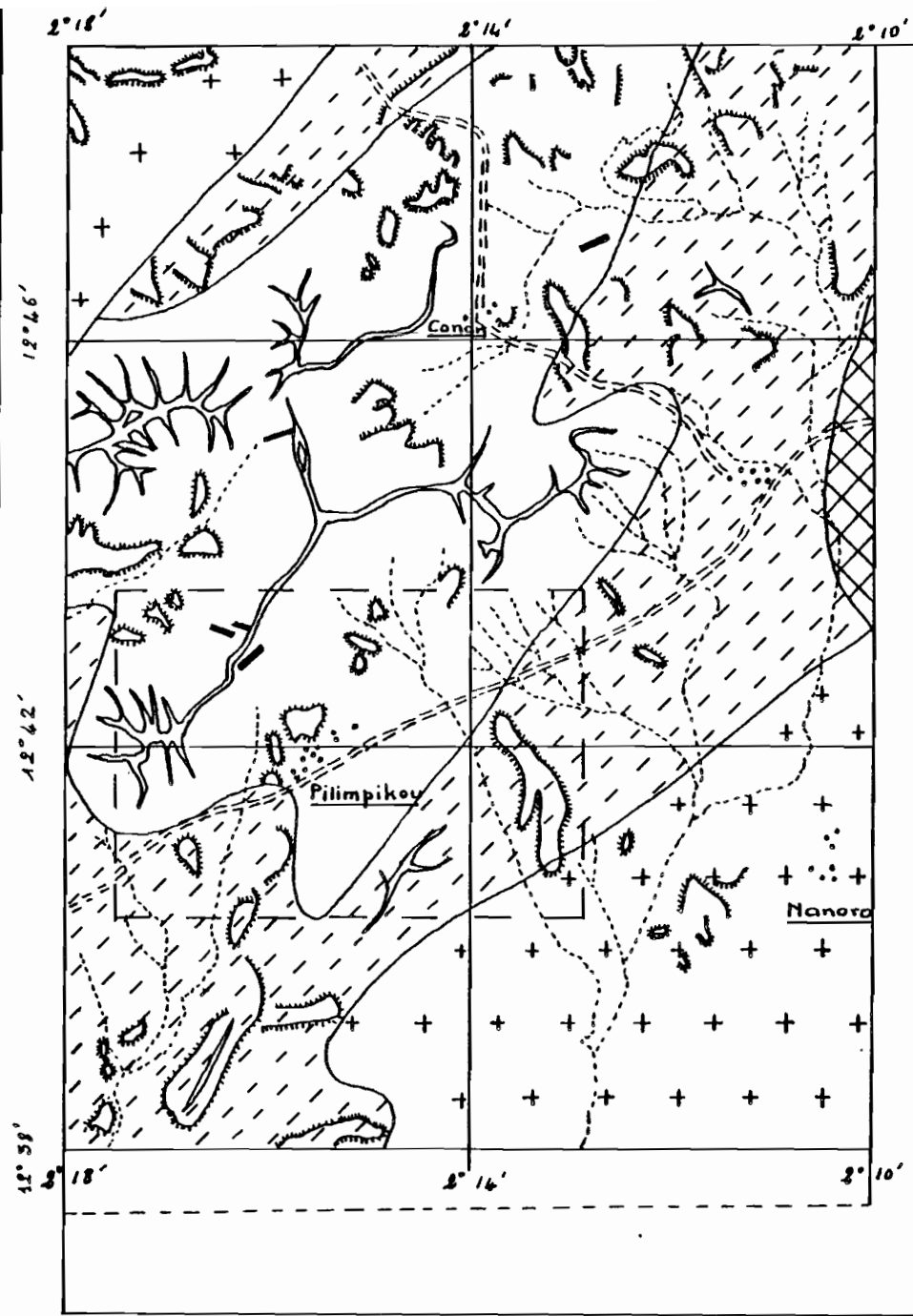


Fig-75-ESQUISSE GEOLOGIQUE DE LA REGION
DE PILIMPIKOU au 1/125 000
(d'après Duceulier-1963)

LEGENDE

Morphologie	Géologie
Rivière	Contours géologiques réel ou supposé
butte cuvassée	Filon de quartz
ligne de crête	Granodiorite
Route	Schistes argileux
Village	Schistes amphiboliques
Limite de la zone d'étude	Granites.

d'eau. Mais la nature argileuse de ces altérites leur confère une mauvaise perméabilité. En plus, leur exploitation est rendue difficile par leur caractère fluant.

Ces nappes d'altération sont donc très peu exploitées d'une part à cause de leur mauvaise tenue et d'autre part à cause du caractère rudimentaire des Moyens villageois.

- Les nappes de fractures. Ce sont celles que recherchent les hydrogéologues. Les techniques d'exploitation modernes permettent leur captage par forage.

4.3. Analyse qualitative de la fracturation

a) Documents utilisés

Les documents de travail utilisés pour l'analyse de la fracturation sont :

- les images satellites : tirage papier au 1/200.000^e des canaux 5 et 7 de la scène 210-51 du 25 novembre 1975 en noir et blanc et une composition colorée Earthsat de l'image du 7 novembre 1975 ;

- les photographies aériennes au 1/50.000^e des missions I.G.N. 1952 (vol AOF, 1952, mission 17 : photos n° 334-35-36 et 356-57-58).

A ces documents aériens s'ajoutent la carte topographique (carte I.G.N. 1/200.000 ND-30-IV-Koudougou) et les cartes géologiques à 1/125.000^e (DUCELLIER, 1963) et à 1/1.000.000 (HOTTIN, OUEDRAOGO, 1975).

b) Interprétation des documents

* L'image satellite

L'interprétation de l'image satellite s'est faite par transparence sur le canal 7, la composition colorée ayant servi à compléter l'information.

Sur le calque ont été dessinées les éléments suivants :

- le réseau hydrographique,
- les formations géologiques en particulier les lignes de crête des collines schisteuses,
- les formations cuirassées,
- les linéaments.

* La photographie aérienne

Les photographies aériennes à l'échelle du 1/50.000 ont été interprétées et ensuite assemblées. Fracturation, morphologie, réseau hydrographique ont été dessinés avec le maximum de détails.

c) Résultats

* L'image satellite

L'interprétation de l'image au 1/200.000 est donnée à la figure 76.

Nous pouvons constater que malgré la petite échelle de l'image, la morphologie grossière de la zone peut-être faite. Les buttes cuirassées sont visibles et leurs contours apparaissent quand la carapace n'est pas démantelée. La colline schisteuse apparaît gris-clair sur les images noir et blanc. Ces contours ne ressortent pas très nettement.

Sur la figure 76, les éléments morphologiques reconnaissables présentent une orientation générale NE-SW. Celle-ci suit les structures birrimiennes reconnues par les géologues. Les linéaments ont une direction NE-SW et aussi une direction secondaire NNW-SSE.

Les linéaments ont été hiérarchisés en quatre types principaux. Cette classification est basée sur les critères suivants :

- L'aspect textural du linéament et sa longueur.
- Les relations du linéament avec les éléments morphologiques reconnaissables du paysage.

Ainsi, on distingue :

- les mégalinéaments,
- les linéaments qui suivent le réseau hydrographique ou le rebord de cuirasse,
- les linéaments qu'on ne peut faire rentrer dans les trois types ci-dessus.

Nous avons attribué le nom de mégalinéament aux linéaments qui ont un aspect visuel très fort (soit en réflexion ou en absorption) et qui ont une grande longueur (plus de 10 km de longueur). Sept linéaments sont visibles sur l'interprétation dont un seul passe aux abords du village de Pilimpikou.

230

230

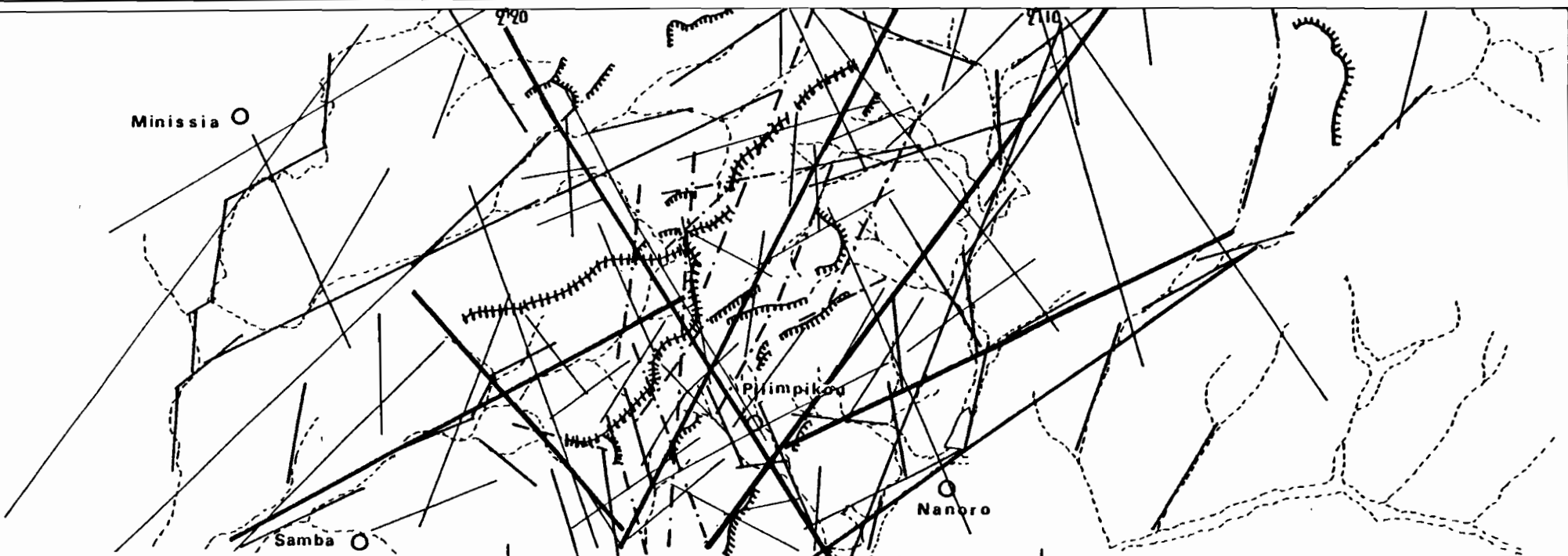










fig-76-CARTE MORPHO-TECTONIQUE
d'après l'image Landsat

-  rivières
-  barrage
-  ligne de crête
-  rebord de cuirasse
-  mégalinéments
-  linéaments suivent les rebords cuirassés
-  linéaments suivent le réseau hydro
-  autres linéaments



Ech: 1/ 200 000

* La photographie aérienne

L'interprétation des photographies aériennes a permis l'établissement de la carte présentée à la figure 77. On y distingue les buttes cuirassées qui présentent un sommet plan. Leur rebord est généralement abrupt. Sur le tiers gauche de la figure, on remarque que ces cuirasses sont alignées parallèlement à l'axe de la colline suivant une direction NNE-SSW.

L'observation des photos aériennes révèle aussi que le relief schisteux est formé par une succession de collines aux sommets arrondis et aux pentes douces. Des vallons descendent des sommets pour donner dans la plaine des vallées peu profondes. Les rivières ne présentent pas d'entailles très nettes.

La photo-fracturation est reportée avec une distinction en deux types. Les fractures sont celles qui présentent le plus grand nombre de critères de photo-fracturation. Les autres fractures sont seulement reconnues probables.

* Comparaison des linéaments et des photo-fractures

Malgré la différence d'échelle (fig. 76 et 77) qui complique la comparaison, on retrouve les mêmes directions dominantes NE-SW et NW-SE. Ces directions correspondent bien à celles de la tectonique éburnéenne qui a affecté les formations birrimiennes. Les directions N-S et E-W n'apparaissent pas aussi bien en image satellite qu'en photographie aérienne. Ceci confirme que l'image satellite peut jouer un rôle important dans la reconnaissance des structures malgré la présence d'un manteau d'altération épais et quasi-uniforme.

* Sélection des sites favorables

Les figures 77 et 78 donnent l'emplacement des sites retenus et sur lesquels ont été effectués les travaux géophysiques.

La figure 78 est obtenue par agrandissement au 1/50.000 de l'interprétation au 1/200.000 (fig. 76) de l'image satellite.

Les critères de sélection des sites favorables se résument comme suit :

- importance régionale du linéament ou de la photo-fracture,

*Fig-77 Esquisse hydrogéologique
de Pilimpikou par photos
aériennes*

LEGENDE















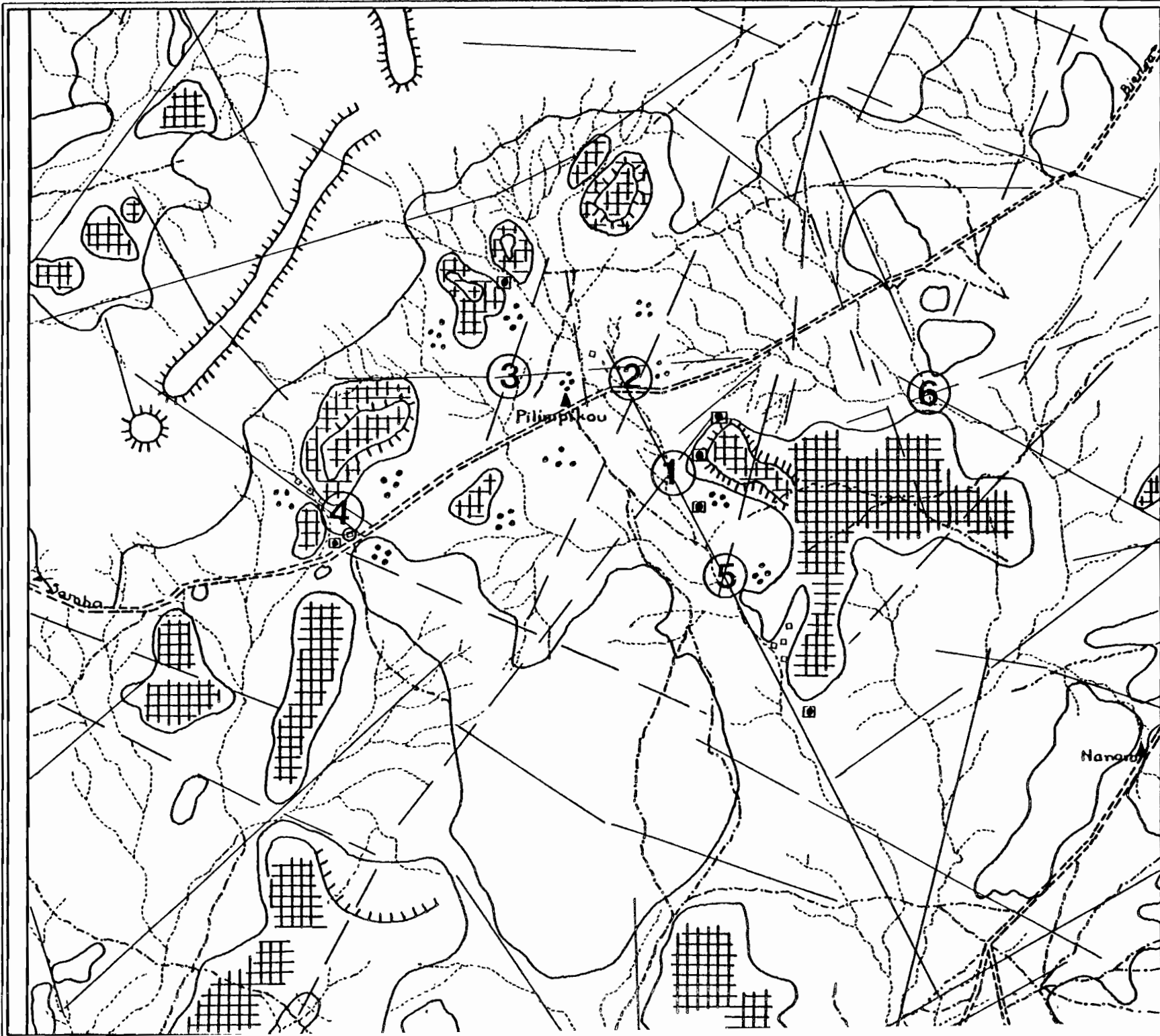
- | | | |
|---|---------------------------------------|--|
|  | <i>Cuirasse de pente</i> | |
|  | <i>Buttes cuirassées</i> | |
|  | <i>Colline de schistes</i> | |
|  | <i>Points de contrôle géologique</i> | |
|  | <i>Fracture certaine</i> | |
|  | <i>Fracture probable</i> | |
|  | <i>Route principale</i> |  <i>Piste</i> |
|  | <i>Réseau hydro</i> |  <i>Ligne de niveau</i> |
|  | <i>Puits moderne sec</i> |  <i>Habitations.</i> |
|  | <i>Puits traditionnel non perenne</i> | |
|  | <i>Site choisi</i> | |










Fig. 77



Ech:
1/50,000

*Fig-78- Carte morpho-tectonique
de Pilimpikou d'après
l'image LANDSAT*

— — — — —
LEGENDE

- | | |
|---|--|
|  | <i>réseau hydrographique</i> |
|  | <i>zone d'alluvions</i> |
|  | <i>barrage</i> |
|  | <i>ligne de crete</i> |
|  | <i>rebord de cuirasse</i> |
|  | <i>mégalinéament</i> |
|  | <i>linéament du réseau hydro</i> |
|  | <i>linéament de rebord de cuirasse</i> |
|  | <i>autres linéaments</i> |
|  | <i>site choisi</i> |

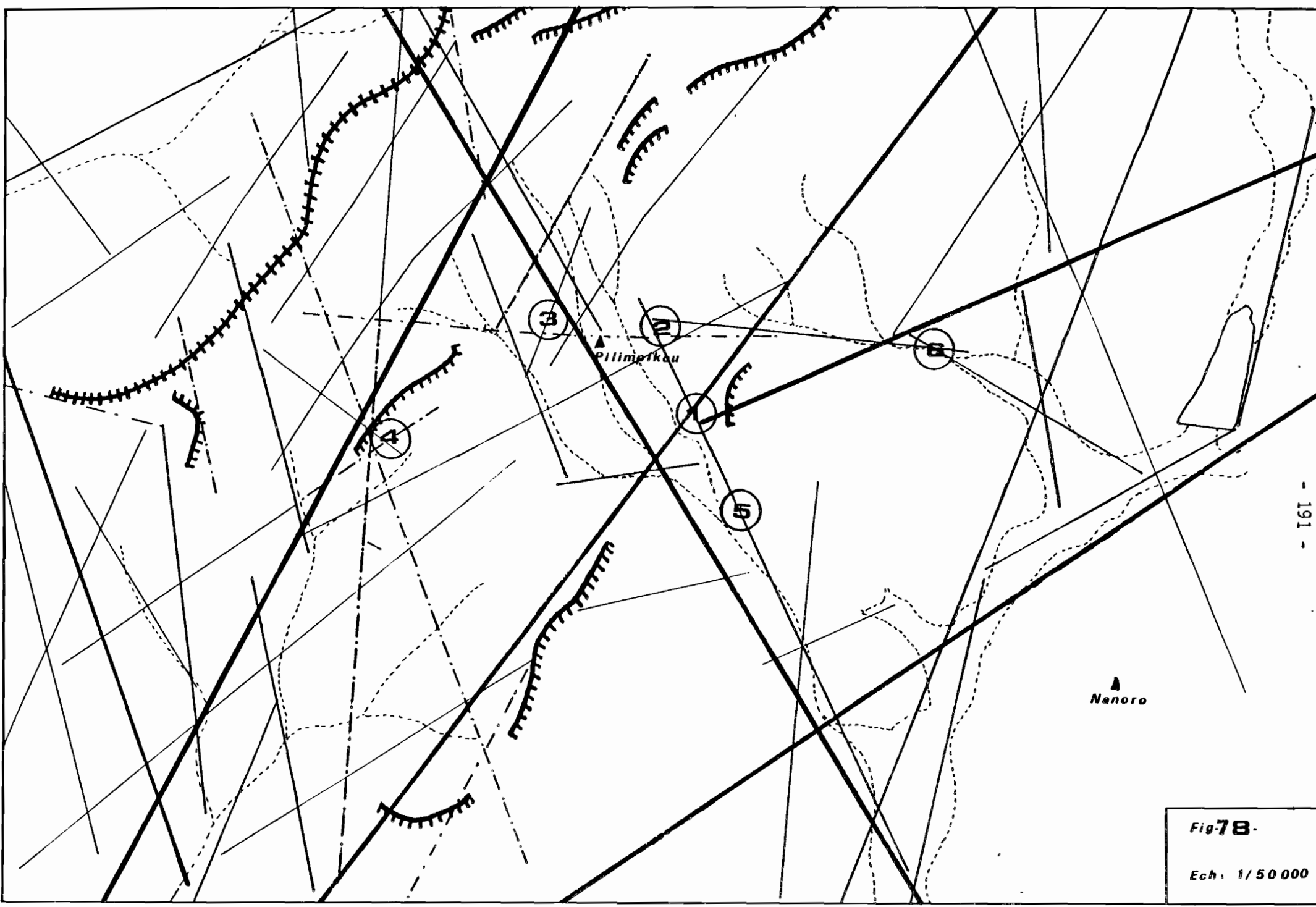


Fig-7B-
Ech: 1/50 000

- nombre de grands linéaments ou de photo-fractures se croisant au même point,
- situation topographique du point de croisement (de préférence les points topographiquement les plus bas) et surtout de sa proximité avec les habitations.

Six points ont été donc retenus en utilisant les critères ci-dessus mais cinq feront l'objet de contrôles géophysiques et probablement de réalisation de forages. Le sixième étant situé hors de la limite du village, ne fera l'objet d'aucun contrôle.

La comparaison des deux figures 77 et 78 a permis de faire les constatations suivantes :

- une corrélation relativement bonne existe entre les interprétations image de satellite - photographie aérienne en particulier entre linéaments et photo-fractures ;
- une bonne correspondance des sites retenus par les deux méthodes ;
- une superposition assez précise des éléments morphologiques (lignes de crête, buttes cuirassés).

Par ailleurs, on remarque sur ces figures une densité relativement forte des linéaments et une densité plus faible des photo-fractures contrairement aux deux zones précédentes. En fait, l'expérience acquise au cours des études précédentes, nous a permis de réorienter l'interprétation surtout photogéologique vers des applications plutôt hydrogéologiques. Aussi, seules les photo-fractures importantes ont été dessinées. Par contre, la sélection au niveau de l'image satellite n'a pas été faite. Néanmoins, il est possible d'opérer une certaine classification des linéaments comme le montre les figures 76 et 78.

d) Données de terrain

La vérification est faite après les travaux préliminaires de photo-interprétation. Elle a pour but de repérer les sites retenus, de vérifier la géologie et de noter les caractéristiques morphologiques, etc...

* Morphologie et emplacements des sites

Le village de Pilimpikou est "disséminé" comme tous les villages mossis. Il s'étale sur le flanc sud-est de la colline birrimienne jusque dans la plaine.

Dans le village, on rencontre de nombreuses buttes cuirassées qui sont une orientation NE-SW parallèle à la colline. Plus à l'Est, Pilimpikou est séparé de Nanoro par une autre ligne de cuirasses de même orientation. Ainsi, le village se trouve pris entre la colline de schistes et un ensemble de buttes cuirassées.

Sur le terrain, les sites choisis correspondent à des points bas. D'après les informations recueillies auprès des habitants, certains sites correspondent à des zones de puits villageois qui captent la nappe d'altération. Ce sont les sites 2, 4 et 5 qui possèdent ces petites nappes dans les altérations.

Au site 2, ont été observés des déblais de puits. Ces déblais correspondent à une roche schistifiée dont le faciès laisse penser que la zone est fracturée.

Aux sites 4 et 5, sont creusés des puits peu profonds (8 à 10 m) productifs mais dont le débit reste faible. Ces puits alimentent le village dès le début de la saison sèche mais très vite tombent à sec. Aussi, les habitants s'alimentent en eau au barrage de Nanoro, situé à une dizaine de kilomètres.

* Géologie et hydrogéologie

Les observations faites sur le terrain montrent que les affleurements sont rares, comme souvent sur le socle de Haute-Volta. Quelques affleurements ont néanmoins été repérés (fig. 77).

Au Nord de la route Samba-Pilimpikou (fig. 77) affleurent à la faveur de l'érosion, des schistes amphiboliques de couleur verdâtre, à grain fin. Ces schistes sont injectés de filons de quartz.

Au Sud de cette route, les schistes observés sont plus sombres. Ils sont très siliceux et se débitent en grandes dalles. Ces schistes ressemblent à des schistes ardoisiers. Les couches observées sont très redressées (pendage de 60° à 80° SE) et de direction N 70°E. De nombreux filons de quartz, de puissance variable, suivent les couches de schistes et leur servent d'armature.

Plus au Sud, affleure un ensemble granitique formant le socle anté-birrimien. Cet ensemble ne fait pas partie de la zone d'étude qui se limite au village de Pilimpikou.

L'altération de cet ensemble a entraîné la formation d'une importante couche d'altérites surmontée d'une cuirasse épaisse. La cuirasse a été érodée mais il reste de nombreuses buttes témoins recouvertes d'une carapace épaisse donnant des abrupts.

Durant la saison des pluies, une grande partie de l'eau ruisselle le long du versant des collines en traversant le village. Le reste s'infiltré et est stocké en partie dans les altérites pour réalimenter l'aquifère.

Cet aquifère, de nature très argileuse (donc de faible perméabilité) se décharge par reprise évapotranspiratoire et par pompage dans les puits à l'aval. Les quantités d'eau récupérables sont faibles, ce qui entraîne un épuisement rapide de la nappe.

Une autre partie de l'eau infiltrée, après un transit dans les altérites, va suivre les fissures, les diaclases et les fractures. Elle va donc se stocker en profondeur et alimenter l'aquifère discontinu issu de l'existence de ces discontinuités dans la roche. Ce second aquifère est souvent inexploité à cause de sa situation en profondeur. Son exploitation ne peut se faire qu'au moyen de techniques appropriées. Son captage peut permettre d'obtenir des débits importants si l'on sait localiser les principales fractures drainant cet aquifère discontinu.

A Pilimpikou, seule la nappe d'altération est exploitée au moyen de puits villageois. Aussi, l'implantation d'un ou plusieurs forages permettrait de capter la nappe de fracturation et d'alimenter le village en eau toute l'année.

4.4. Données géophysiques

L'étude géophysique a été réalisée en collaboration avec IWACO-BV sur les sites préalablement choisis et estimés favorables après les études de terrain.

a) Méthodes utilisées

La prospection électrique (S.E. et profils de résistivité) est la seule utilisée pour l'étude des "discontinuités" observées sur les sites.

L'emplacement des S.E. et l'orientation des profils de résistivité par rapport aux fractures supposées sont donnés sur la planche II. Les longueurs de ligne sont AB = 200 m et MN = 20 m pour l'étude en profil électrique. Le tableau 13 résume l'ensemble des travaux réalisés.

Site	Profil électrique	Sondage électrique
1	P1 P2 P3	P1 M12 P1 M15 + 10 m P3 M15 + 5 m
2	P1 P2 P3	P1 Mg P2 M5 (= P1 M9) P3 Mo
3	P1 P2 P3 P4	--- P2 M10 P3 M31 P4 M12
4	P1	P1 M8 P1 M18
5	P2	P1 M22 P2 M30

Tableau 13 - Prospection électrique.

b) Résultats des mesures (Planche II)

Le caractère ponctuel des mesures géophysiques effectuées nous oblige à procéder à l'interprétation site par site. Les différentes courbes obtenues à partir de ces mesures sont données en annexe.

* Site 1

Deux fractures de direction NE-SW et NW-SE apparaissent sur la photographie aérienne et l'image satellite révèle trois linéaments dont deux correspondent aux photo-fractures.

Trois profils parallèles espacés de 100 m et orientés NW-SE de façon à recouper les fractures ont été effectués. La géophysique nous fait apparaître une forte anomalie conductrice de direction NE-SW superposable au mégalinéament de direction NE-SW (fig. 78). La direction NW-SE ressort par une petite anomalie probablement liée à des variations superficielles et correspondant sur le terrain au lit d'un marigot.

Les sondages électriques réalisés sur l'anomalie la plus importante donnent des épaisseurs d'altérites supérieures à 50 mètres.

* Site 2

Sur le site 2, trois profils ont été aussi réalisés : deux parallèles NNE-SSW et le troisième perpendiculaire aux précédents.

Trois principales photo-fractures se croisent sur le site 2 tandis qu'on remarque quatre linéaments sur la figure 78. Une anomalie faible est observée sur les points de croisement des profils 1 et 2. Celle-ci semble correspondre à la fracture NW-SE.

La très faible anomalie décelée sur le profil 3 ne correspond à aucun élément des documents aériens. Il est donc difficile de lui attribuer une direction.

Les sondages électriques indiquent une profondeur du socle altéré comprise entre 16 et 20 mètres.

* Site 3

Sur la photographie aérienne apparaissent deux fractures probables, orientées E-W et NE-SW. L'image-satellite permet de déceler deux linéaments de direction E-W et NE-SW. Sur le terrain pourtant, ce site se situe sur une zone de champs dans laquelle on devine à peine les vallons.

Quatre profils ont été effectués sur ce site, ceci à cause du fait que les deux premiers ont donné des courbes sans variation sensible des résistivités (avoir annexe). Seul le profil 4 présente une chute importante des résistivités attestant de l'existence d'une anomalie conductrice en profondeur. Ce profil est orienté perpendiculairement aux trois précédents. Aussi la direction de l'anomalie ne peut être déterminée. Par ailleurs, on doit noter que cette anomalie ne correspond à aucun élément perçu dans les documents aériens.

Trois sondages électriques ont été faits sur les profils 2, 3 et 4. Ces S.E. donnent la profondeur du socle altéré entre 25 et 35 mètres.

* Site 4

Un seul profil réalisé ne présente aucune variation importante des résistivités détectant une anomalie en profondeur. Mais compte tenu de la situation du site (proximité de l'école du village) deux sondages électriques furent réalisés. Les profondeurs du socle altéré sont estimées entre 40 et 50 m.

* Site 5

Situé à l'extrême sud du village, les photographies aériennes permettent de repérer deux fractures alors que l'on n'observe qu'un seul linéament de direction NE-SW.

Le seul profil réalisé, de direction sensiblement E-W, montre des chutes de résistivité assez sensibles en deux points (points S.E., voir annexe). Les directions de ces anomalies se situent à l'Ouest des fractures visibles sur les documents aériens. Elles sont décalées de 200 et 400 mètres par rapport au noeud des deux fractures. On observe ici un cas de décalage entre le réseau hydrographique et la fracturation réelle du socle. En effet, la photo-fracture de direction NW-SE est soulignée par un marigot.

Deux sondages électriques réalisés au droit des anomalies repérées par le profil donnent la profondeur du socle altéré entre 40 et 50 mètres environ.

c) Interprétation des résultats

Les mesures géophysiques en particulier les profils électriques ont mis en évidence des anomalies diverses dont la liaison avec les données aériennes (fracturation de la photographie aérienne ou linéaments de l'image satellite) n'est pas toujours évidente. Toutefois cette correspondance semble nette sur le site 1 où les anomalies géophysiques s'alignent suivant la même direction que la photo-fracture et le mégalinéament. Cette direction correspondrait probablement à une fracture importante du socle birrimien.

Il existe certainement une correspondance certaine entre les linéaments et les anomalies géophysiques mais on observe aussi des décalages dans de nombreux cas. Ces décalages pourraient s'expliquer dans notre étude par plusieurs causes :

- l'influence de l'altération et de l'érosion qui entraîne une oblitération des structures en surface ;
- l'influence de l'activité humaine, en particulier les cultures, qui contribue à accélérer les phénomènes précédents ;
- des erreurs de tracé des linéaments et des photo-fractures amplifiées lors des agrandissements.

D'après les valeurs des résistivités fournies par les sondages électriques, je propose la coupe suivante des terrains en profondeur. De haut en bas, on peut distinguer :

- Une couche superficielle dont la résistivité de $30 \Omega\text{m}$ (site 1) à 100 m (site 4). Elle correspondrait à la zone d'argiles latéritiques située sous la terre arable. Son épaisseur est généralement faible (5 m au maximum).

- Sous cette tranche superficielle on rencontre un niveau assez conducteur correspondant aux altérites argileuses. Ces altérites se subdivisent en deux sous-niveaux. Le premier situé directement sous la tranche superficielle serait des altérites argileuses sèches ($10 \Omega\text{m} < \rho < 30 \Omega\text{m}$) tandis que le second ($\rho < 10 \Omega\text{m}$) correspondrait à des altérites argileuses humides. La puissance totale de ce niveau conducteur pourrait dépasser une cinquantaine de mètres (voir annexe, site 1).

- En-dessous des altérites argileuses se situe un niveau dont la résistivité est supérieure à 100 m . Celui-ci correspondrait selon toute vraisemblance à la roche fissurée et altérée. Il pourrait être le siège de circulations d'eau. Son épaisseur ne peut être évaluée, les sondages électriques n'atteignant pas les schistes sains ($> 500 \Omega\text{m}$).

Ces sondages électriques permettent de confirmer l'épaisseur importante de l'altération sur les formations schisteuses birrimiennes et leur nature très argileuse. Néanmoins, seuls les forages permettront d'établir ces résultats géophysiques.

d) Implantation des forages d'essai

Après les études géophysiques, trois sites ont été retenus pour l'exécution des forages d'essai. Les critères qui ont conduit à leur sélection, tiennent essentiellement compte de leur répartition dans le village. Le tableau 14 donne l'emplacement de ces sites par rapport aux mesures géophysiques.

Forage d'essai	Site géophysique	Profil et station S.E.
A	1	P3 M15 + 5 m
B	2	P3 Mo
C	4	P1 M8

Tableau 14 - Sites de forages d'essai

Les forages n'ont pas encore été réalisés à ce jour. Il serait intéressant d'en suivre les résultats et de caler les mesures fournies par la géophysique.

4.5. Conclusion

Les anomalies géophysiques ne confirment pas toujours l'existence des linéaments ou photo-fractures perceptibles. Le caractère ponctuel de nos mesures ne permet pas d'évaluer, en terme statistique, le degré de coïncidence entre les alignements des images aériennes et les anomalies géophysiques.

A ce caractère ponctuel des implantations géophysiques, il faut ajouter celui également modeste de la longueur des lignes des profils géophysiques. En effet, ces profils font au plus 600 mètres chacun. Or, à l'échelle de l'image-satellite (1/200.000^e) une erreur de report d'un millimètre entraîne un écart de 200 mètres sur le terrain. Cet écart est certes réduit à 50 mètres pour les photographies aériennes au 1/50.000^e, ce qui devrait permettre de localiser l'anomalie aérienne. Mais il faudrait ajouter les erreurs de localisation du linéament ou de la photo-fracture sur le terrain et d'implantation du profil électrique, liées à l'importance du manteau d'altération. Effectivement et bien que, sur le plan géologique, les zones-tests ne soient pas comparables, le contrôle de terrain village par village de la zone 1 montre que le critère géomorphologique n'est pas suffisant dans tous les cas pour positionner les linéaments et les fractures.

Néanmoins, il semble que les mégalinéaments (site 1) peuvent correspondre à des anomalies géophysiques. L'image satellite est une méthode indirecte et comme telle, nous indique des discontinuités probables. Seul le forage d'essai pourrait nous livrer la nature exacte en profondeur des linéaments observés.

V - CONCLUSION SUR LE CHAPITRE I

Les trois zones-tests présentent les mêmes caractéristiques climatiques. Elles sont soumises aux mêmes facteurs climatiques ; un climat tropical a deux saisons bien contrastées :

- une saison pluvieuse très courte au cours de laquelle se concentrent les précipitations ;

- une saison sèche très longue durant laquelle les températures sont élevées et les problèmes d'alimentation en eau très cruciaux.

La morphologie est plus variée. Très plate dans la première zone, celle-ci devient plus contrastée dans les autres zones par la présence de buttes cuirassées plus nombreuses. La géologie est par contre peu variée. Essentiellement formée de granites dans la zone de Tensobentenga, on passe à des formations birrimiennes schisteuses dans les deux autres zones.

Le contrôle au sol des linéaments ou des photo-fractures effectués dans la première zone montre que dans les régions altérées, ceux-ci sont difficilement identifiables. Le repérage est facilité lorsque le linéameny correspond à certains éléments de surface comme les vallées, les vallons, les rebords de cuirasses, etc...

Dans la deuxième zone, l'étude statistique comparée des directions de linéaments, de photo-fractures et de fractures sur affleurement, donne une corrélation satisfaisante. Par contre, le traitement numérique opère une grande sélection des familles de linéaments, soit en les atténuant fortement (canal A) soit en les accentuant grandement (canal B).

Le contrôle géophysique des linéaments opéré dans la troisième zone ne donne pas des résultats satisfaisants. Seul un site sur cinq étudiés (cas de mégalinéament) montre une correspondance en direction.

Chapitre II - DISCUSSION DES RESULTATS

I - INTRODUCTION

Le succès d'un forage dépend en premier lieu de son implantation, donc de l'hydrogéologue qui le choisit. Pour réaliser son implantation, l'hydrogéologue a besoin d'un maximum de présomptions qui lui permettent de fixer son choix. En région de socle, la fracturation constitue le principal critère d'implantation.

La recherche des fractures peut se faire directement sur le terrain mais dans des régions à altérites épaisses comme en Haute-Volta, celle-ci est quasi impossible par manque d'affleurements. Aussi, l'hydrogéologue a recours à des méthodes indirectes, rapides comme la photographie aérienne. Grâce au recul, produit par la vision en altitude, elle permet la cartographie d'alignements, souvent imperceptibles au sol, dont l'expérience a montré qu'ils sont en relation directe avec les fractures.

Depuis quelques années, grâce au développement de la télédétection, on dispose d'images de satellites qui procurent une vision nouvelle par rapport aux photographies aériennes. Certains pensent que cette méthode peut apporter une contribution précieuse à l'étude des structures terrestres en particulier la fracturation. En effet, de par son échelle, elle offre une vue beaucoup plus globale de la surface de la terre, donc adaptée à l'étude des grandes structures de la terre. De plus, son acquisition sélective selon différentes longueurs d'onde (tableau 6) et à des dates différentes théoriquement régulières (tous les 18 jours) offrent des avantages quant à la détection de structures masquées mais qui se traduisent par des phénomènes superficiels peu remarquables au sol.

L'objectif de cette étude consiste donc à rechercher l'existence de relations éventuelles entre les linéaments visibles sur image satellite et les fractures qu'on peut détecter à plus grande échelle dans le socle de Haute-Volta. Pour cela, trois zones ont servi de base à ce travail. Nous rappelons sur le tableau ci-joint la démarche suivie dans chaque zone.

II - RESUME DES PRINCIPAUX RESULTATS (Tableau 15)

Sur la première zone, une carte de synthèse comportant la fracturation à partir des photographies aériennes et des linéaments sur image satellite a été dressée, puis une vérification des fractures sur le terrain a été effectuée. De multiples facteurs ont rendu ce contrôle très difficile : relief très plat, rareté des affleurements dont la forme en boule ne montre pas souvent d'orientation précise, développement intense des cultures ce qui entraîne un effacement des structures originelles et enfin présence d'un manteau d'altération quasi-continue. Néanmoins, il semble que les linéaments et les photo-fractures correspondent à des vallons ou à des rebords de cuirasses lorsque celles-ci sont encore conservées.

En l'absence de forage ou de contrôle par mesures géophysiques, il n'est pas possible d'affirmer que ces vallons ou ces rebords correspondent bien à des fractures. On est contraint de se contenter d'hypothèses :

- certains auteurs admettent que le tracé des rivières se surimpose aux fractures (ENGALENC, 1978 ; BOURGUET, 1980 ; GUIRAUD, 1975) ;
- on peut également imaginer que les reliques de cuirasse correspondent à des parties de socle moins fracturées.

Dans ces conditions on peut penser que linéaments et photo-fractures, localisés dans les vallées et sur les versants à l'écart des zones somitales, correspondent à des fractures.

Sur la deuxième zone, on a procédé à la comparaison de l'analyse de l'image satellite brute et des images traitées avec l'interprétation des photographies aériennes. L'analyse statistique des directions montre une bonne coïncidence des principales familles ; cependant, le traitement fait disparaître certaines familles (N 175°E dans le canal A) et renforce l'importance d'autres familles (N 65°E dans le canal B).

Le contrôle au sol (petite fracturation) a pu être effectué mais sur une surface restreinte. L'étude de la fracturation, à grande échelle sur affleurement, permet de classer les différentes directions fracturales en fonction des caractéristiques constatées (déplacements, remplissages, etc...) et d'en déduire la signification dynamique des accidents (compression, tension, cisaillement). De cette façon, il devient possible d'établir

Zone-test	Géologie	Géomorphologie	Méthodes d'études	Résultats	Remarques
Tensobentenga	Essentiellement granitique.	<ul style="list-style-type: none"> - Plate-Inselbergs sans orientation préférentielle. - Altération épaisse. - Cuirasses démantelées 	<ul style="list-style-type: none"> - Image noir et blanc au 1/500.000 agrandie au 1/50.000 - Photo-fracturation au 1/50.000 - Document unique par superposition des deux interprétations. - Contrôle géomorphologique au sol. 	On ne retrouve pas toujours la trace des linéaments dans le modelé. Linéaments ou photo-fractures sont identifiables quand il y a coïncidence avec le réseau hydrographique ou les rebords de cuirasse	<ul style="list-style-type: none"> - Existence de peu d'éléments de contrôle en surface car zone très plate (modelé granitique) et très cultivée.
Mogtedo	Birimien schisteux auquel s'associent quelques granites	<ul style="list-style-type: none"> - Relief plus contrasté - Altération plus épaisse - Cuirasse démantelée mais il reste de nombreuses buttes cuirassées. 	<ul style="list-style-type: none"> - image noir et blanc au 1/200.000 agrandie au 1/100.000. - Photographie aérienne au 1/50.000 réduit au 1/100.000 - Images traitées au 1/100.000 - Analyse structurale sur affleurement. - Documents séparés. 	<p>La comparaison statistique des principales directions de fractures donne des résultats satisfaisants.</p> <p>- Essai de hiérarchisation des familles de fractures pour l'hydrogéologie en fonction de leur origine tectono-dynamique.</p>	La zone d'affleurement utilisée est restreinte et d'origine plutonique et pas forcément représentative de toute la zone-test.
Pilimpikou	Schistes amphiboliques et schistes argileux	<ul style="list-style-type: none"> - Relief contrasté : colline de schistes et nombreuses buttes cuirassées 	<ul style="list-style-type: none"> - Image noir et blanc au 1/200.000 complétée avec composition colorée au 1/200.000, agrandie au 1/50.000. - Photographie aérienne au 1/50.000. - Prospection électrique sur site sélectionné. 	Décalage entre linéaments et/ou photo-fractures et anomalies géophysiques.	<ul style="list-style-type: none"> - Le faible nombre de sites, le caractère ponctuel des mesures géophysiques ainsi que la moyenne longueur des lignes de profil (600 m) ne permettent pas une étude statistique comparative.

Tableau 15 - Résumé des résultats.

une hiérarchie des différentes familles fracturales du point de vue de leur utilité pour les circulations hydrauliques. Ainsi, les fractures résultant de contraintes de tension sont réputées plus favorables que les autres (LARSSON, 1963 et autres...).

L'étude statistique comparée des directions des linéaments et/ou des photo-fractures avec la petite fracturation, sur un nombre d'affleurements suffisamment représentatif d'une zone, peut donc mettre en évidence les directions préférentielles de circulations des eaux souterraines en fonction de l'origine tectono-dynamique des fractures.

En conclusion de cette analyse, on propose, du point de vue hydraulique, une direction préférentielle (N 110-120°E) dans les granites birrimiens et une autre dans les formations birrimiennes schisteuses saines (N 90°E). Les travaux ultérieurs devront vérifier ces propositions.

Sur la troisième zone, nous avons comparé l'interprétation, de l'image satellite au 1/200.000 et son agrandissement au 1/50.000, à celle des photographies aériennes au 1/50.000. Ensuite nous avons procédé à des contrôles au sol par mesures géophysiques (prospection électrique). Cinq sites supposés hydrauliquement favorables et situés à l'aplomb de linéaments ou à leur croisement, ont été prospectés (profilage et sondage électrique).

Seul le site n° 1, situé à l'aplomb d'un mégalinéament (cf. annexe) donne lieu à une forte anomalie de résistivité et correspond d'après le sondage électrique à une zone conductrice de plus de 50 mètres d'épaisseur. Les autres traces de linéaments ne semblent pas donner lieu à des anomalies géophysiques.

La non coïncidence apparemment assez fréquente entre linéaments ou photo-fractures et anomalies géophysiques peut s'expliquer de différentes manières. Quatre cas possibles sont envisageables.

- Premier cas. Le linéament est un artéfact pur et simple provoqué par le traitement photographique ou le système de balayage. En général, ces artéfacts sont facilement identifiables et ne sont pas relevés comme linéaments au cours de l'interprétation. On peut signaler à ce sujet que le défaut de linéaments est-ouest sur l'interprétation de l'image est dû aux lignes de balayage. Ces linéaments est-ouest sont systématiquement écartés au cours de l'interprétation pour éviter les risques de confusion.

- Deuxième cas. Le linéament correspond à des alignements d'origine superficielle liés principalement à l'activité humaine (routes, pistes, ligne de haute tension, etc...). Mais lorsque le linéament est ainsi reconnu, il n'est pas cartographié, donc n'intervient pas dans la sélection des sites d'implantation des forages d'eau.

- Troisième cas. Le linéament est le résultat de la différence de réflectance entre des éléments superficiels comme des alignements de sols, de végétation, etc... (fig. 79 A). Ces alignements, qui n'ont pas en apparence de relation avec les structures géologiques, peuvent traduire des manifestations de phénomènes profonds qu'on ne sait pas encore interpréter.

- Quatrième cas. Le linéament reflète l'existence d'une discontinuité structurale en profondeur mais dont le positionnement exact sur le terrain est soumis à une marge d'erreur de l'ordre de quelques dizaines de mètres, due à la présence de la couverture d'altérites. Cette marge d'erreur est d'autant plus grande qu'elle peut être accentuée par le choix du tracé par l'interpréteur. On a pu constater que la longueur de ligne utilisée au cours du profilage géophysique pour contrôler l'accident présumé n'est pas toujours suffisante pour couvrir la marge d'erreur. Deux types de situation peuvent se présenter dans ce cas. Dans la première, le linéament correspond à une fracture unique (fig. 79 B) mais il y a eu erreur dans le positionnement du profil électrique alors que dans la seconde le profil électrique est implanté au milieu d'un linéament qui traduit un accident structural diffus par exemple une zone de broyage suffisamment large (fig. 79 C).

III - GENERALISATION

Les résultats obtenus dans les trois zones-tests ne sont pas rigoureusement comparables. Les étapes successives : analyse structurale à petite et à grande échelle, contrôle géophysique n'ont pu être appliquées à la même zone. Il apparaît donc une disparité certaine entre les résultats d'une zone à l'autre, ce qui rend difficile la généralisation. Chacune des approches utilisées présente des avantages nombreux mais a aussi ses limites.

L'image satellite par la surface couverte (185 x 185 km) offre une vision d'ensemble des structures. Elle fournit des résultats appréciables quand des affleurements au sol ou les lignes de reliefs contrastées

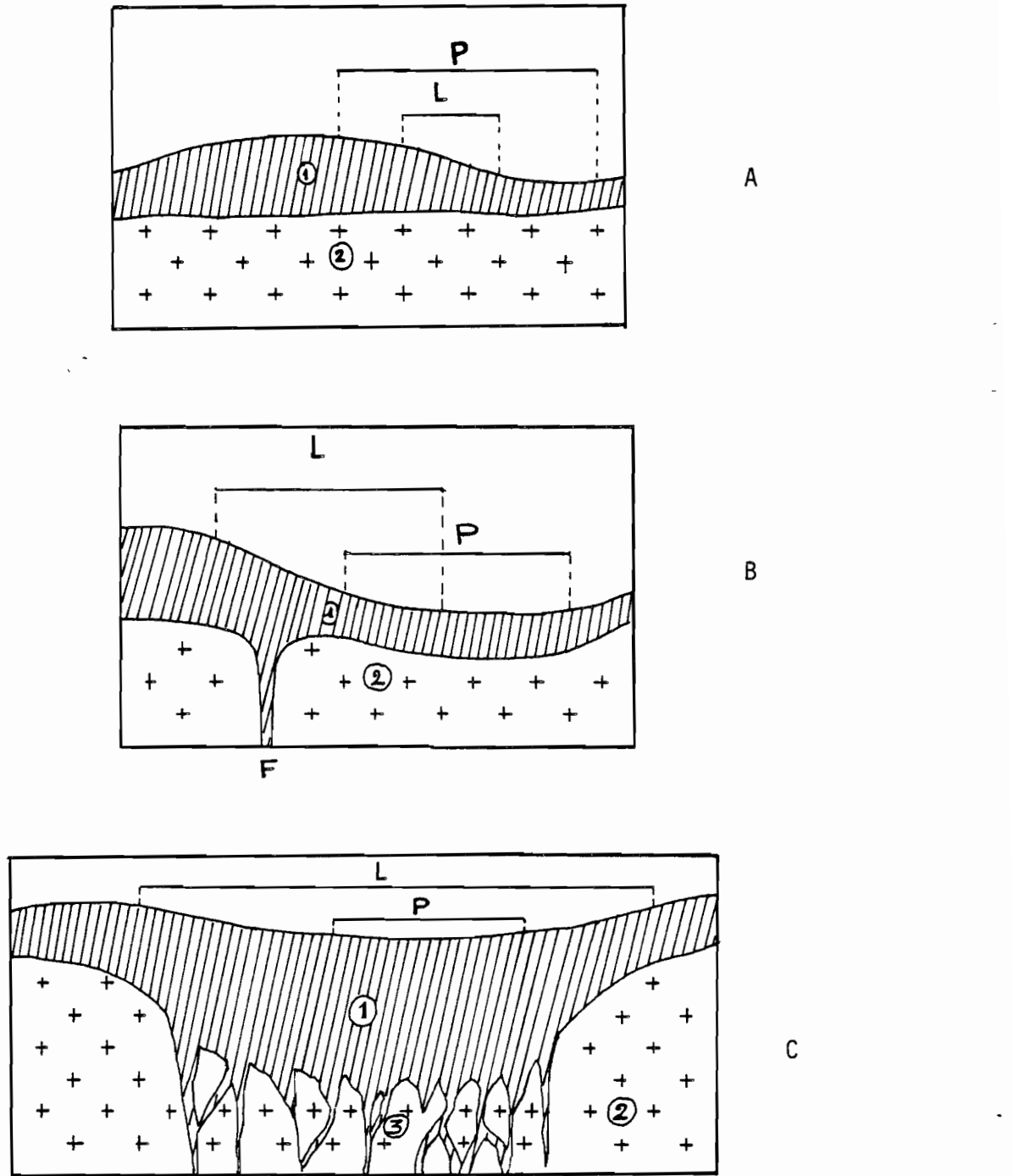


Fig. 79 - Schémas explicatifs de la non-correspondance entre linéaments et discontinuités structurales du socle.

1 - altérite.

2 - roche saine

3 - zone broyée

F = fracture

L = linéament

P = profil électrique

A : linéament = alignements superficiels.

B : linéament correspond à une fracture mais profil géophysique décalé.

C : linéament = zone broyée, profil au milieu de la zone broyée.

permettent une bonne possibilité de repérage des linéaments. Son coût actuel est relativement peu élevé. Un tirage à l'échelle du 1/500.000^e coûte 3.500 F CFA au CRTO. Si sa superficie (33.000 km²) représente un avantage pour des études de synthèse à l'échelle régionale, celle-ci peut devenir un inconvénient quand l'on veut passer à l'échelle du terrain. En plus le manque de reliefs sur les images ne favorise pas toujours une bonne corrélation entre ces dernières et la réalité du terrain.

Néanmoins, lorsque les débits recherchés sont importants ($Q > 5 \text{ m}^3/\text{h}$), l'image satellite peut se révéler le meilleur guide pour l'hydrogéologue dans l'implantation des forages. En effet, dans le cadre de l'alimentation en eau de centres secondaires en Haute-Volta, BERARD (1981) obtient dans le socle des débits dépassant $10 \text{ m}^3/\text{h}$ pour des forages implantés sur des linéaments repérés sur l'image Landsat.

La photographie aérienne, grâce à la perception du relief qu'elle offre à l'hydrogéologue, donne la possibilité de mieux apprécier les détails. Elle demeure par conséquent un guide précieux pour les travaux de terrain qu'elle oriente surtout dans des régions où les cartes à grande échelle sont rares, les plus grandes échelles généralement disponibles dans les régions sahéliennes étant au 1/200.000^e. Elle remplace donc bien souvent ces cartes et permet d'obtenir des taux de succès importants. Ainsi ASSOUMA (1982), analysant 300 forages situés dans le socle au Togo, obtient 80 à 85 % de succès ($Q > 0,7 \text{ m}^3/\text{h}$) pour des implantations faites à la croisée de photo-fractures.

Avec la prochaine génération de satellites (en particulier le satellite français Spot et le satellite américain Landsat D) dont la résolution au sol sera meilleure (10, 20 et 30 m) et qui permettront la prise de vues stéréoscopiques (Spot), l'image satellite fournira certainement autant de détails que les photographies aériennes à 1/50.000^e. Ce sera un progrès certain.

Enfin, le repérage des fractures sur le terrain reste souvent difficile et repose le problème de l'implantation précise du forage. Pour localiser exactement la fracture, l'hydrogéologue doit faire appel à d'autres méthodes :

- soit des méthodes directes comme le sondage de reconnaissance qui permet d'étudier les roches en profondeur, mais le sondage de reconnaissance a un coût très élevé (de 2 à 3,5 MF CFA), ce qui n'autorise pas son emploi usuel ;

- soit des méthodes indirectes comme la géophysique, ce qui lui permet de préciser la localisation et la nature des anomalies et de déterminer la répartition des structures en profondeur.

IV - CONCLUSION SUR LE CHAPITRE II

Le repérage des fractures à différentes échelles et de manière la plus synthétique possible sur l'image satellite constitue donc une phase importante de l'implantation et l'intérêt de cette démarche est prouvé. Il est possible, d'après nos remarques ci-dessus que le taux de succès et plus particulièrement les débits augmentent à condition que l'hydrogéologue parvienne à localiser exactement la trace des accidents reconnus sur image satellite ou photographie aérienne.

En effet, les documents de télédétection bénéficient de l'effet d'intégration associé à l'échelle qui assure une vision plus synthétique de la fracturation. De plus, l'analyse de ces fractures couplée avec l'étude de la petite fracturation sur affleurement peut permettre à priori de sélectionner les directions fracturales présumées les plus favorables pour la recherche d'eau souterraine. Les fractures étudiées sur ces documents sont le résultat d'un ensemble de contrainte qui ont entraîné la mise en place d'une fracturation dans les ensembles géologiques en fonction de leur intensité, de leur direction et de leur succession dans le temps. L'étude de la petite fracturation sur affleurement permet de reconstituer l'évolution tectonique de ce dernier et à forsteriori de l'ensemble géologique dans lequel il s'intègre, donc du site d'implantation du forage.

CONCLUSIONS SUR LA PARTIE 3

L'absence de forages nécessaires pour étalonner ces résultats ne permet pas de répondre sans réserve à la question de savoir si les linéaments sont le reflet des fractures du socle.

Cependant, en fonction de cette expérience et lorsque les débits recherchés sont importants, on peut proposer la stratégie suivante :

- Interprétation des linéaments sur l'image satellite à l'échelle du 1/200.000è. Celle-ci ne dure que quelques heures et donne des résultats facilement corrélables avec ceux de la photographie aérienne. Dans certains cas, elle permet de dégager l'orientation préférentielle des photos-fractures ; ainsi les grandes directions fracturales sont mieux sélectionnées.

- Utilisation de la photographie aérienne pour l'obtention du détail. Celle-ci précède et sert de guide au contrôle au sol.

- Analyse combinée des deux interprétations pour le choix du site de forage. Cette analyse tiendra compte de l'importance des linéaments, de l'existence de croisement de grandes directions linéamentaires. Le choix des croisements se justifie par les difficultés rencontrées actuellement par les hydrogéologues à déterminer les directions préférentielles de circulations des eaux souterraines. Comme nous avons essayé de le montrer dans la deuxième zone, nous pensons que seules certaines directions de fractures sont susceptibles de drainer des quantités d'eau importantes.

- Contrôle au sol pour le repérage des sites retenus. Il serait souhaitable d'ajouter à ce contrôle des études structurales à grande échelle sur affleurement. Celles-ci permettent une sélection tectonique des familles d'accidents les plus favorables pour la circulation des eaux souterraines.

- Lorsque ce contrôle ne permet pas de fixer un site, alors on fera appel à la géophysique.

- Enfin, l'expérience de l'hydrogéologue et sa connaissance du terrain sont primordiales ainsi que toute l'information disponible par enquête auprès des populations.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Au terme de ce travail, les résultats acquis indiquent que la télédétection peut apporter une aide appréciable à la connaissance de la fracturation du socle ouest-africain.

Cette étude était destinée d'une part à apprendre à utiliser les techniques de télédétection et d'autre part à se servir des documents de télédétection en vue d'implantation de forages hydrauliques.

L'étude des images satellite noir et blanc présente de nombreux avantages. Livrées sous forme de films négatifs à des prix relativement bas, ces images peuvent être tirées sur papier dans tout laboratoire de traitements photographiques. Leur interprétation ne présente pas de difficultés majeures et permet d'obtenir une fracturation d'ensemble cohérente avec la réalité de terrain, là où elle peut être observée. Néanmoins, les résultats obtenus peuvent être quelquefois limités lorsque les contrastes sont faibles. Les divers traitements existants ont l'avantage d'améliorer ces contrastes mais les coûts sont plus élevés.

Le traitement numérique des images utilisé dans la deuxième zone peut simplifier l'information en soulignant certaines directions. Il provoque par ailleurs une certaine altération de l'information. On obtient par exemple le filtrage de la direction secondaire NW-SE dans l'infrarouge. Le traitement des images a aussi l'avantage de fournir des documents à des échelles plus grandes (1/100.000 et 1/50.000).

Les étapes suivantes ont été suivies au cours de l'étude :

- interprétation des images satellites et des photographies aériennes appuyée sur un contrôle des traces des linéaments et des photo-fractures au sol.
- comparaison des principales familles directionnelles obtenues par l'interprétation de l'image satellite et de la photographie aérienne aux principales familles fracturales de la petite fracturation étudiée sur le terrain. La correspondance entre les familles obtenues à l'aide d'échelles d'observation contrastées, est généralement assez satisfaisante.

- contrôle par prospection géophysique (prospection électrique au sol) de l'existence d'anomalies correspondant aux linéaments. Ce contrôle s'est plusieurs fois avéré négatif (quatre fois sur cinq) pour des raisons qui tiennent essentiellement à la difficulté de repérage précis des linéaments sur le terrain et peut-être au caractère diffus des anomalies.

Les principaux résultats obtenus peuvent ainsi se résumer :

- zone 1 - L'interprétation des linéaments à l'échelle du 1/500.000 donne une densité très faible après agrandissement au 1/50.000. La fracturation obtenue par photographie aérienne est par contre dense. Le contrôle au sol montre que les linéaments et les photo-fractures se traduisent par des éléments divers : réseau hydrographique, vallons, bordure de cuirasse. Mais la présence du manteau d'altération, le manque de forages ne permettent pas toujours de retrouver la manifestation concrète de ces fractures sur le terrain.
- zone 2 - Il ressort que l'image satellite brute permet une étude statistique appréciable de la fracturation. Les principales directions fracturales qu'elle manifeste (N 35° E, N 45° E et N 55° E) correspondent sensiblement aux directions des photo-fractures et de la petite fracturation sur affleurement. Cependant les fractures les plus courtes se marquent peu sur l'image satellite, par exemple la direction N 120° E.
- zone 3 - On a utilisé la prospection géophysique pour le contrôle des linéaments et des photo-fractures. Le contrôle n'a permis de retrouver qu'une fois sur cinq la trace des linéaments, ce qui pose des problèmes que nous avons tenté d'expliquer plus haut.

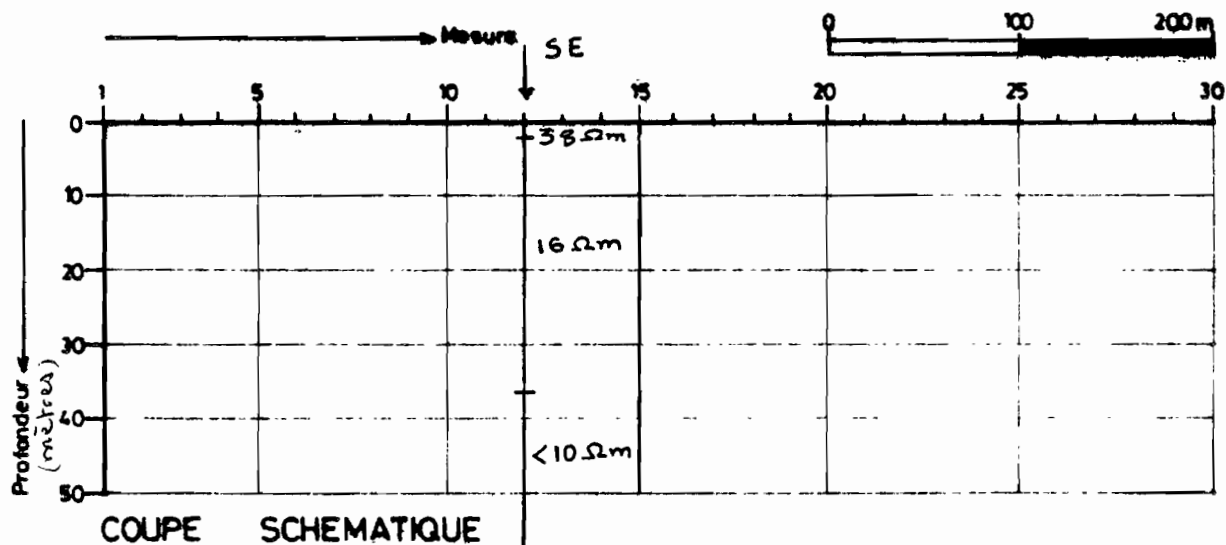
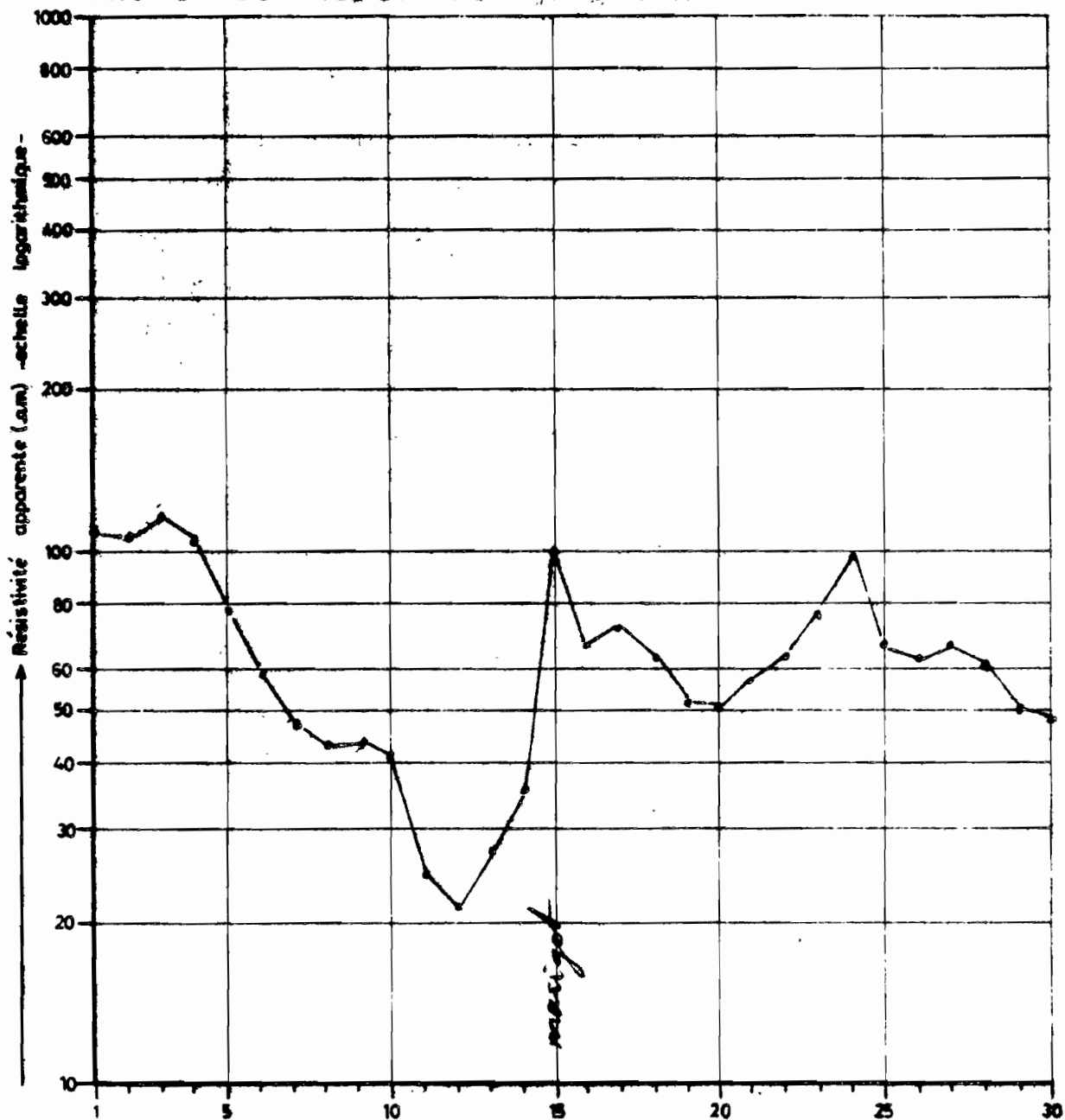
L'expérience acquise ne nous permet pas de mesurer statistiquement la corrélation entre linéaments et fractures du socle. Probablement les linéaments en particulier les plus grands, correspondent-ils à des fractures mais il demeure un grand nombre de linéaments dont la relation avec la structure géologique profonde reste encore énigmatique.

ANNEXE

COURBES DE PROFILS DE RESISTIVITE ET DE SONDAGES
ELECTRIQUES

SE

PROFIL DE RESISTIVITE APPARENTE

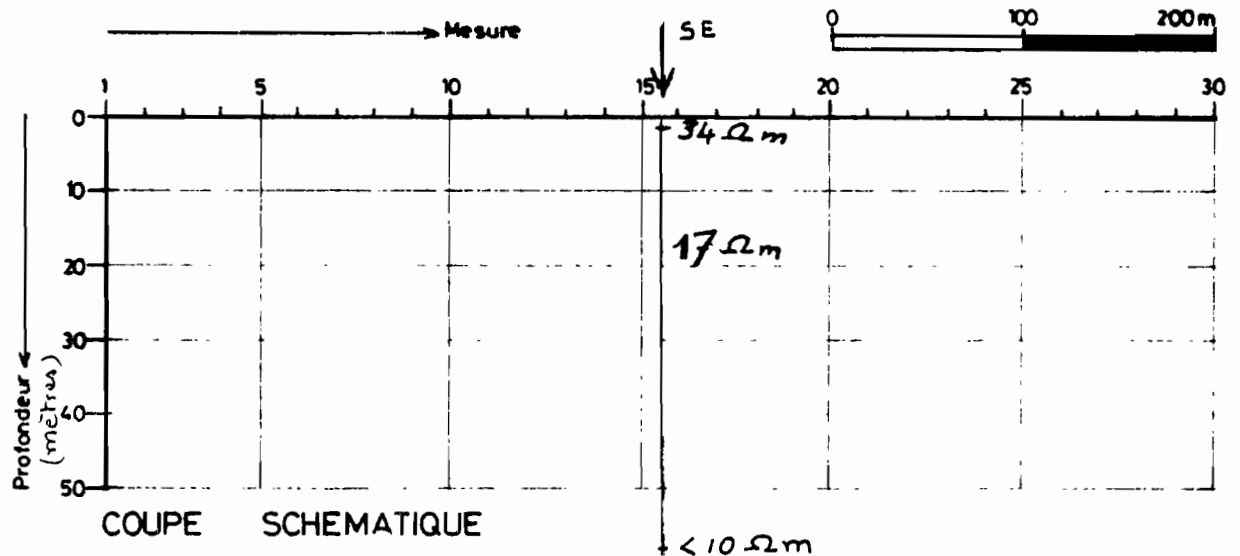
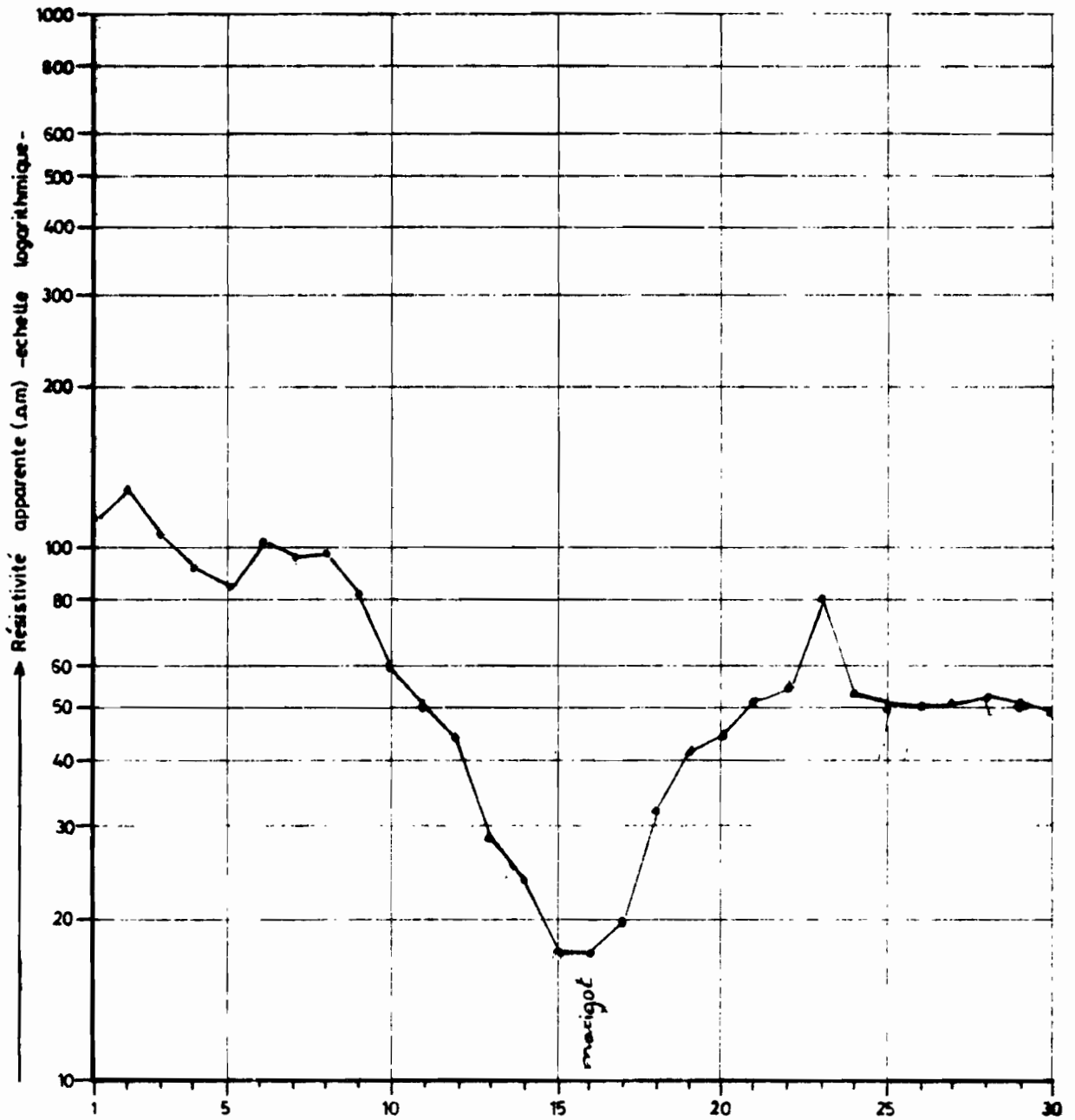


Site 1 - Courbe du profil 1
Interprétation du S.E.

SE

NW

PROFIL DE RESISTIVITE APPARENTE

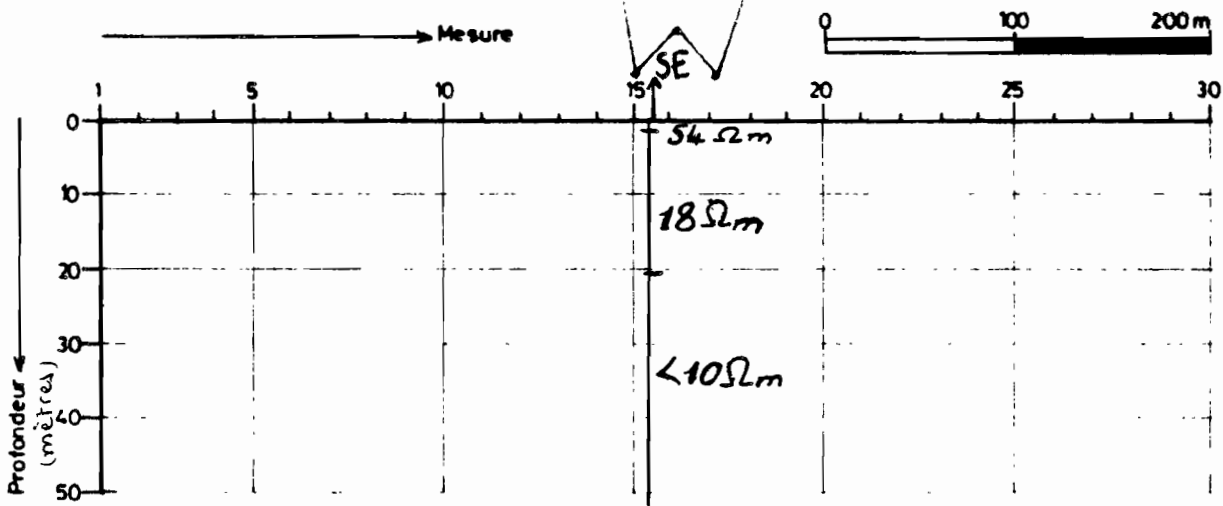
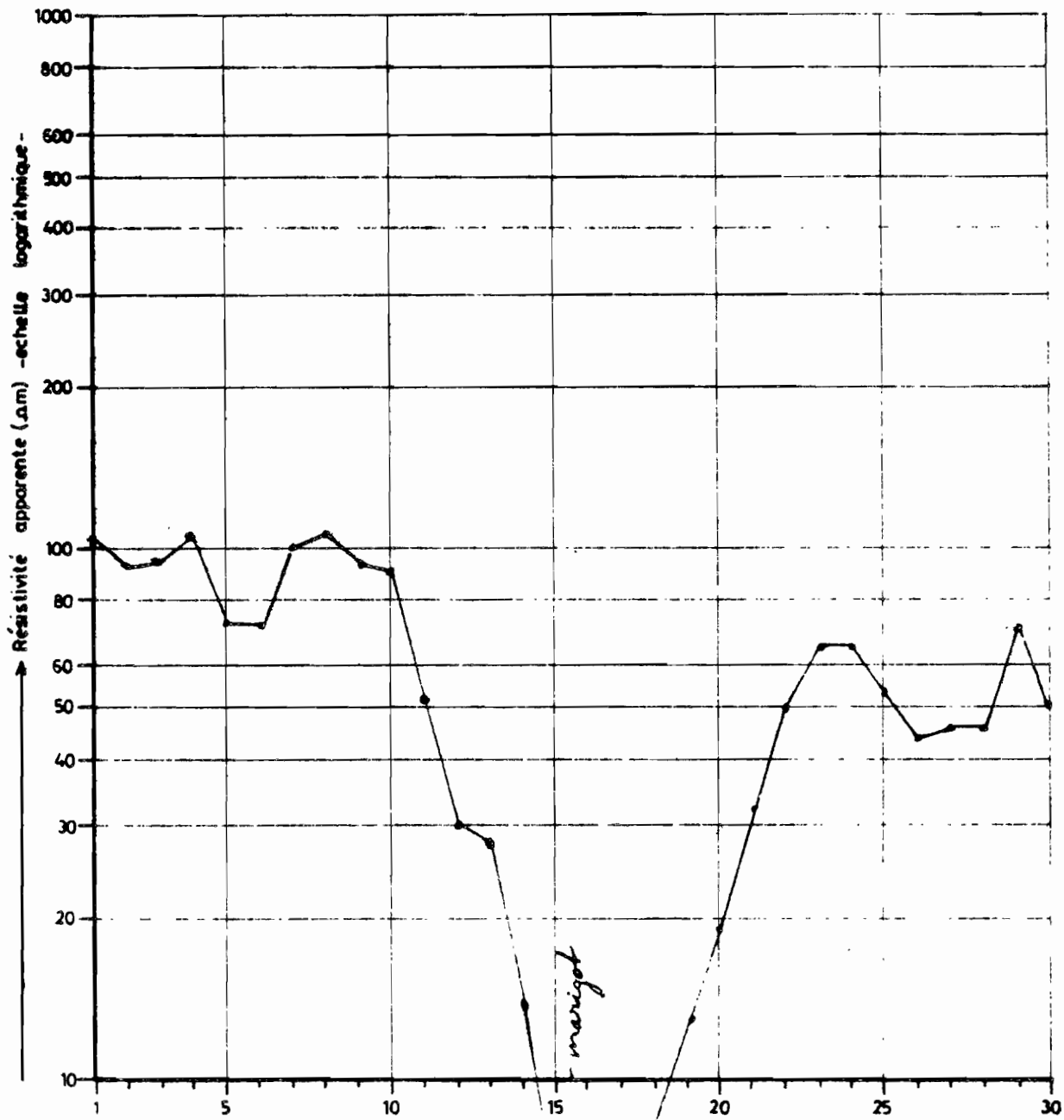


Site 1 - Courbe du profil 2
Interprétation du S.E.

SE

PROFIL DE RESISTIVITE APPARENTE

NW

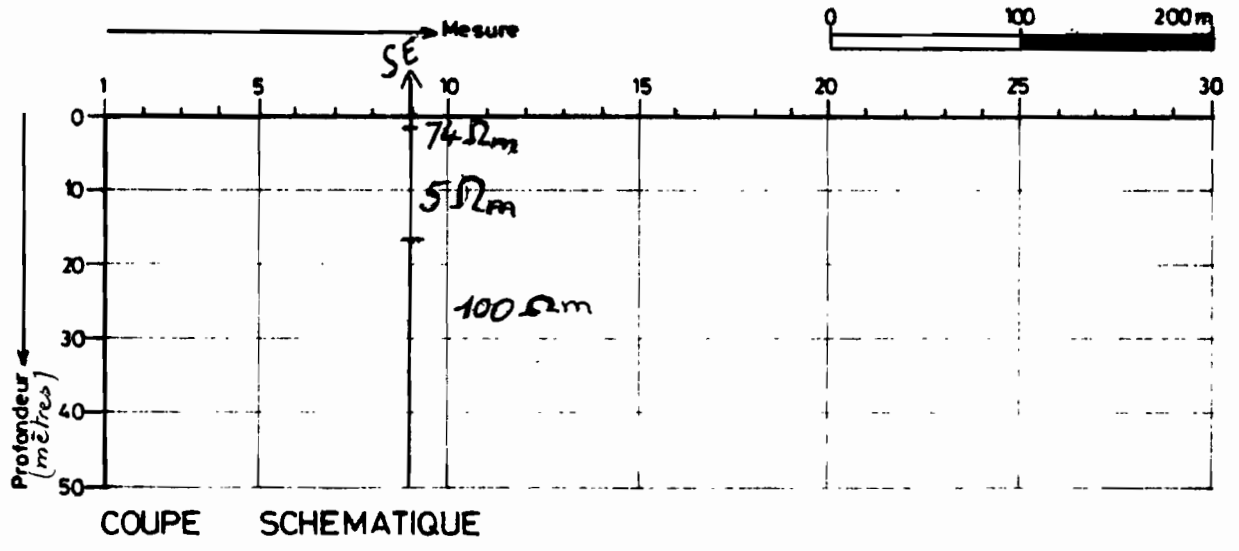
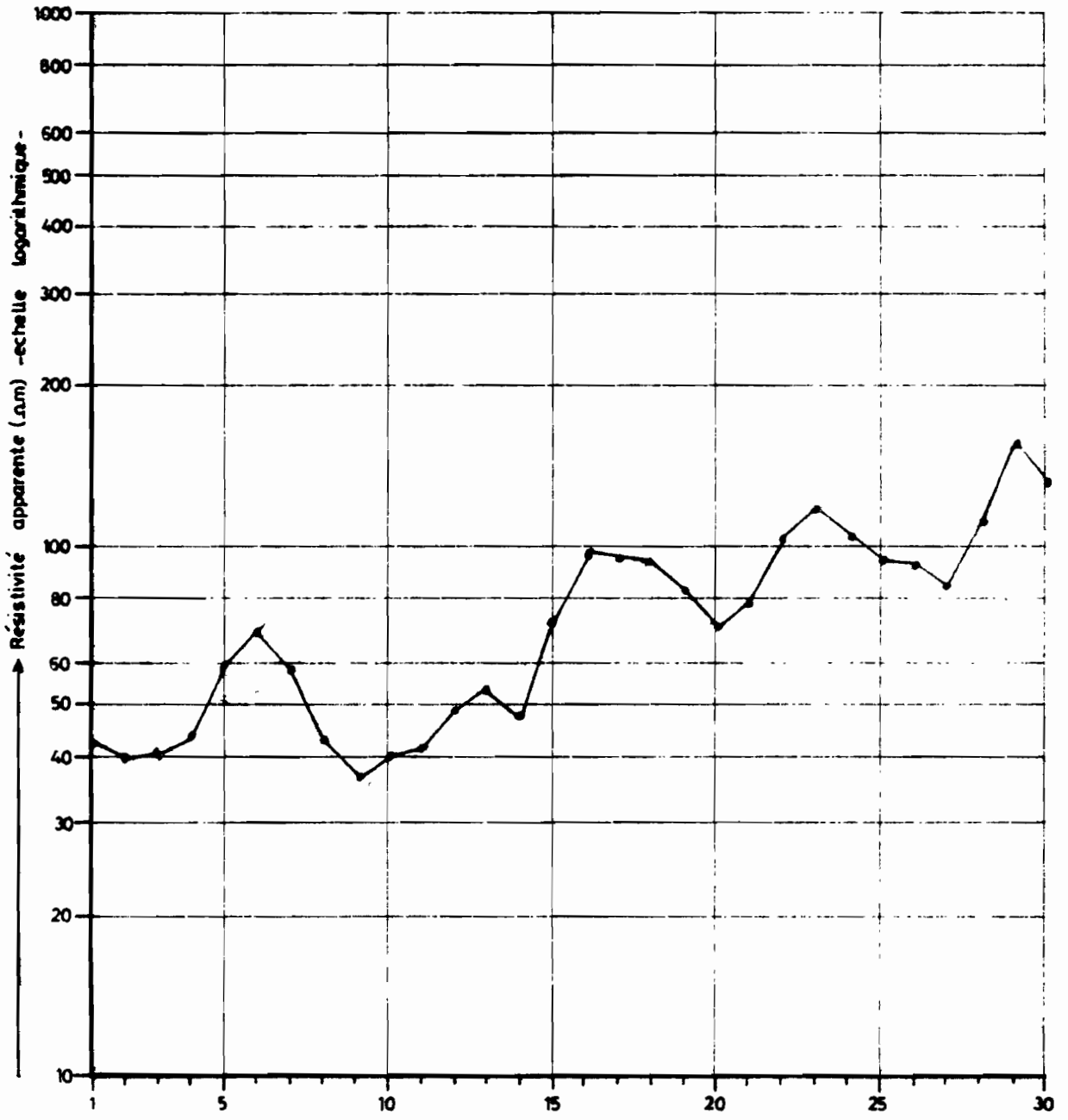


Site 1 - Courbe du profil 3
Interprétation du S.E.

SSW

PROFIL DE RESISTIVITE APPARENTE

NNE



COUPE SCHEMATIQUE

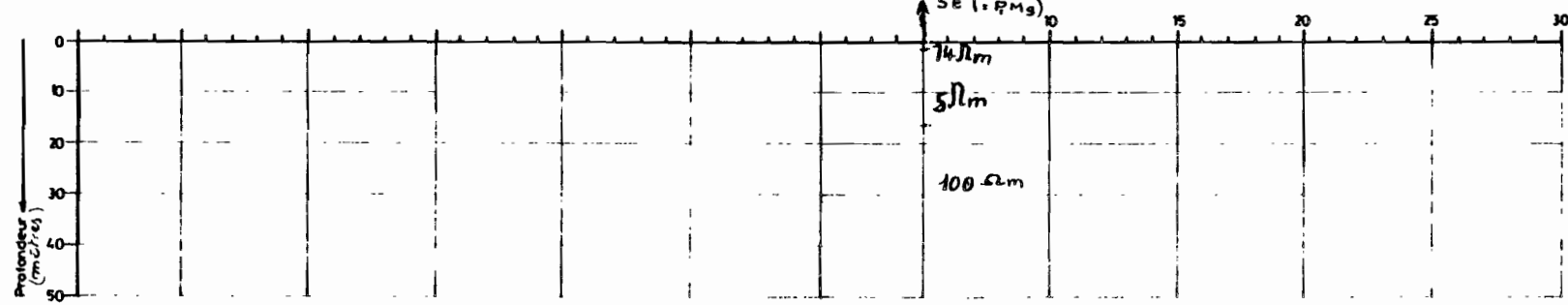
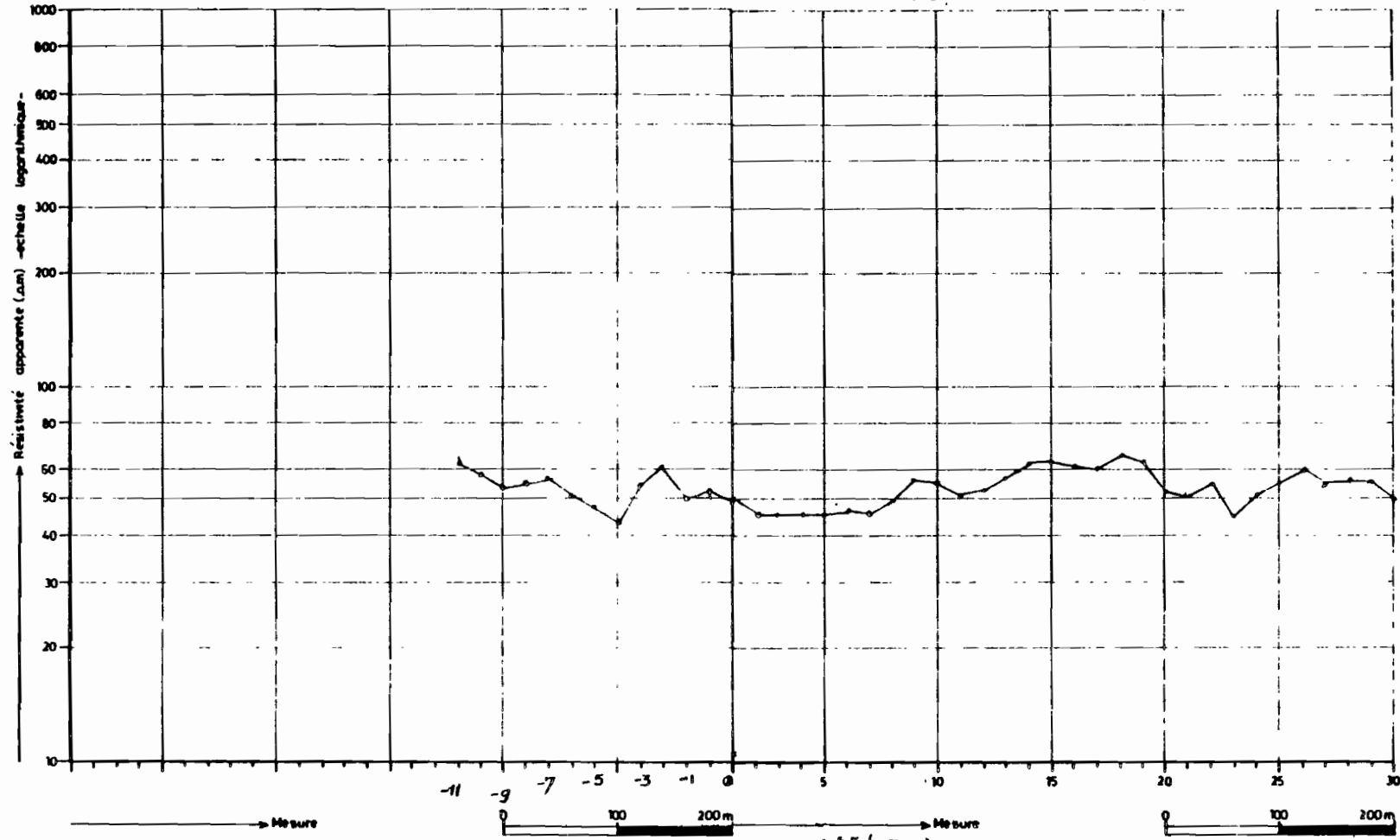
Site 2 Courbe du profil 1
Interprétation du S.E.

WNA

PROFIL DE RESISTIVITE APPARENTE

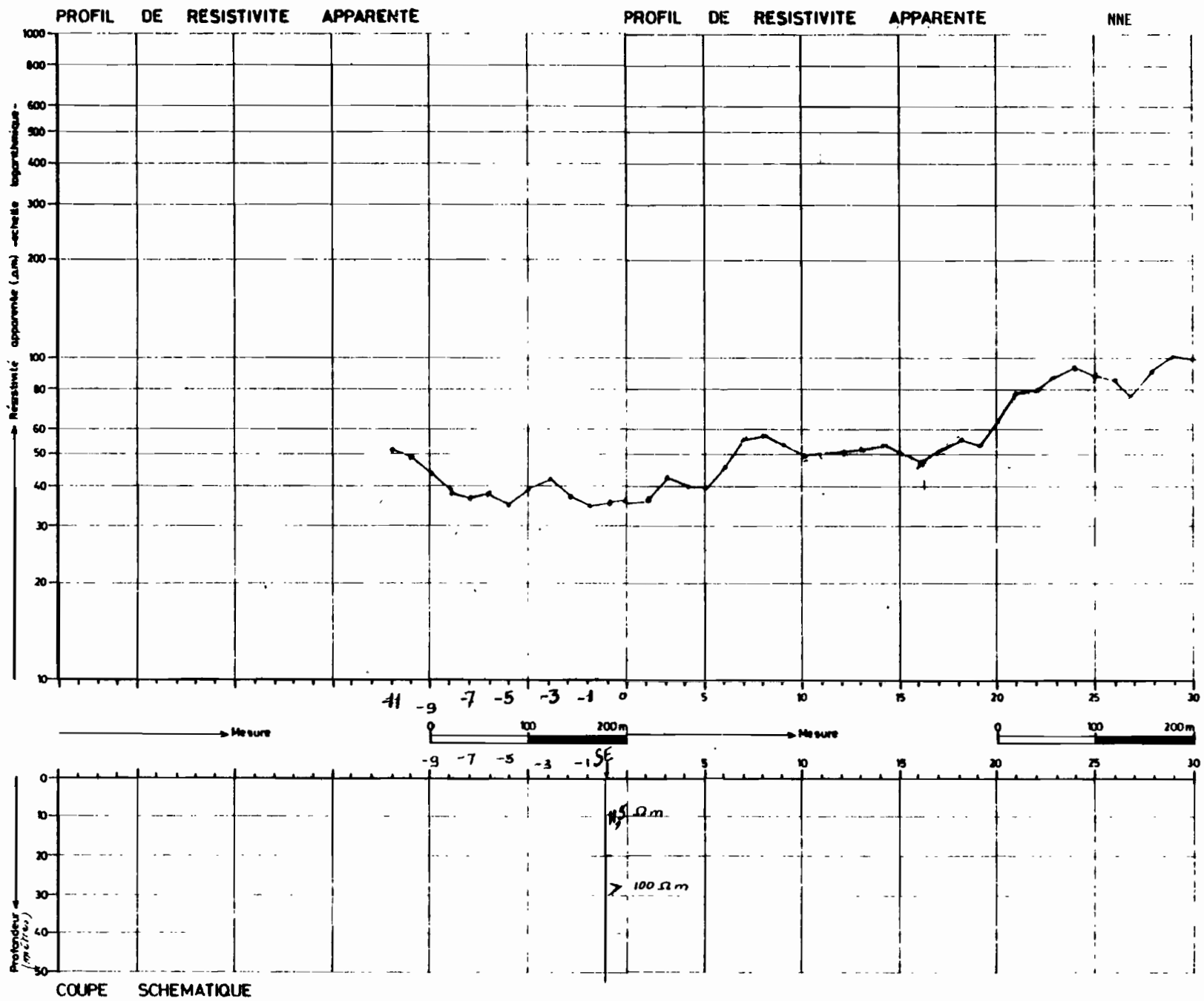
PROFIL DE RESISTIVITE APPARENTE

ESE



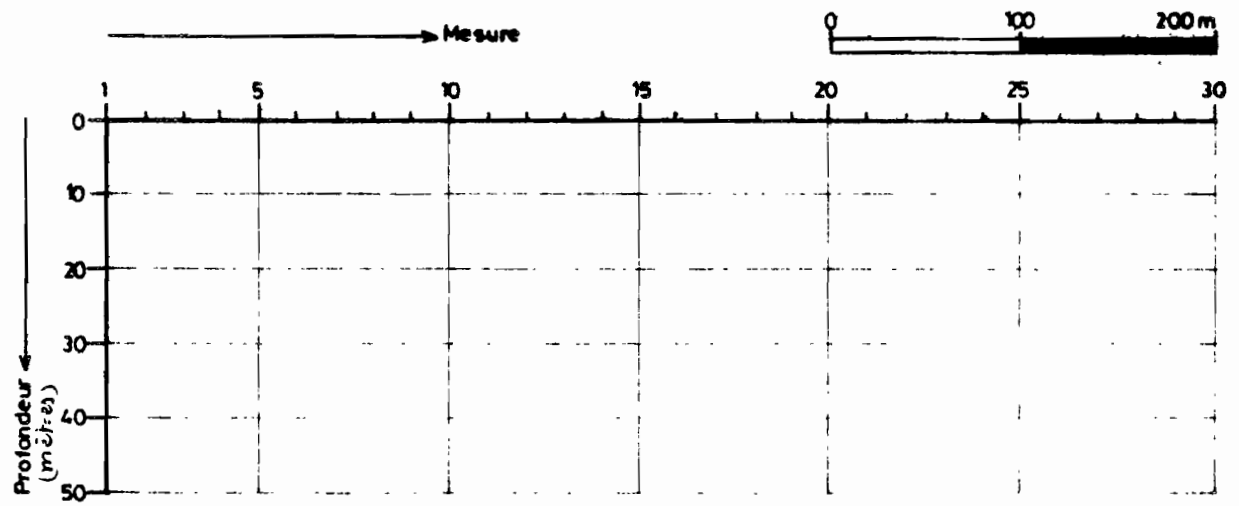
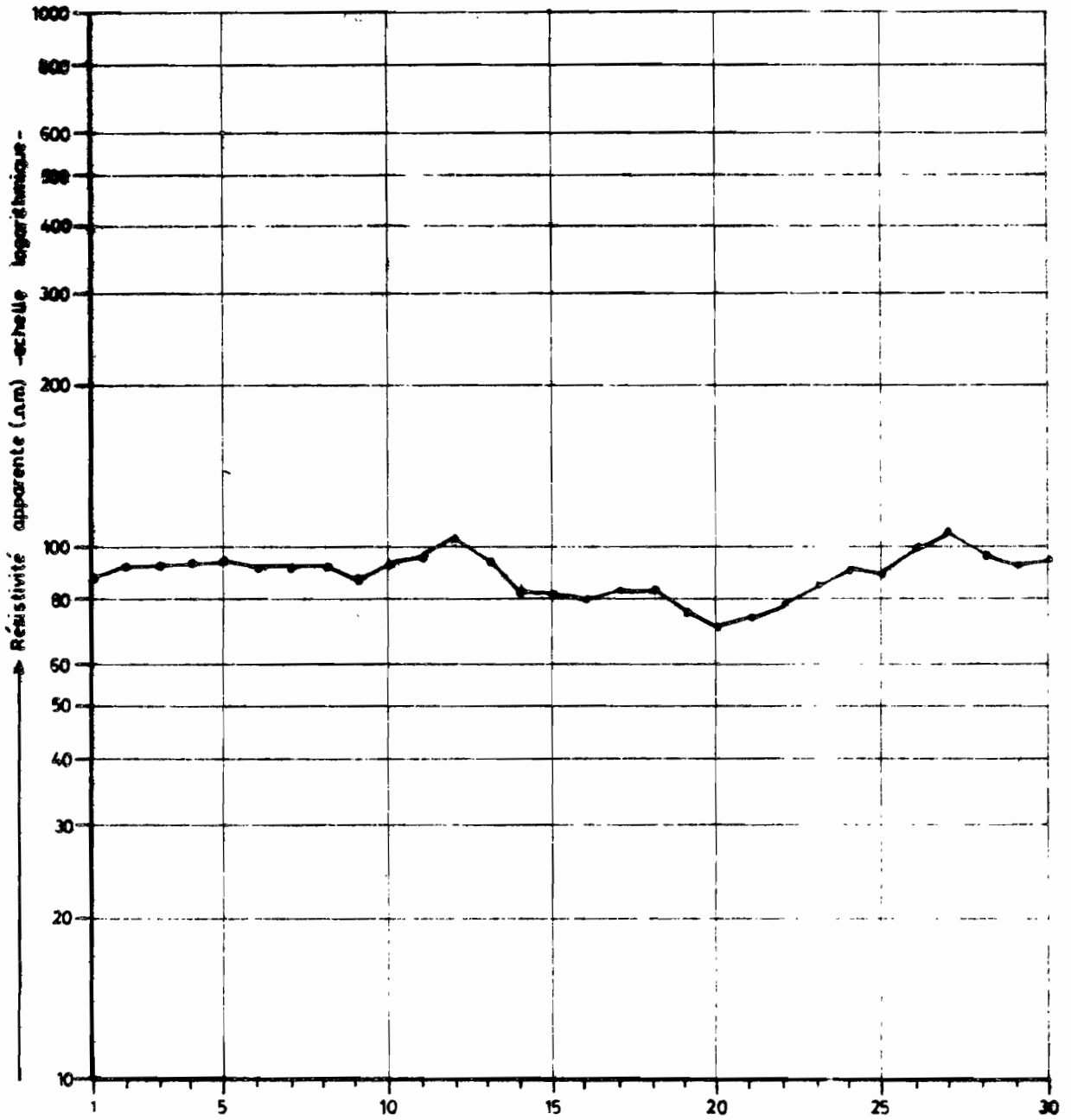
COUPE SCHEMATIQUE

Site 2 - Courbe du profil 2
Interprétation du S.E.



Site 2 Courbe du profil 3
Interpretation du S.E.

PROFIL DE RESISTIVITE APPARENTE



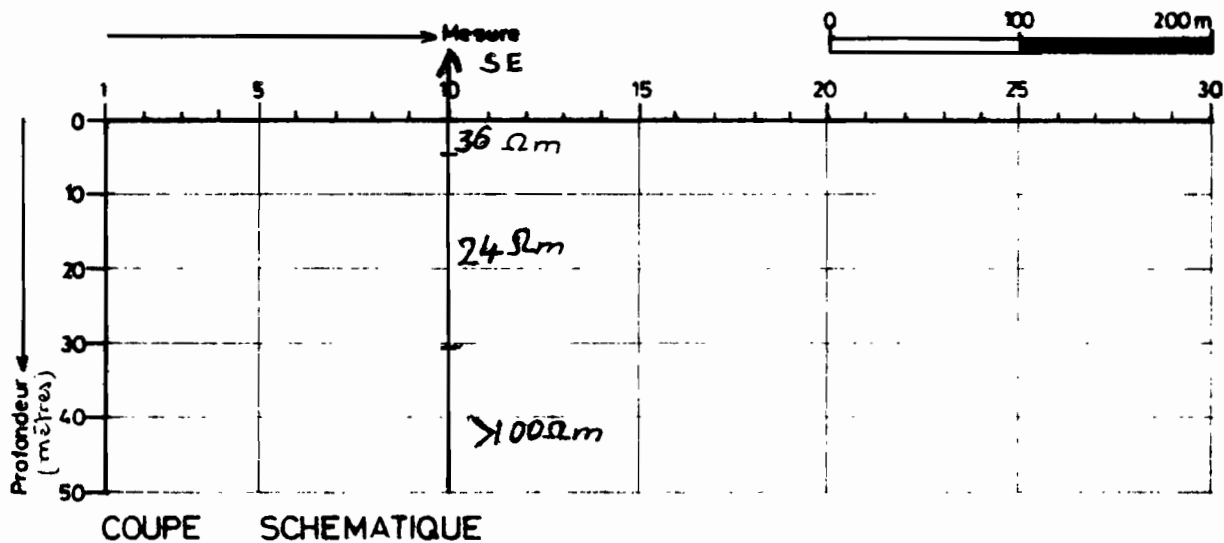
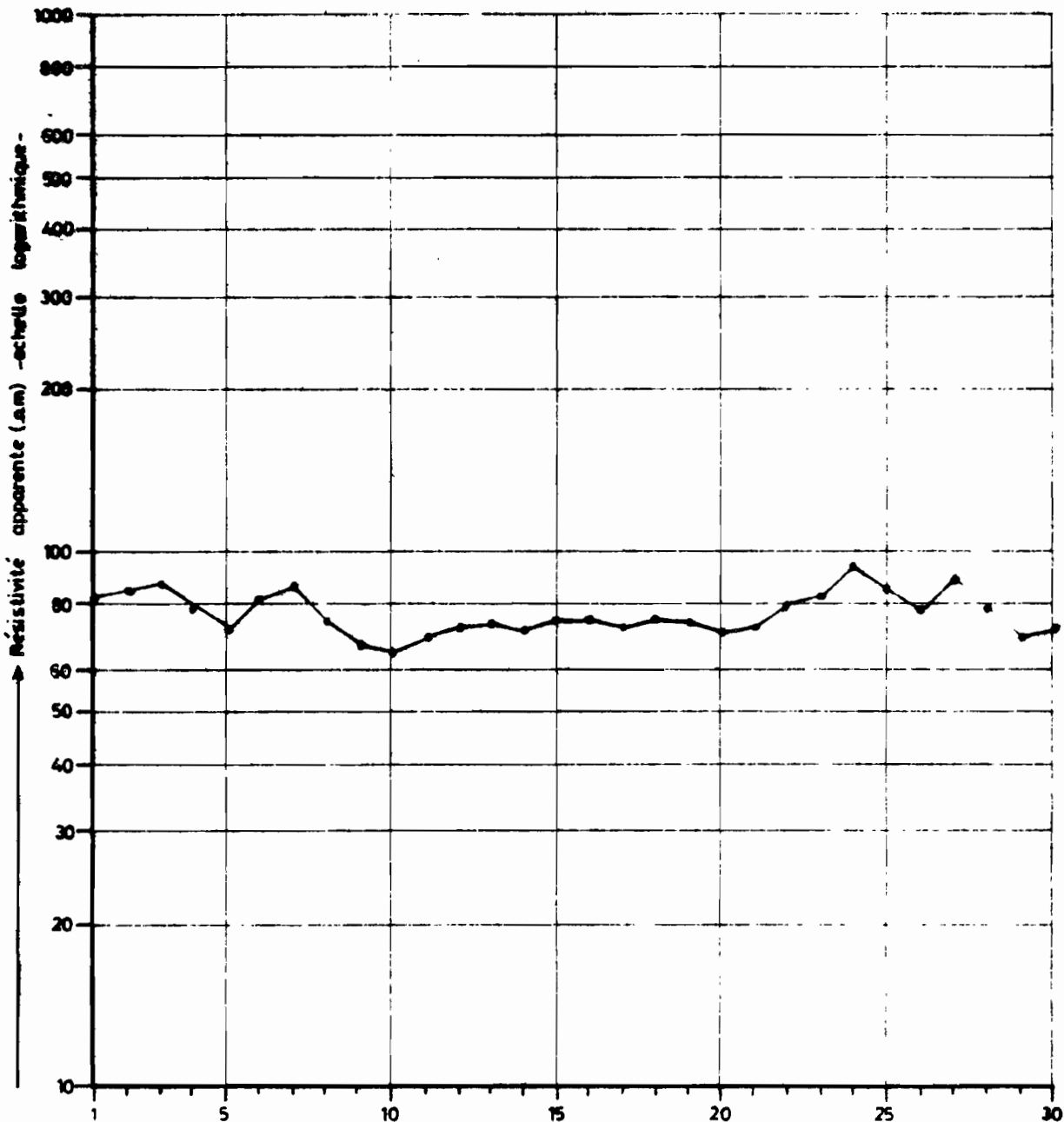
COUPE SCHEMATIQUE

Site 3 - Courbe du profil 1

NW

SE

PROFIL DE RESISTIVITE APPARENTE

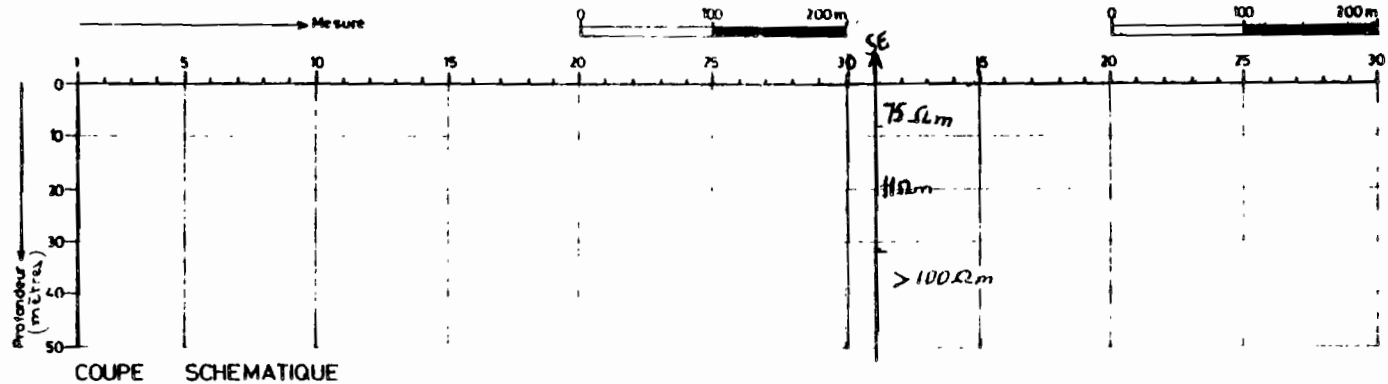
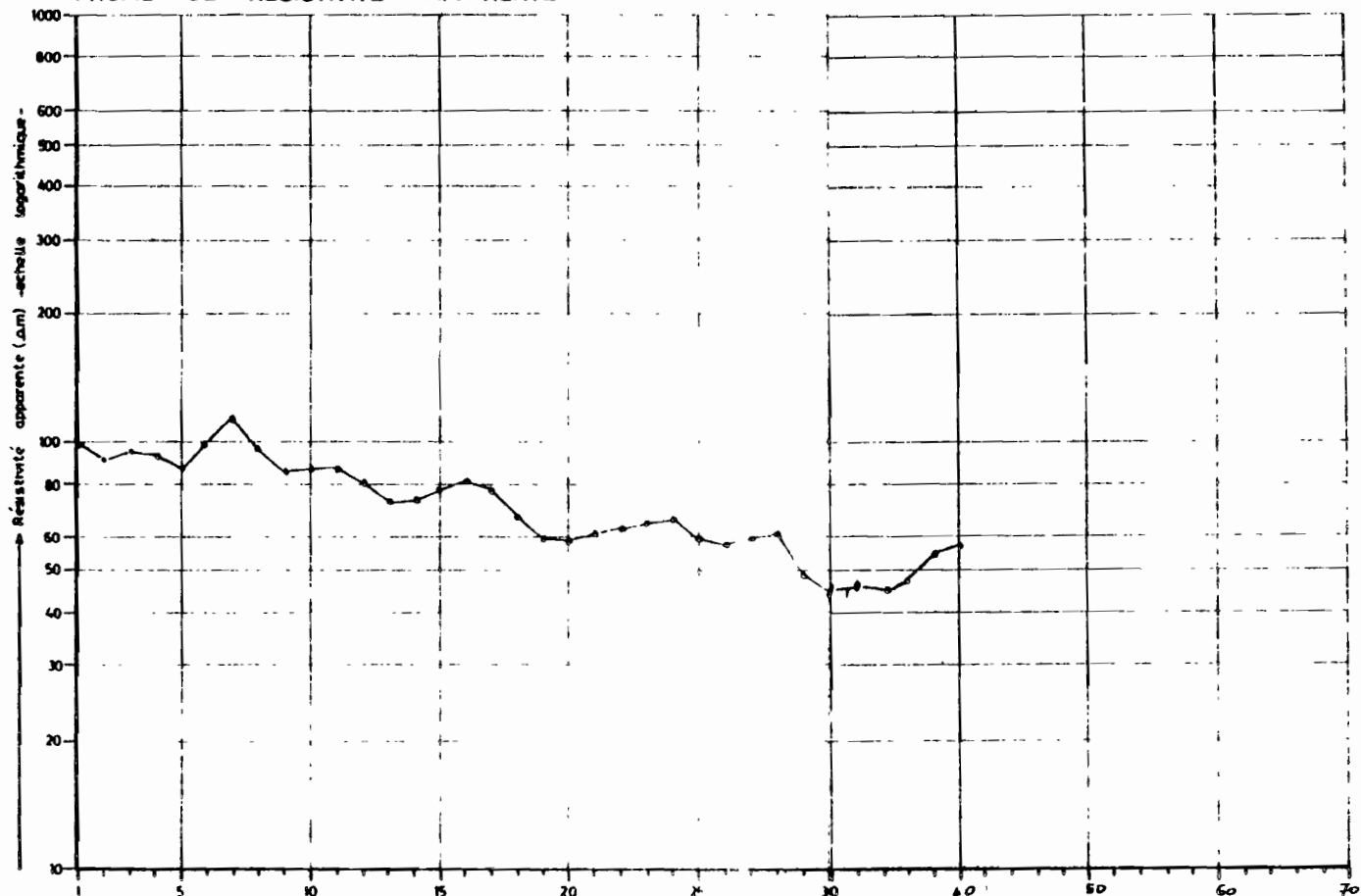


Site 3 - Courbe du Profil 2
Interprétation du S.E.

NW

PROFIL DE RESISTIVITE APPARENTE

SE



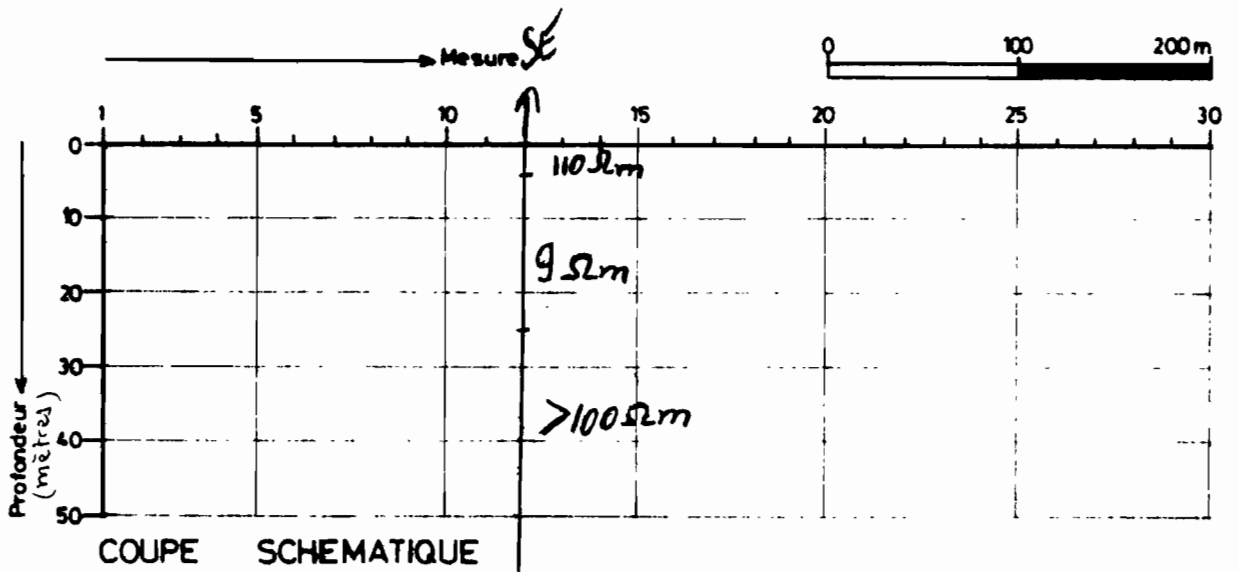
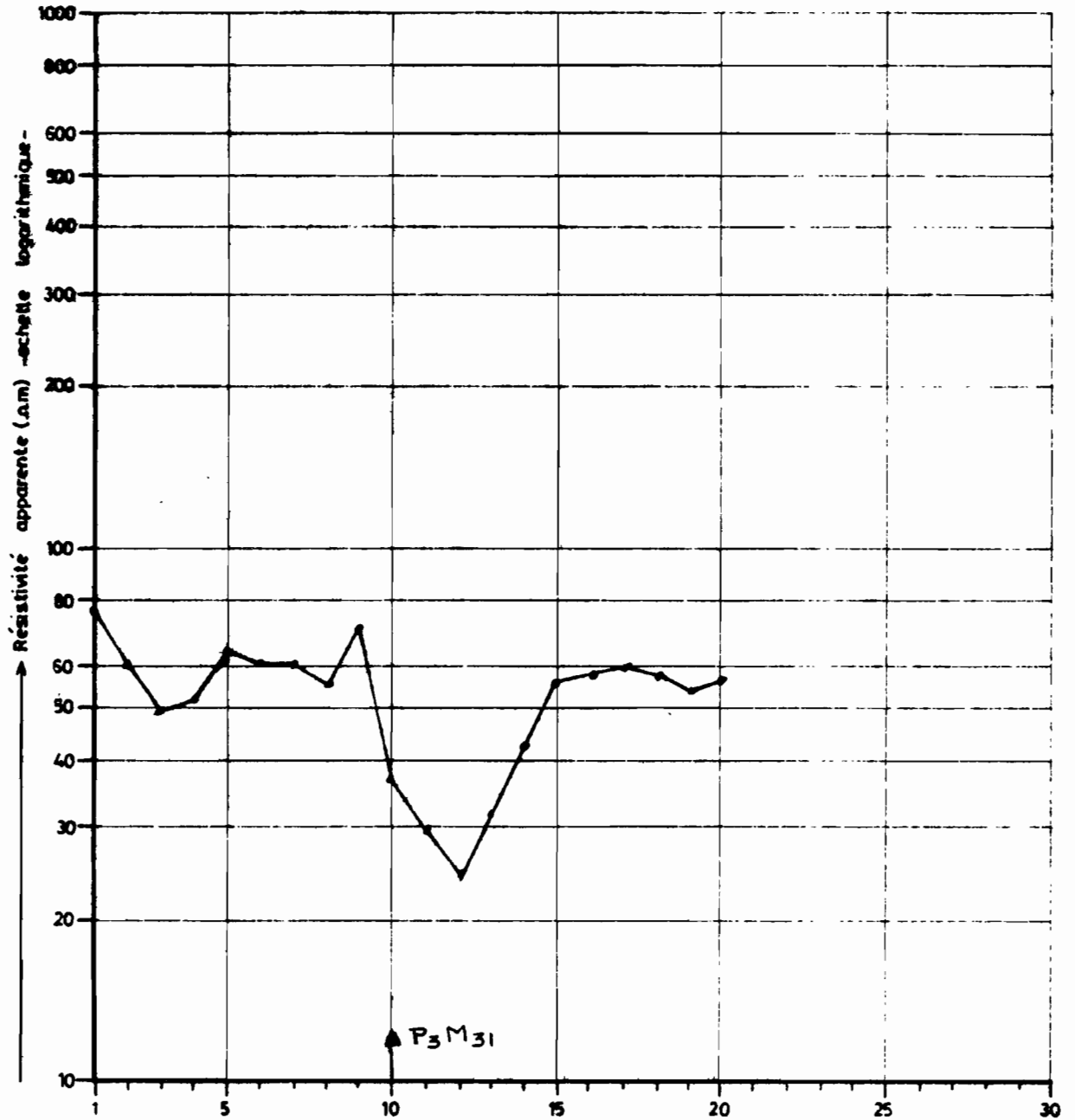
COUPE SCHEMATIQUE

Site 3 - Courbe du profil 3
Interprétation du S.E.

NE

SW

PROFIL DE RESISTIVITE APPARENTE

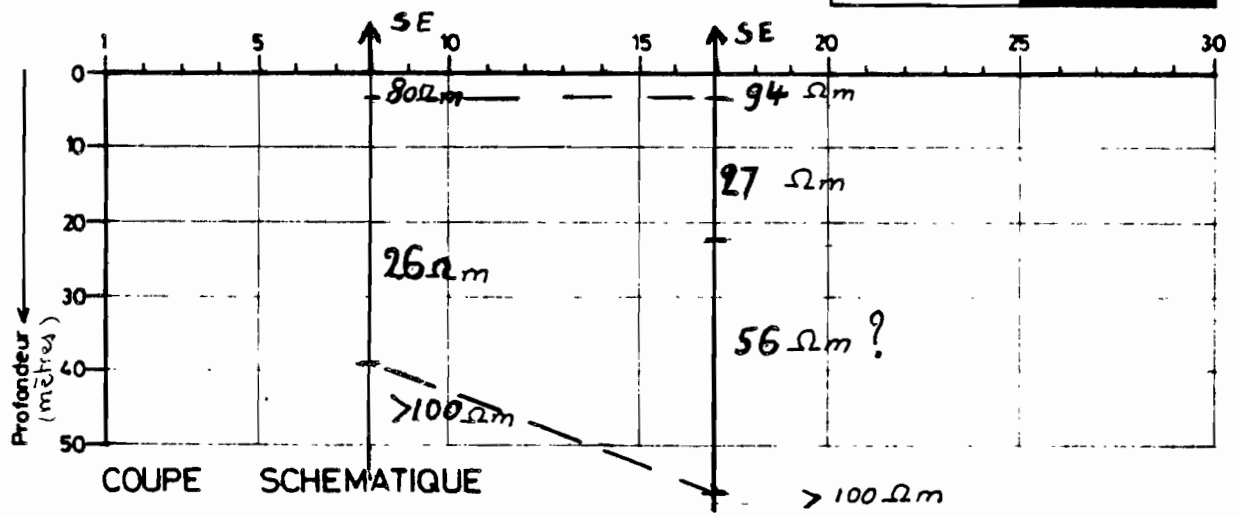
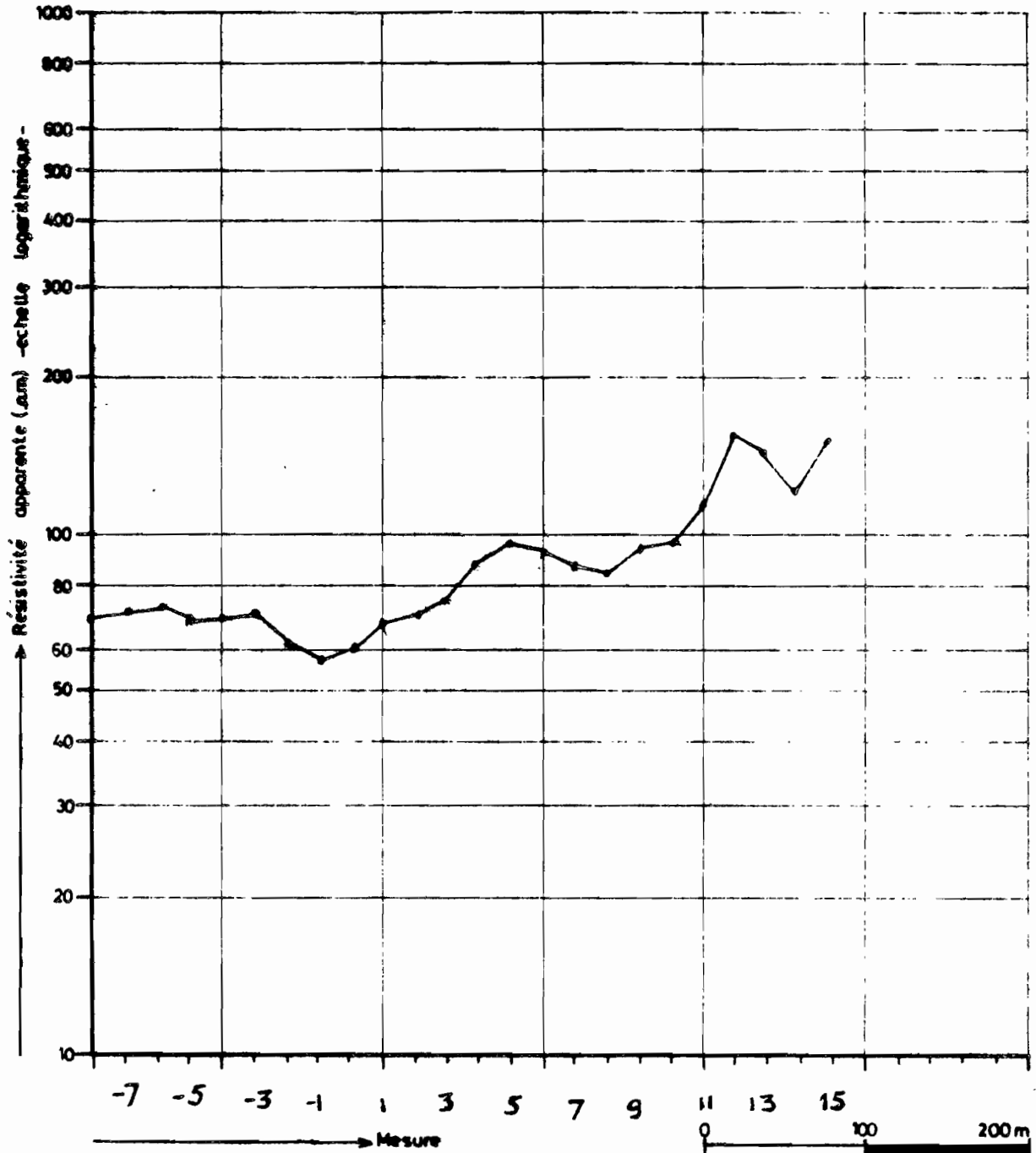


Site 3 - Courbe du profil 4
Interprétation du S.E.

NE

PROFIL DE RESISTIVITE APPARENTE

SW

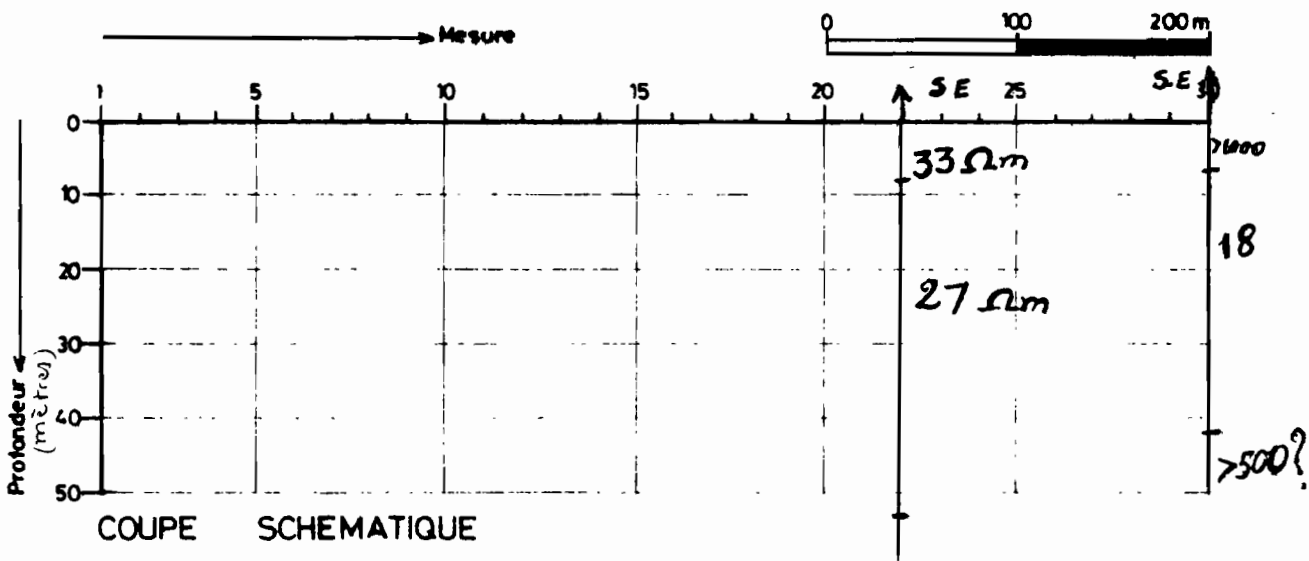
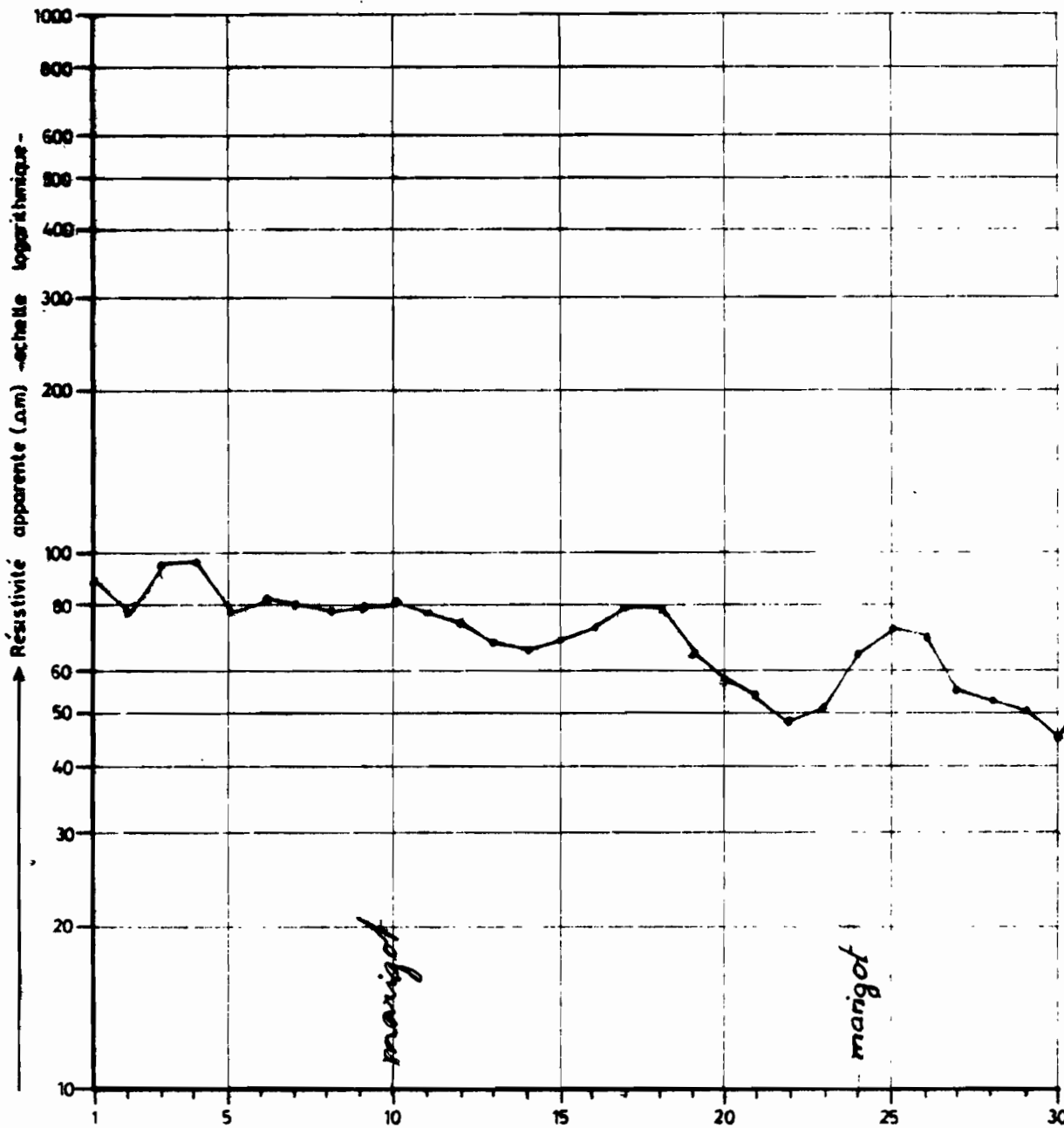


Site 4 - Courbe du profil 1
Interprétation du S.E.

E

PROFIL DE RESISTIVITE APPARENTE

W



Site 5 - Courbe du profil 1
Interprétation du S.E.

LISTE DES FIGURES

<u>N°</u>	<u>Titre</u>
1	Mouvements de l'air.
2	Zones climatiques de la Haute-Volta.
3	Le craton ouest-africain.
4	Les unités birrimiennes de type I (Gaoua-Poura, Houndé, Yako, Haute-Comoe)
5	Les unités birrimiennes de type II (Djibo, Kaya-Goren, Bouroum-Yalogo, Youga-Tiébélé-Po).
6	Profil type de l'altération.
7	Progression de l'altération au niveau des fractures, zones préférentielles de l'altération.
8	Distribution des altérites sur socle granito-gneissique.
9	Distribution des altérites sur schistes birrimiens.
10	Modèle des interfluves.
11	Reconstitution de la surface topographique originelle.
12	Morphologie d'un marigot en fonction de la fracturation.
13	Evolution du lit d'un marigot.
14	Influence de la fracturation sur le tracé du réseau hydrographique.
15	Distribution de fréquence cumulée de productivité de puits pour différentes positions topographiques.
16	Les joints primaires du granite.
17	Exemple de relevé détaillé de la fracturation en zone granitique.
18	Mégaprismes et courants de convection dans le magma.
19	Rétraction vers le centre de la maille.
20	Eclatement en étoile à 3 branches en milieu isotrope.
21	Raccordement de deux branches.

- 22 - Joints de relais.
- 23 - Couloir entre fractures parallèles rapprochées.
- 24 - Raccordement de figures étoilées rapprochées.
- 25 - Joints horizontaux et joints courbes du granite.
- 26 - Fractures dans les plis à déformation de charnière.
- 27 - Fractures dans les plis à déformation de flanc.
- 28 - Déformation plane et axiale.
- 29 - Pli isopaque à coeur affecté par une schistosité.
- 30 - Portion de l'écorce terrestre montrant l'allure des déformations dans les divers niveaux structuraux.
- 31 - Allure théorique du front de décompression des roches en fonction de la morphologie et de la charge totale.
- 32 - Décroissance du débit spécifique avec la profondeur des forages sur roches cristallines.
- 33 - Epaisseur de la zone décomprimée établie d'après des données de forages.
- 34 - Structure schématisée d'un aquifère de fissures.
- 35 - L'onde électromagnétique.
- 36 - Le spectre électromagnétique.
- 37 - Radiance spectrale du corps noir à diverses températures.
- 38 - Radiance spectrale du corps noir à 6000°K (soleil) et 300°K (terre).
- 39 - Radiance spectrale du soleil.
- 40 - Les orbites Landsat.
- 41 - Enregistrement par balayage multispectral.
- 42 - Croquis de situation des scènes Landsat.
- 43 - Différents aspects du linéament sur l'image.
- 44 - Nuage de points sur l'écran du visualiseur.
- 45 - Projection d'un nuage de 9 points sur un axe.
- 46 - Positions possibles du nouvel axe de projection.
- 47 - Positionnement des forages.
- 48 - Dispositif utilisé en prospection électrique.

- 49 - Sondage électrique sur deux terrains horizontaux.
- 50 - Courbe du sondage électrique-2 terrains.
- 51 - Abaque d'interprétation du diagramme-2 terrains.
- 52 - Carte de résistivités.
- 53 - Implantation du traîné par rapport à la fracture présumée.
- 54 - Sondage électrique sur un socle granitique recouvert d'un manteau d'altération.
- 55 - Diagramme du S.E. sur socle granitique et son interprétation.
- 56 - Profil électrique au-dessus d'un corps conducteur infiniment allongé.
- 57 - Variations des précipitations et de l'E.T.P.
- 58 - Extrait de la carte géologique de Haute-Volta au 1/1.000.000.
- 59 - Plan de situation du forage de Balogo.
- 60 - Plan de situation du quartier de Goin.
- 61 - Maille polygonale à Zomerboangin.
- 62 - Plan de situation des ouvrages à Kolokomé.
- 63 - Plan de situation de Goin (Zéologin).
- 64 - Linéaments de l'image satellite au 1/100.000.
- 65 - Carte de linéament du canal A.
- 66 - Carte de linéament du canal B.
- 67 - Carte de fracturation des photos aériennes.
- 68 - Caractérisation statistique des populations de linéaments (pas de 10°) de l'image satellite.
- 69 - Caractérisation statistique de la fracturation de la photo aérienne (pas de 10°).
- 70 - Caractérisation statistique des linéaments du canal A (pas de 10°).
- 71 - Caractérisation statistique des linéaments du canal B.
- 72 - Rosace de distribution du nombre de discontinuités (fractures et filons) du massif de la Petite Suisse.
- 73 - Distribution des fractures et filons du massif de la Petite Suisse (Wayen).

- 74 - Phases de déformation cassante du massif de la Petite Suisse (Wayen).
- 75 - Esquisse géologique de la région de Pilimpikou au 1/125.000.
- 76 - Carte morpho-tectonique d'après l'image Landsat au 1/200.000.
- 77 - Esquisse hydrogéologique de Pilimpikou par photographies aériennes.
- 78 - Carte morpho-tectonique de Pilimpikou d'après l'image Landsat au 1/50.000.
- 79 - Schémas explicatifs de la non-correspondance entre linéaments et discontinuités structurales du socle.

LISTE DES TABLEAUX

<u>N°</u>	<u>Titre</u>
1	- Caractères des types de granites calco-alcalins.
2	- Essai de chronologie du Précambrien de Haute-Volta méridionale.
3	- Paramètres hydrologiques moyens des différents niveaux d'altération.
4	- Estimation de perméabilité et de porosité en milieu fissuré.
5	- Les différents capteurs de télédétection.
6	- Présentation des canaux.
7	- Mode de présentation des images.
8	- Liste des images utilisées.
9	- Usage du terme linéament dans l'interprétation des images satellites.
10	- Valeurs des résistivités vraies en socle de l'Afrique de l'Ouest.
11	- Fréquence de répartition des photo-fractures de la planche I.
12	- Comparaison des principales directions de fractures et de linéaments par différents documents d'analyse.
13	- Prospection électrique.
14	- Sites de forages d'essai.
15	- Résumé des résultats.

LISTE DES PLANCHES

- I - Carte de la fracturation et des linéaments du secteur de Tensobentenga au 1/50.000.
- II - Carte hydrogéologique de Pilimpikou au 1/20.000.

LISTE DES PHOTOS

- 1 - Vue à l'horizon de zones birrimiennes schisteuses (Haute-Volta).
- 2 - Paysage caractéristique du socle granitique en Haute-Volta (région de Koupéla-Tensobentenga).
- 3 - Paysage caractéristique des formations birrimiennes en Haute-Volta (Pilimpikou).
- 4 - Photographie aérienne au 1/50.000 en zone granitique (Côte d'Ivoire).
- 5 - Canal 5 de la scène 209-51 du 21 Mars 1976.
- 6 - Canal 7 de la scène 209-51 du 21 Mars 1976.
- 7 - Le linéament de la Volta Rouge.
- 8 - Le linéament de la Sirba.
- 9 - Morphologie des régions granitiques (Guyane Française).
- 10 - Morphologie des régions birrimiennes (Haute-Volta).
- 11 - Morphologie des régions granitiques (Haute-Volta).
- 12 - Fracturation du sommet nord du massif de la Petite Suisse (Wayen, Haute-Volta).

BIBLIOGRAPHIE

- ARCHAMBAULT J. (1960) - Les eaux souterraines de l'Afrique Occidentale. Ed. Berger-Levrault, Nancy.
- ASSOUMA (1982) - D.E.A. en préparation, Univ. d'Orléans.
- ATLAS DE HAUTE-VOLTA (1975) - Ed. Jeune Afrique, Paris.
- AUBOIN J., BROUSSE R., LEHMAN J.P. (1968) - Précis de Géologie, T. 1, Pétrologie, Coll. Dunod, 712 p.
- AUBERT J., DORIDOT M., RICK P. (1979) - La photographie aérienne oblique. Une technique légère appliquée à la géologie du Génie civil et aux études d'environnement. Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées n° 103.
- AVERY Th.E. (1977) - Interpretation of areal photographs. Ed. Library of Congress (U.S.A.).
- BARDINET C., MONGET J.M. (1978) - Lanchad. Télédétection et Géographie appliquée en zone sahélienne du Tchad. Coll. de l'E.N.S.J.F. de Paris n° 12.
- BARIOU R. (1978) - Manuel de télédétection. Ed. Sodipe S.A.
- BARRAUD J.P. (1960) - Reconnaissances hydrogéologiques en arènes granitiques par sondages électriques en moyenne Côte d'Ivoire. Publ. CIEH, 22 p.
- BASSOLE B.A. et DIARRA K. (1978) - Application des images Landsat à la cartographie topographique. Mém. Ingénieur, Ecole d'Ingénieurs, Bamako (Mali).
- BECKER F. (1978) - Physique fondamentale de la télédétection. Ecole d'été de physique spatiale. Strasbourg, 18 août-15 sept., 107p.
- BELIAR C. (1973) - Premiers résultats de l'étude des nappes phréatiques contenues dans les formations d'altération sur le pourtour du Lac Kossou. Univ. d'Abidjan, Fac. Sciences, 14 p.
- BELLICI R., GALLORI, PION J.C., FACIBENI P. (1976) - Etude géomorphologique des cercles de Boromo-Hounde (Haute-Volta). Ed. Géomap. 37 p. 13 fig.
- BENAMOUR A. (1975) - Essai sur le terrain de pompes à main. Mise au point d'un nouveau type de pompe. Comm. 8ème Réunion C.I.E.H. Ouagadougou, 8-15 déc. 1975, 8 p.
- BERGER J. et ENGALENC (1975) - Hydrogéologie et géophysique appliquées à la recherche d'eau souterraine dans les roches cristallines fracturées. Comm. 8ème Réunion C.I.E.H. Ouagadougou, 8-15 déc. 1975, p. 1-10.

- BESSELES (1977) - Géologie de l'Afrique. Le craton Ouest-africain. Mém. BRGM n° 88, 398 p., 114 fig., 26 tabl.
- BEURRIER M., BLES J.L., GROS Y., LOZES J., MAROT A. (1979) - Etude de la partie occidentale du massif granitique de Quintin. Pétrographie, Géochimie, Fracturation. Bull. BRGM, section I, n°4.
- BIZE J. (1966) - Applications d'observations géomorphologiques et hydrodynamiques à la prospection des nappes des terrains d'altération en Côte d'Ivoire et en Haute-Volta. Rapport BURGEAP, Paris, R413, 64p.
- BLES J.L., GROS Y. (1979) - Etude de la fracturation du granite de Bassiès (Pyrénées Ariégeoises). Etude structurale au sol et corrélations avec les résultats de la photo-interprétation et de l'analyse d'images. Rapport BRGM n° 79 SGN 140 GEO, 56 p., 23 fig.
- BLES J.L., FEUGA B. (1981) - La fracturation des roches. Ed. BRGM, coll. Manuels et Méthodes n° 1, 124 p., 97 fig.
- BOIRAT J.M. (1979) - Synthèse sur la répartition des gîtes de fluorine et de barytine dans le massif central à l'Est du sillon houiller. Mém. Ingénieur, Univ. d'Orléans, 37 p., 21 fig.
- BONIJOLY D. (1980) - Etude structurale et minéralisations d'une plate-forme carbonatée : le Quercy. Thèse 3ème cycle, Univ. d'Orléans, 220 p., 81 fig., 12 tabl.
- BOULET R. (1970) - La géomorphologie et les principaux types de sols en Haute-Volta septentrionale. Cah. Orstom, Série pédologie, Vol. XIII, n° 3.
- BOURGUET, VAILLEUX (1980) - Méthodologie de la recherche hydrogéologique en zone de socle cristallin. Comm. 25ème C.G.I. Paris, 12 p.
- BRION H., LACHAUD J.C. (1979) - Expérimentations de méthodes géophysiques à la recherche d'eau dans les roches cristallines fracturées. Bull. C.I.E.H. n° 37-38, Ouagadougou, p. 14-23.
- BRO M., HUBERT C. (1979) - Synthèse sur l'emploi des techniques géophysiques appliquées aux recherches d'eau dans les fractures au Mali. Bull. C.I.E.H. n° 37-38, Ouagadougou, p. 24-34.
- BROSSE J.M. (1975) - La télédétection en géologie structurale. Deux exemples : le massif granitique de Villefranche-de-Rouergue (Aveyron) et le système filonien de Vialas (Lozère). Massif Central, France. Thèse 3ème cycle, Univ. Orléans, 122 p., 46 fig., 3 tabl.
- BROSSE J.M. (1979) - Utilisation des images Landsat pour la cartographie géologique en zone sahélienne. Rapp. GDTA/CRT0, 21 p., 4 fig.
- CADILLAC H. (1979) - Télédétection et géologie. Essai d'utilisation des images Landsat dans les Pyrénées, le bassin de l'Ebre et la Catalogne. Thèse 3ème cycle, Univ. Paul Sabatier de Toulouse, Tome 1, 157 p., 82 fig., 7 tabl.

- CAGNIARD L. (1952) - La prospection géophysique des eaux souterraines. Cong. sur l'hydrologie des zones arides, UNESCO, Ankara, p. 184-190.
- CAMERLO J., FAHY J.C. (1979) - Premiers résultats obtenus en Côte d'Ivoire dans les recherches d'eau axées sur les fractures secondaires des roches grenues du socle. Bull. C.I.E.H. n° 37-38, Ouagadougou p. 31-33.
- CASTANY G., MARGAT J. (1977) - Dictionnaire français d'hydrogéologie, Ed. BRGM, 249 p.
- CAZABAT C. (1975) - Topologie erstienne de la France (premiers résultats). Bull. Soc. franç. de Photogrammétrie, n° 60.
- C.I.E.H.-BURGEAP (1972) - Etude comparative des avantages respectifs des puits et forages dans les régions à substratum cristallin d'Afrique de l'Ouest. Rapp. BURGEAP, 81 p.
- CHOUBERT B. (1957) - Essai sur la morphologie de la Guyane. Imp. Nat. Paris, 42 p., 6 fig., 5 tabl., 31 pl. photos.
- COMPAORE J.L. (1980) - Contribution à l'étude hydrogéologique des régions de socle de l'Afrique Occidentale. Essai de synthèse des connaissances relatives au territoire voltaïque. Mém. DEA, Univ. Dakar, n° 5, 71 p., 33 fig., 7 tabl.
- DAWIS S.N., DE VIEST R.J.M. (1966) - Hydrology. Ed. Wiley, 463 p.
- DERRUAU M. (1973) - Précis de géomorphologie. Ed. Masson, Paris, 436 p. 171 fig.
- DUCELLIER J. (1963) - Contribution à l'étude des formations cristallines et métamorphiques du Centre et du Nord de la Haute-Volta. Mém. BRGM n° 10, 320 p, 41 fig.
- DULICA C. (1978) - Principe et exemples d'application des techniques isotopiques en hydrogéologie. Bull. C.I.E.H. n° 35-36, Ouagadougou p. 28-42.
- DULICA C. (1979) - La recherche de l'eau souterraine dans les régions à substratum cristallin de l'Afrique de l'Ouest. Comm. C.I.E.H. au P.I.C.G. (Programme international de corrélation géologique). Ouagadougou. 5-7 févr. 1979.
- DULICA C. (1979) - Etat des connaissances hydrogéologiques en Haute-Volta. Rap. C.I.E.H. Ouagadougou, 75 p.
- DUPRAT A., SIMLER L., UNGEMACH P. () - Contribution de la prospection électrique à la recherche des caractéristiques hydrodynamiques d'un milieu aquifère. Terre et Eaux. Vol. XXIII, n° 62, p.23-32.
- DUTARTRE Ph. (1981) - Etude de la fracturation du granite de la Margeride (région de Saint-Alban-sur-Limagnole, Lozère). Géométrie, cinématique, densité des fractures. Thèse 3ème cycle, Paris VII, 215 p., 91 fig.

- ENGALENC M., SAWADOGO A.N. (1975) - Rôle de la fracturation dans la recherche des eaux souterraines dans les granites de l'Afrique Occidentale. Bull. C.I.E.H. n° 20, Ouagadougou, p. 2-7.
- ENGALENC M. (1978) - Méthodes d'étude et de recherches de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Ed. C.I.E.H. Géohydraulique Paris, 300 p.
- FAHY J.C. (1979) - Hydraulique villageoise en Côte d'Ivoire. Bull. C.I.E.H. n° 37-38 Ouagadougou, p. 1-13.
- FAILLAT J.P., SQUARCIONI P., HUBERT J.M. (1979) - Utilisation de la prospection électrique pour l'étude de la géologie et de l'hydrogéologie du bassin sédimentaire côtier aux environs d'Abidjan (forêt du Banco). Ann. Univ. d'Abidjan, série C (Science), T. XV, p.165-177.
- FAILLAT J.P. (1980) - Méthodes de prospection électrique. Essai du profil de résistivité en double ligne. Atelier Unicef, Eau et Assainissement, Ouagadougou, 8 p.
- FEUGA B., VAUBOURG P. (1980) - Principales méthodes de reconnaissance des milieux fissurés. Etat des connaissances. Rapp. BRGM n° 80 SGN 855 EAU, 86 p. 61 fig.
- FOHLEN D. (1981) - Hydraulique villageoise dans le département du Sahel (Haute-Volta). Rap. stage E.N.S.G. Nancy, 195 p. 65 fig.
- FOURCADE B. (1979) - Deux méthodes d'utilisation de la télédétection en géologie (cartographie automatique des éléments linéaires, stéréoscopie gravimétrique). Thèse de docteur-ingénieur, Bordeaux III, 231 p., 111 fig.
- FORKASIEWICZ J. (1964) - Etude du bassin versant de Korhogo. Premiers résultats de l'étude des fluctuations de la surface piézométrique.
- GAGNIERE G. (1972) - Inventaire des ressources en eaux souterraines des cercles de Kaya et Pissila (Haute-Volta). Rap. BRGM, 125 p.
- G.D.T.A. (1976) - Journées de télédétection. Paris.
- GAMSORE P.E. (1974) - Quelques précisions sur les granitoïdes de la région de Ouahigouya (Nord-Ouest de la Haute-Volta). Acad. Sciences Paris, T. 279, série D.
- GOGUEL J. (1965) - Traité de tectonique. Ed. Masson, Paris, 441 p.
- GUIRAUD R., LENCK P.P. (1975) - Sur l'intérêt hydrogéologique majeur des zones de failles dans le socle métamorphique et éruptif de l'Afrique Occidentale. Communication 8ème réunion C.I.E.H. Ouagadougou, 8-15 Déc. 1975, 9 p.
- GUIRAUD R. (1975) - Eléments pour une orientation nouvelle de la recherche des eaux souterraines dans les régions à substratum métamorphique et éruptif de l'Afrique Occidentale. Mém. A.I.H. vol. XI, p. 15-19.

- GUY M. (1969) - La détection à distance. Progrès récents de la photogéologie. Annales Mines, Fév. 1969, p. 29-72.
- HOTTIN G., OUEDRAOGO O.F. (1975) - Carte géologique à 1/1000.000 de la République de Haute-Volta. Ed. BRGM/DGM Ouagadougou, Haute-Volta.
- HURAUULT J. (1967) - L'érosion régressive dans les zones tropicales humides et la genèse des inselbergs granitiques. Ed. de photo-interprétation, Doc. IGN n° 23, 63 p., 30 pl. photos.
- KIKIETTA A. (1978) - Contribution à l'étude hydrogéologique des massifs granitiques et cristallins basiques en Afrique intertropicale. L'hydrogéologie du bassin versant de la Bougouriba (Haute-Volta). Thèse 3ème cycle, I.N.P. de Lorraine, Univ. Nancy, 208 p.
- KOUDA M. (1981) - Analyse synchronique et diachronique de l'évolution de la végétation en zone semi-aride (Haute-Volta) par télédétection multispectrale. Thèse de docteur-ingénieur, Univ. P. Sabatier de Toulouse, 134 p., 52 fig.
- LARSSON I. (1963) - Tectonic and morphologic studies in Precambrien rocks at groundwater prospecting in South Sweden. Publ. by Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar, Vol. 85, p. 320-340.
- LARSSON I. (1966) - Groundwater in Precambrien rocks in Southern Sweden. Proceedings of the I.S.H. Stockholm, p. 23-41.
- LARSSON I. (1967) - Anisotropy in Precambrien rocks and post-cristalline deformation models. Publ. by the Royal University of Lund Sweden Dept. of Geography, p. 237-246.
- LARSSON I. (1972) - Groundwater in granite rocks and tectonic models. Publ. by Nordic Hydrology n° 3, p. 111-129.
- LE JONCOURT M., PHILLIPART A. (1981) - Travaux d'hydraulique villageoise au Togo. Rap. BRGM n° 81 AGE 002, 69 p., 15 fig.
- LELONG F. (1966) - Régime des nappes phréatiques contenues dans les formations d'altération tropicale. Conséquence pour la pédogenèse. Mém. Sc. Terre, T. XI, n° 2, p. 201-244, 7 fig.
- LELONG F., LEMOINE J. (1968) - Les nappes phréatiques des arènes et des altérations argileuses. Leur importance en zone intertropicale. Les difficultés de leur exploitation. Bull. BRGM, série II, n° 2, p. 41-52.
- LEMOINE J. (1966) - La mise en valeur des eaux souterraines en Haute-Volta et l'organisation de la recherche. Rap. Nations -Unies, Avril 1966.
- LENCK P.P. (1977) - Données nouvelles sur l'hydrogéologie des régions à substratum métamorphique ou éruptif. Enseignements tirés de la réalisation de 900 forages en Côte d'Ivoire. Comm. Acad. Sciences, Paris, T. 285, série D., p. 497-500.

- LOBJOIT M. (1976) - Utilisation combinée des images de satellite et des données géophysiques en géologie. Thèse docteur-ingénieur, Univ. P. et M. Curie, Paris.
- LOINTIER M., PIEYNS S. (1981) - Méthodologie de constitution d'une base données d'occupation du sol par télédétection. Doc. ORSTOM, n° 74, 91 p.
- MATHIEZ J.P., HUOT G. (1966) - Prospection géophysique et recherches d'eaux souterraines. Exemples d'application en Afrique Occidentale. Mém. C.I.E.H., 151 p.
- MATTAUER M. (1973) - Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre. Coll. Herman, Paris, 493 p.
- MILLON M. (1972) - La place des méthodes de télédétection et de géophysique dans le spectre électromagnétique. Rap. BRGM, SGN/MET, Juin 1972.
- N.A.S.A. (1972) - Landsat data users handbook. Doc. NASA (révisé régulièrement).
- OUDJIDA A. (1978) - La télédétection. Quelques applications en géologie structurale dans l'Atlas saharien algérien (région de Bou Saada, Djelfa et Laghouat). Thèse docteur-ingénieur, Paris VI.
- PERISSET M.C. (1980) - Prospection thermique de subsurface. Application à l'archéologie. Thèse docteur-ingénieur, Univ. Paris VI, 95 p. 37 fig.
- PION J.C. (1979) - L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale sèche. Etude de quelques toposéquences en Haute-Volta. Thèse doctorat d'Etat, Univ. L. Pasteur, Strasbourg, 197 p. 55 fig., 54 tabl.
- PIRARD F. (1965) - Reconnaissance hydrogéologique des cercles de Bousse et Ouagadougou. Mém. C.I.E.H., Août 1965.
- RAY R.G. (1960) - Aerial photographs in geologic interpretation and mapping. U.S.A. Government Printing Office, Washington, 222 p.
- RAZACK M. (1978) - Contribution à l'étude de la structure des aquifères en roches fissurées. Numérisation et analyse quantitative de la fracturation relevée sur clichés aériens. Thèse docteur-ingénieur Univ. Sciences et Techniques du Languedoc, 58 p., 18 fig.
- SABINS F.F. (1978) - Remote Sensing. Principles and interpretation. Ed. Library of congress (USA).
- SAWADOGO A.N. (1975) - Hydrogéologie du bassin versant de la Haute Sissili (Haute-Volta). Thèse 3ème cycle, Univ. Grenoble.
- SAWADOGO A.N. (1978) - La géophysique appliquée à la recherche d'eau dans les formations cristallines de Haute-Volta. Bull. C.I.E.H. n° 35-36 Ouagadougou, P. 43-49.
- SCANVIC J.Y. (1980) - Les géologues et la télédétection. Où en sommes-nous ? Cahiers de l'OPIT.

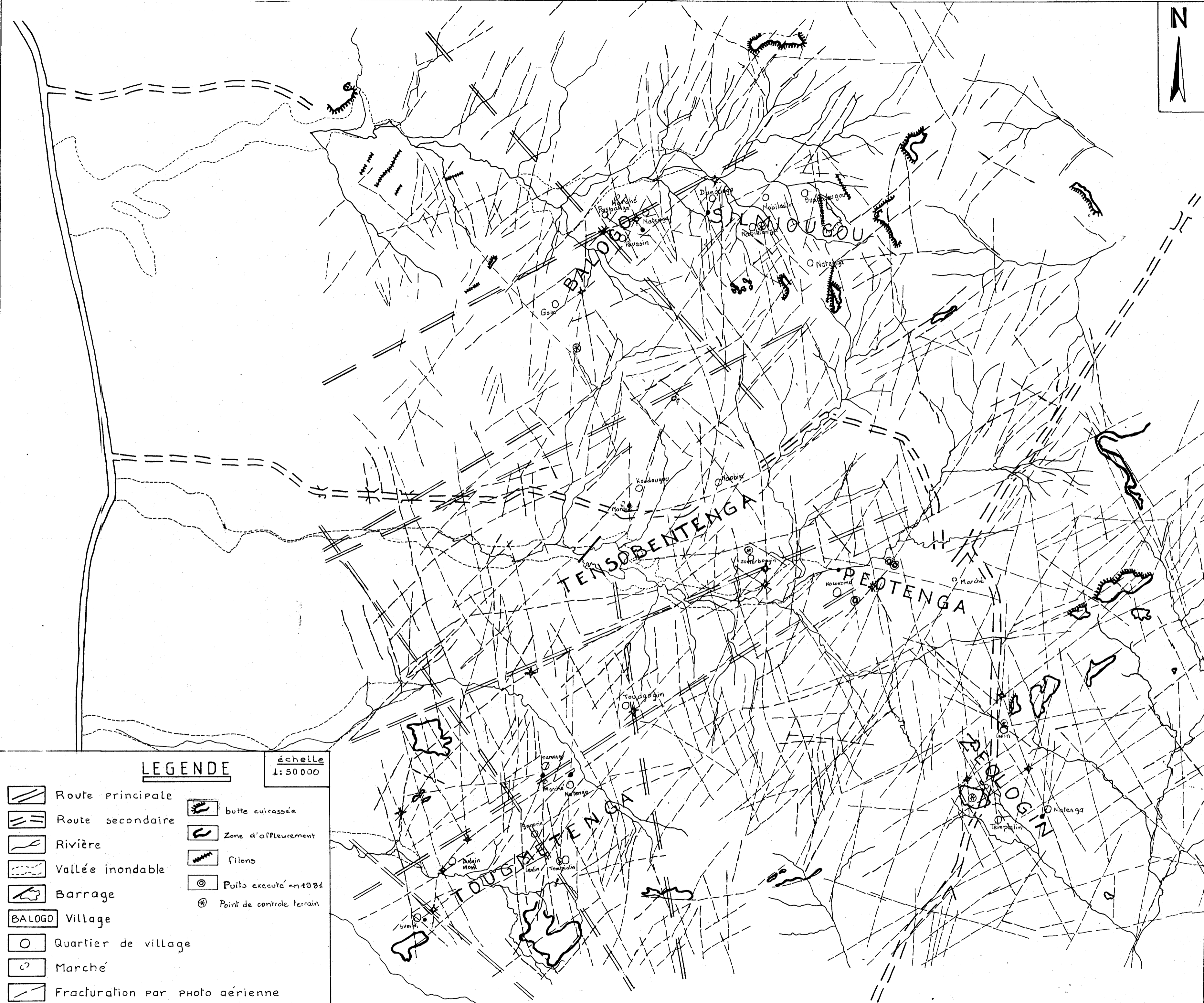
- SOCOHOU A. (1981) - Interprétation structurale et géologique des images Landsat : deux zones-tests en République Populaire du Bénin. Rapport CRTO, Mars 1981.
- SOLAGES S. (1979) - Résultats de la première campagne de forages exécutés au marteau fond de trou au Sénégal. Bull. C.I.E.H. n° 37-38 Ouagadougou, p. 25-35.
- SOURISSEAU B. (1981) - Hydraulique villageoise dans le département du Sahel (Haute-Volta). Rap. BRGM n° 81 AGE 039, 91 p., 23 fig.
- STRANDBERG C.H. (1967) - Aerial discovery manual. Ed. John Wiley and Sons. London, 217 p.
- TABBAGH A. (1977) - Deux nouvelles méthodes géophysiques de prospection archéologique. Thèse doctorat d'Etat, Paris VI, 137 p., 60 fig.
- TALBO H., VAUBOURG P. (1977) - Méthodes de recherches d'eau souterraine en milieu fissuré. Etat des connaissances. Rapport BRGM n° 77 SGN 358-HYD.
- TARDY Y. (1969) - Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse doctorat d'Etat, Mém. Service carte géologique Alsace-Lorraine n° 31, 199 p., 35 fig.
- THIERY D. (1981) - Analyse statistique des conditions de succès des forages réalisés en région de socle fissuré. Application au Togo. Rapp. BRGM n° 81 SGN 674 EAU, 76 p., 16 fig.
- TRAVAGLIA C. (1979) - Fracture systems interpretation from Landsat imagery for the cristalline rock area of Upper-Volta. Rapp. FAO, 18 p.
- VACHETTE M., CANTAGREL, J.M., GAMSORE, P.E. (1975) - Ages birrimiens déterminés par la méthode au strontium et à l'argon sur des formations cristallines et cristallogéologiques de la région de Ouahigouya (Nord-Ouest de la Haute-Volta). Publ. Acad. Sciences Paris, t. 280, série D.
- VIALON P., RUHLAND M., GROLIER J. (1976) - Eléments de tectonique analytique. Ed. Masson, Paris, 117 p.
- WAKSMAN G. (1977) - Application à l'hydrogéologie de l'image satellite traitée au 1/80.000. Rapp. C.G.G., Avril 1977.
- (1965) - Données critiques sur la campagne de puits villageois encadrée par la S.A.T.E.C. en Haute-Volta. Rapp. SATEC/BURGEAP.
- (1972) - Hydrogéologie de la région du Liptako-Gourma. Bull. C.I.E.H., n°9, Ouagadougou, p. 6-10.

(1975) - Notices explicatives des cartes de planification pour l'exploitation des eaux souterraines de l'Afrique sahélienne (productivité des ouvrages, coût moyen de captage et d'exploitation de l'eau souterraine, aptitude des eaux à l'irrigation). Rapp. B.R.G.M., 93 p.

(1977) - L'espace et les ressources terrestres. Perspective de la télédétection pour les pays en développement. Publ. National Academy of Science. Washington.


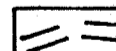

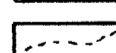
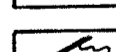
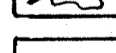
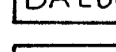
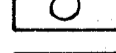
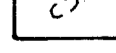
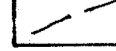
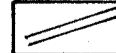


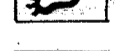


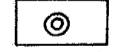
(1978) - Etudes des eaux souterraines dans la vallée de la Bougouriba (Haute-Volta). Conclusions et recommandations. Mém. A.V.V. Ouagadougou.

(1979) - Projet de développement des régions cotonnières en Côte d'Ivoire. Etude d'implantation et surveillance des travaux de 570 points d'eau. Rapp. BURGEAP.



LEGENDE

échelle
1:50000

-  Route principale
-  Route secondaire
-  Rivière
-  Vallée inondable
-  Barrage
-  Village
-  Quartier de village
-  Marché
-  Fracturation par PHOTO aérienne
-  Linéament par image satellite
-  Forage ou puits déjà effectué et productif
-  Forage ou puits PROPOSÉ
-  butte cuirassée
-  Zone d'affleurement
-  filons
-  Puits exécuté en 1981
-  Point de contrôle terrain

PL-I-Carte de La Fracturation et des Linéaments du secteur de Tensobentenga

R E S U M E

Mots-clés - Haute-Volta, hydrogéologie, socle altéré, fractures, photographie aérienne, télédétection, analyse structurale, études géophysiques.

-0-0-0-0-

Les formations aquifères dans les terrains granitiques et métamorphiques communément appelés socle, sont en Haute-Volta :

- les niveaux altérés surmontant la roche saine,
- les zones fracturées de la roche. Ce sont ces zones qui font l'objet de cette étude.

Le repérage de ces fractures en zone altérée est difficile à l'échelle de l'affleurement. C'est pourquoi l'emploi des méthodes indirectes, plus rapides, s'est développé.

- * La photographie aérienne est une de ces méthodes. Elle permet une cartographie rapide de la photo-fracturation.
- * La télédétection, et plus particulièrement l'étude de l'image MSS de Landsat, est une technique plus récente. Elle révèle des linéaments qui soulignent les différences de réflectance des objets de la surface terrestre, souvent en relation avec la tectonique. Elle offre l'avantage de couvrir une grande surface (33.000 km²).
- * Ces deux méthodes sont utilisées en parallèle aux études structurales sur affleurement et avec les mesures géophysiques au sol (prospection électrique).

Malgré l'énorme différence d'échelle, la corrélation des interprétations des photographies aériennes et des images satellite est satisfaisante. La comparaison avec l'analyse structurale permet de faire une sélection des directions fracturales hydrauliquement favorables. La relation avec les données de prospection électrique ne paraît pas très étroite mais le faible nombre de sites prospectés n'autorise pas une conclusion.