

COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES (C.I.E.H.)

METHODE D'ETUDE ET DE RECHERCHES DE

L'EAU SOUTERRAINE DES ROCHES CRISTALLINES

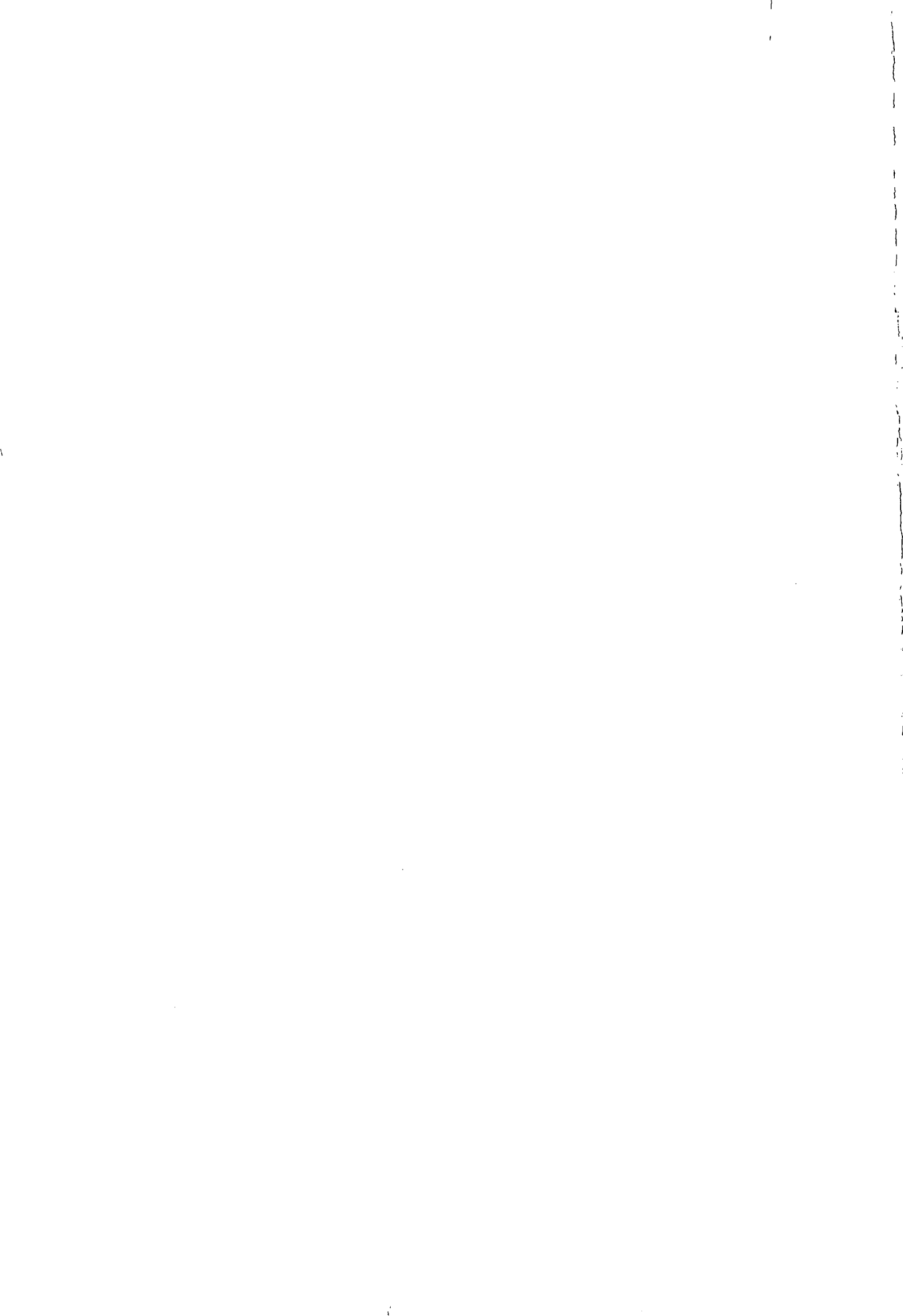
DE L'AFRIQUE DE L'OUEST (VOLUME 2)



GEOHYDRAULIQUE

824 AFW 79
3848

Août 1979



COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES

(C. I. E. H.)

METHODE D'ETUDE ET DE RECHERCHE DE

L'EAU SOUTERRAINE DES ROCHES CRISTALLINES

DE L'AFRIQUE DE L'OUEST

TRAVAUX COMPLEMENTAIRES SUR LE MILIEU FISSURE

(DEUXIEME PHASE)

PAR M. ENGALENC

EN COLLABORATION AVEC

J.C. GRILLOT

J.C. LACHAUD

AVEC LE CONCOURS FINANCIER

DU FONDS D'AIDE ET DE COOPERATION

3848
824 AFW79

AOÛT 1979

GEOHYDRAULIQUE - LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE

10 RUE EUGENE RENAULT - 94 700 MAISONS - ALFORT FRANCE

1. 项目背景与意义

随着全球经济的快速发展和科技的不断进步，企业面临着日益激烈的市场竞争和不断变化的客户需求。为了在竞争中脱颖而出，企业需要不断创新，提升产品和服务的质量。本项目旨在通过引入先进的管理理念和先进的技术手段，优化企业的运营流程，提高生产效率和客户满意度，从而实现企业的可持续发展。

2. 项目目标与范围

本项目的总体目标是：通过实施一系列管理优化和技术创新措施，使企业的运营效率提升20%，客户满意度提高15%，并在未来三年内实现市场占有率的显著增长。项目范围包括：生产流程优化、供应链管理改进、客户服务体系完善以及信息化建设。

3. 项目实施计划

项目将分为三个阶段实施：第一阶段（1-3个月）完成需求调研和方案设计；第二阶段（4-6个月）进行试点实施和效果评估；第三阶段（7-9个月）全面推广实施和持续优化。项目团队将定期召开进度会议，确保各项任务按时完成。

4. 项目预算与资源需求

项目总预算为人民币500万元，主要用于设备采购、软件开发、人员培训和咨询服务。项目所需资源包括：项目经理1名、技术专家2名、财务人员1名、市场人员1名。项目启动后将立即开展相关工作。

La "Méthode d'étude et de recherche de l'Eau Souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest" est une étude qui a été confiée par le Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques à la Société Géohydraulique, aux termes d'une convention, en date du 17 Mars 1977, financée sur crédits du Fonds d'Aide et de Coopération français (F.A.C.),

Monsieur GAGARA étant le Secrétaire Général du CIEH,
Messieurs A. BENAMOUR et Ch. DILUCA étant les responsables du Service Hydrogéologique du CIEH.

Cette étude a été réalisée,

sous la direction de J. BERGER, Ingénieur Civil des Mines, Directeur Général Adjoint de Géohydraulique,

par M. ENGALENC, hydrogéologue, Docteur ès Sciences, en collaboration avec :

Mademoiselle M. BRION pour la géophysique
Messieurs JC. GRILLOT pour la structure et l'hydraulique du milieu
JC. LACHAUD pour la géophysique

Nous remercions :

- . les responsables de l'Autorité des Aménagements des Vallées des Volta (A.V.V. Ouagadougou) pour nous avoir permis d'étudier le site de MOGTEDO,
- . Monsieur NAGONDO MOHAMED EL HADJ chef du village de ZIGLA KOULPELE, et la population du village pour leur accueil,
- . Monsieur le sous-préfet de GARANGO

Les travaux de forage ont été réalisés :

- . sur le site de MOGTEDO par l'A.V.V.
- . sur le site de ZIGLA par AFORCOM

Les essais de pompage sur les deux sites ont été exécutés avec le matériel et l'équipe technique du C.I.E.H.

PLAN DE L'ETUDE

. Introduction	5
. Résumé de l'étude	6
. Nouvelles précisions sur la méthode d'étude et de recherche de l'Eau Souterraine des Roches Cristallines de l'Afrique de l'Ouest	13
. Complément bibliographique	49
. <u>Annexe I</u> :	
Structure des aquifères fissurés en milieu cristallin (socle granitique). Etude microstructurale et photogéo- logique des sites de MOGTEDO et de ZIGLA	53
. <u>Annexe II</u> :	
Les stations expérimentales de ZIGLA KOULPELE et de MOGTEDO - Essais de pompage	91
. <u>Annexe III</u> :	
Etude géophysique par méthodes électriques des sites de MOGTEDO et de ZIGLA KOULPELE	131

INTRODUCTION

En Février 1978, le C.I.E.H. a publié un ouvrage intitulé "Méthode d'Etude et de Recherche de l'Eau Souterraine des Roches Cristallines de l'Afrique de l'Ouest".

Le but de cette deuxième phase d'étude était de réaliser sur le terrain, des travaux permettant de préciser les différents termes de la méthode, déjà définis dans la première phase des études.

La complexité de certaines techniques ne doit pas faire oublier que l'objectif des recherches et de la méthodologie proposée est l'obtention d'un débit pérenne.

"En général, la recherche du débit maximum sur un site ne représente pas l'objectif premier d'une campagne d'approvisionnement en eau. En effet :

- . l'utilisation des pompes manuelles ne dépasse pas 600 à 700 l/h
- . l'un des critères de succès d'une campagne de travaux est essentiellement l'utilisation des ouvrages ; or, ceux-ci ne sont pleinement utilisés que s'ils sont situés à proximité des habitations. Ceci implique une implantation qui n'est pas toujours la meilleure sur le territoire d'un village. Et bien souvent les hydrogéologues sont obligés de tenir compte de ces contraintes". (M.G. GAGARA).

Ces contraintes supplémentaires demandent une méthode de recherche encore plus précise. La difficulté de la recherche ne doit pas s'accompagner d'études de plus en plus complexes.

Ce rapport n'est pas un simple compte-rendu des travaux réalisés sur les deux sites expérimentaux ; chaque opération de travaux a fait l'objet d'une recherche orientée vers la méthodologie, la critique et la compréhension de la structure du milieu fissuré.

Les mesures et les observations de terrain accompagnent le texte car elles sont à l'origine des conclusions. Elles sont présentées en annexe ; mais chaque annexe est une étude riche en enseignements.

RESUME DE L'ETUDE

Sur deux sites choisis comme représentatifs du milieu cristallin fissuré, les opérations d'implantation de forages ont été effectuées en s'appuyant sur une étude de photo-interprétation, une analyse microstructurale, une prospection par la géophysique, et la réalisation et l'interprétation d'essais de pompage.

Ce programme classique sert de support à l'expérimentation et à la mise au point des techniques de la méthode.

Pour des raisons budgétaires, l'expérimentation s'est effectuée à partir de forages d'exploitation existants transformés en stations d'essais par l'adjonction de piézomètres. Les stations sont situées en Haute-Volta à MOGTEDO RAPADAMA V6 et à ZIGLA KOULPELE (région de GARANGO-TENKODOGO) (figure 1).

La photo-interprétation, l'analyse structurale du terrain et les mesures de géophysique se sont déroulées simultanément avec, au départ, le minimum de directives afin de ne pas influencer les observations.

La confrontation des résultats permet d'estimer l'apport de chaque technique ; il s'avère que ces techniques sont complémentaires.

La structure du système aquifère peut être définie avec précision, ce qui permet une compréhension plus réaliste des phénomènes hydrodynamiques étudiés avec des essais de pompages et de sélectionner les méthodes de géophysiques les mieux adaptées au milieu.

Des observations relatives au choix et à l'application des procédés amènent des progrès sensibles dans l'utilisation de la géophysique.

Le site de MOGTEDO est caractéristique du milieu fissuré vrai très anisotrope ; celui de ZIGLA illustre un milieu multi-fissuré associé avec un milieu poreux saturé.

D'une façon générale, la porosité utile des roches cristallines fracturées est faible ; les réserves utiles sont nettement plus élevées dans les formations poreuses (altération - alluvion - sable). L'hydrogéologue doit rechercher le système fracture - altération qui associe un milieu drainant à un milieu capacitif. Ce n'est qu'à cette condition que l'on peut obtenir un débit exploitable et pérenne.

L'existence d'un horizon altéré saturé est un bon facteur de réussite. Cette condition est souvent réalisée dans les zones humides. L'isohyète 1000 mm est une limite caractéristique. Au-delà de 1000 mm de pluie, la réalimentation des aquifères ne pose pas de problèmes.

Dans les zones où la roche affleure, ainsi que dans celles où l'altération est dénoyée, la faiblesse des réserves entraîne celle des débits et des pourcentages de réussite.

Dans une première approche, les potentialités hydrauliques sont définies par la pluviométrie de la région, les conditions morphologiques locales et l'existence de milieux poreux saturés (sur plus de 5 m et moins de 30 m).

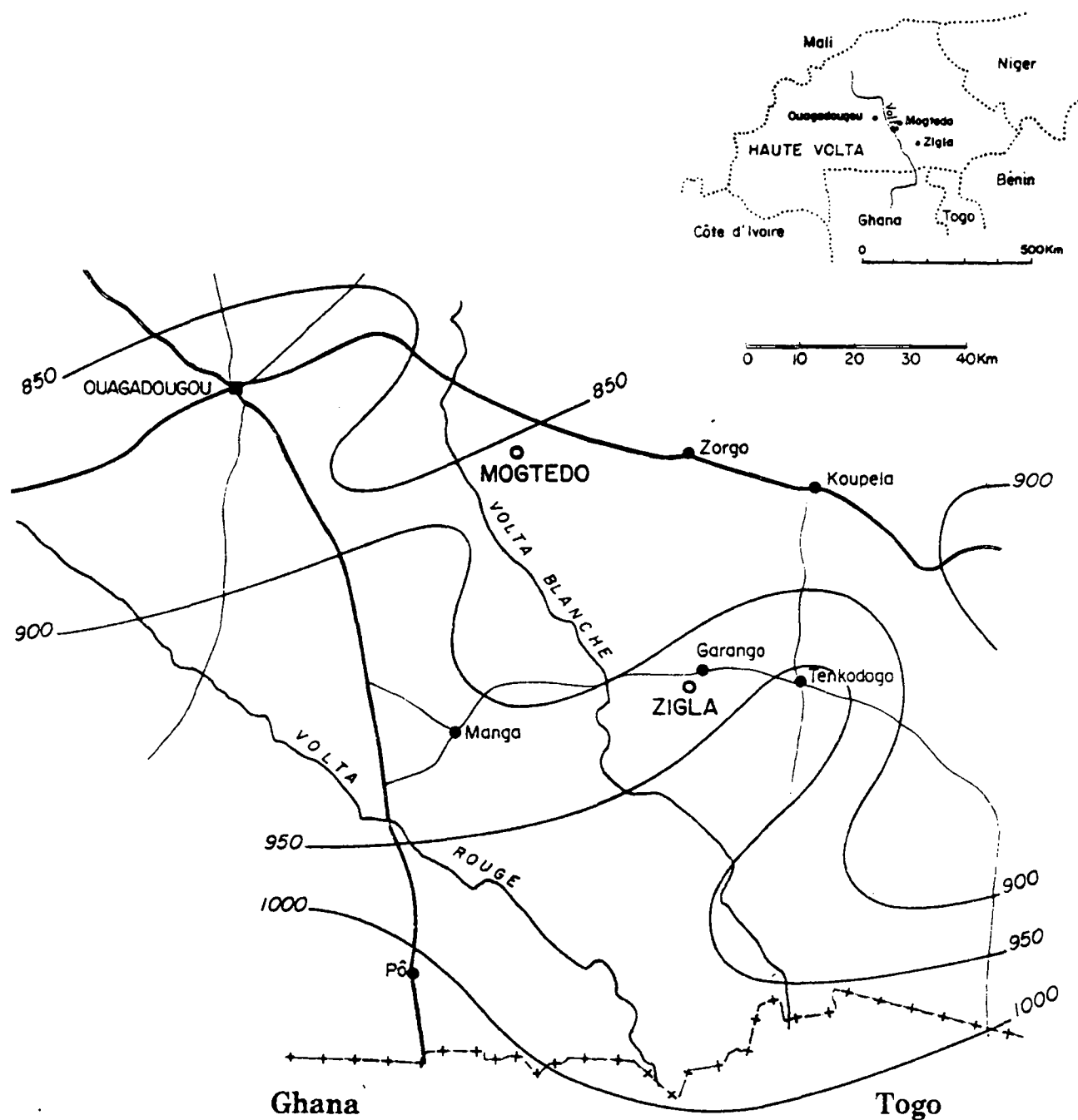
Ces conditions entraînent une zonation géographique et une inégale répartition des ressources.

Figure 1

Situation des sites expérimentaux de Mogtedo et de Zigla-Kouplélé

Haute Volta

Isohyètes moyennes en mm 1961-1970



- . Un forage doit être implanté sur une fracture choisie essentiellement pour son action drainante ; elle doit être le collecteur principal des différents réseaux de fissures qui sont autant de drains secondaires de la masse altérée située au-dessus.

La photo-interprétation reste le moyen le plus rapide et le plus précis pour le lever et le choix des fractures. Mais les accidents observés ont des longueurs supérieures à l'hectomètre. La densité de fracturation, la direction des fractures ouvertes et la taille des mailles de fractures, qui sont des paramètres intervenant à l'échelle du captage, ne peuvent être obtenus que par l'analyse des affleurements sur le terrain.

Le lever de terrain s'avère le complément indispensable pour la bonne utilisation des cartes de fracturation. Nous conseillons cette technique en particulier pour un programme régional. Elle devient nécessaire pour le choix difficile de la fracture productrice dans les zones déshéritées dépourvues d'altération.

Lorsque la photo-interprétation n'est pas possible, l'analyse d'un affleurement oriente la géomorphologie et la géophysique pour l'étude d'un site.

- . Après quelques mises au point, la géophysique par méthodes électriques s'avère une technique de confiance pour les hydrogéologues oeuvrant dans le cristallin.

La recherche directe des fractures dans la roche est aléatoire. Elle est facilitée par la détection des poches altérées. La prospection par géophysique doit être guidée par la fracturation. Au niveau de l'interprétation, une bonne connaissance du milieu naturel évite des conclusions erronées.

A l'échelle régionale, exécuter des profils de résistivités à deux longueurs de ligne, perpendiculaires à la direction de fracturation.

Les longueurs de ligne, et les anomalies sont précisées par des sondages électriques.

Pour une étude locale détaillée, l'emploi de sondages avec le dispositif carré, de préférence alignés sur des profils, détermine les directions de fissuration ouvertes, la densité de fissuration et l'évolution de la fissuration en profondeur et latéralement.

- . A l'intérieur d'un système multifissuré, le milieu peut se comporter comme un aquifère homogène : le positionnement du forage demande moins de précision que pour une implantation sur une fracture ou sur un filon. Un site, jugé intéressant après étude, ne doit pas être abandonné si un forage n'est pas productif ; déplacer la foreuse de quelques mètres.

L'estimation des débits par le procédé "Air-lift" en cours de forage, n'est pas satisfaisante et peut entraîner un surcreusement inutile de l'ouvrage.

L'évaluation du débit d'exploitation doit s'accompagner d'un essai d'au moins 8 heures de pompage, afin de connaître l'évolution des niveaux d'eau dans le temps.

- . Certaines techniques ou recommandations peuvent paraître surabondantes pour les chercheurs de la zone humide : la convergence de facteurs favorables (altération épaisse et saturée, niveau d'eau peu profond, pluviométrie abondante, marigot pérenne) entraîne des débits et un pourcentage de réussite élevés. L'étude se résume à la recherche des fractures sur photographies aériennes. Certaines déceptions dans les régions où les granites sont sub-affleurants pourraient être effacées avec l'emploi des techniques régulièrement utilisées dans les régions difficiles.

Les exemples du Ghana ou de la Côte d'Ivoire ne sont pas nécessairement des références pour les pays de la zone sèche.

**NOUVELLES PRECISIONS SUR LA METHODE
D'ETUDE ET DE RECHERCHE DE L'EAU
SOUTERRAINE DES ROCHES CRISTALLINES
DE L'AFRIQUE DE L'OUEST**

NOUVELLES PRECISIONS SUR LA METHODE D'ETUDE ET DE RECHERCHE
DE L'EAU SOUTERRAINE DES ROCHES CRISTALLINES DE L'AFRIQUE DE L'OUEST

1. APPROCHE PRELIMINAIRE POUR UNE ETUDE REGIONALE	
RECHARGE DES AQUIFERES - RESERVE UTILE	15
2. PHOTO-INTERPRETATION - CARTES DE FRACTURATION	
ANALYSE DE TERRAIN	17
2.1 Le fond des cartes de fracturation	17
2.2 Le levé des cartes de fracturation	17
2.3 Que représentent les cartes d'alignements morpho-structuraux ?	22
2.4 Paramètres relevés sur les cartes de fracturation .	22
2.5 Paramètres révélés par l'analyse du terrain	23
2.6 Influence de l'échelle d'observation	24
2.7 Utilisation des cartes de fracturation	24
2.8 Critères pour le choix d'une fracture productrice .	25
3. L'AQUIFERE EN MILIEU CRISTALLIN	27
3.1 Le système aquifère en milieu cristallin	27
3.2 Importance de la fonction capacitive	27
3.3 Importance de la fonction conductrice	29
3.4 Diffusivité hydraulique et réactions de l'aquifère	29
3.5 Remarques sur les essais de pompage	31
3.6 Détermination du débit d'exploitation d'un forage .	31
3.7 Remarques sur l'exploitation des aquifères de fissures	32
4. L'UTILISATION DE LA GEOPHYSIQUE PAR METHODES ELECTRIQUES POUR LA RECHERCHE D'EAU DANS LES ROCHES CRISTALLINES FRACTUREES	35
4.1 L'orientation des études géophysiques	35
4.2 Analyse de cas particuliers	36
4.3 Analyse d'une carte de résistivité	37
4.4 Avantages et inconvénients des différents dispositifs	39
4.5 Méthodologie pratique	41

5. ANALYSES ISOTOPIQUES	43
5.1 Généralités	43
5.2 Expérimentation sur les sites de Mogtédo et de Zigla	43
6. ANALYSE STATISTIQUE SUR LA RELATION ENTRE LES CARACTERISTIQUES DES FORAGES ET LE TYPE DE FRACTURE ...	45
6.1 Généralités	45
6.2 Principaux résultats	45
7. RESUME DES RESULTATS ACQUIS LORS DES TRAVAUX SUR LES SITES EXPERIMENTAUX	47

Dans les roches cristallines, la maîtrise des ressources en eaux souterraines ne peut avoir lieu qu'avec l'emploi généralisé des forages. Les meilleurs débits, et leur pérennité, sont assurés par des forages implantés sur une fracture. Mais la réserve utile* du milieu fissuré est toujours faible, sauf rares exceptions. Le débit moyen d'exploitation des roches exclusivement fissurées, est souvent proche de celui d'une pompe manuelle. Dans la majorité des cas, la réserve est contenue dans l'altération. C'est le couple altération-fracture qui doit être le but de la recherche hydrogéologique.

La réserve contenue dans un milieu de bonne porosité, mais de faible perméabilité (altération), doit être drainée par un système fissuré de faible porosité mais de bonne perméabilité.

Par suite, les régions recouvertes par un épais horizon altéré saturé en eau, ont de bonnes potentialités hydrauliques : ces régions couvrent la zone humide forestière et de savane.

Les régions, dont la couverture altérée est réduite, ou fait défaut, et où la surface de l'eau est profonde, sont défavorisées sauf conditions morphologiques locales. Elles se rencontrent dans la zone de savane, dans les régions Sahéliennes et sur les versants découpés de certains marigots.

1 - APPROCHE PRELIMINAIRE POUR UNE ETUDE REGIONALE - RECHARGE DES AQUIFERES - RESERVE UTILE.

A l'intérieur d'une unité géographique donnée, la réserve exploitable* est fonction de la réalimentation des aquifères. La recharge des aquifères dépend de la pluviométrie et des conditions morphologiques locales.

L'exemple de ZIGLA permet une approche de bilan hydrogéologique. Si un bilan peut être concevable à moyen terme, son estimation devient hasardeuse déjà à l'échelle de l'année. L'aquifère n'est pas infini ; au bout d'un an de pompage le rayon d'influence théorique est de l'ordre de 500 m, l'aire induite dépasse 3/4 de km² et sort des limites connues du système.

Lorsque l'aquifère de fissure est surmonté d'un niveau poreux saturé, on peut avoir une approche satisfaisante du bilan de l'eau. En moyenne, 1 km² d'altération recèle 20 000 à 50 000 m³ de réserve utile par mètre d'aquifère saturé, soit un débit continu de 55 à 140 m³/jour/km²/m.

Cette réserve est renouvelable par les pluies dans les conditions suivantes (Lelong, 1966) :

- . L'isohyète 400 mm marque la limite en deçà de laquelle l'alimentation des nappes par infiltration directe de la pluie n'est plus possible.
- . L'alimentation des nappes reste précaire tant que les pluies ne dépassent pas 800 mm par an (steppe et savane) ou 1200 mm (en zone forestière).

* réserve utile = réserve exploitable = volume d'eau d'un aquifère réellement exploitable.

- Une grande partie de l'eau infiltrée n'est pas utilisable pour la réserve renouvelable (recharge occulte). L'évapotranspiration différée augmente quand la pluviosité diminue. La recharge utile représente 34 % lorsque la pluie est de 1600 mm, 24 % pour P = 1200 mm et 7 % pour P = 800 mm (eau infiltrée alimentant réellement l'aquifère).

Le tableau ci-après montre que , dès que le bilan hydrique devient positif, la recharge utile est suffisante pour fournir des débits élevés. Les prélèvements par pompes manuelles sont insignifiants (6 000 m³/an en continu par ouvrage).

Pluviométrie en m		< 0,800	0,800	1,200	1,600
Recharge utile m ³ /km ²		0	7 % = 56 000	24 % = 288 000	34 % = 544 000
Remontée du N.S. en m dans l'altération	(1) 2 %	0	2,8	14,4	27,2
	5 %	0	1,1	5,7	10,8
Débit de la recharge m ³ /jour/km ²		0	155	800	1511

(1) Valeur de la porosité utile.

En zone de savane, la hauteur d'eau correspondant à la recharge n'est pas toujours suffisante pour éviter le dénoyage de l'aquifère poreux et l'exploitation optimale de la réserve utile demande l'implantation de plusieurs ouvrages à débits moyens plutôt qu'un seul forage à gros débit, à moins de trouver une fracture à grand rayon de drainage.

En zone humide, la réserve renouvelable est élevée à condition qu'il existe un réservoir suffisamment puissant pour l'emmagasiner. C'est possible lorsque l'altération est développée.

Dans les zones décapées, le réservoir fissuré ne peut recueillir que 50 000 à 100 000 m³/km². En zone humide décapée, une grande partie de l'eau destinée à la réserve doit ruisseler.

- Au-delà de 1000 mm de pluie, le problème de la réserve renouvelable ne se pose pas à condition qu'il existe un réservoir poreux.
- Au-delà de 1000 mm de pluie, l'excédent pluviométrique ne contribue plus à la recharge des réservoirs fissurés.
- Dans la pratique, l'isohyète 1000 mm limite une zone Sud avec de bons résultats et une zone Nord où les résultats sont de plus en plus mauvais au fur et à mesure que la pluviométrie diminue.

2 - PHOTO-INTERPRETATION - CARTES DE FRACTURATION - ANALYSE DE TERRAIN

En positionnant les forages au voisinage des fractures, on acquiert de bons résultats, tant dans l'accroissement des débits, que dans celui des pourcentages de réussite.

La photo-interprétation permet le levé rapide et précis, donc peu coûteux des réseaux de fractures.

Sur le terrain, les fractures ne sont visibles que dans les affleurements qui sont relativement rares en Afrique de l'Ouest. La photographie aérienne est l'instrument le plus précieux pour l'hydrogéologie des roches cristallines.

Dans cette étude, nous avons vérifié la validité des cartes de photo-fractures et le rôle hydrogéologique des fractures en effectuant un minutieux travail de terrain.

2.1 Le fond des cartes de fracturation

A l'aide des photographies aériennes on définit la position morphologique du site : bas-fond avec un marigot pérenne ou non, présence d'alluvions, versant décapé par l'érosion, plateau avec un manteau altéré, butte cuirassée souvent stérile, colline où le niveau de l'eau est profond.

On trace le réseau hydrographique comme repère topographique et comme indicateur des grands axes drainants.

On repère au site, quand c'est possible, les zones altérées (réserve utile). Puis, lever un fond structural et lithologique très schématique (allongement des structures - roches massives-foliées schistes - filons) et porter les affleurements. Enfin, on relève le canevas des fractures.

2.2 Le levé des cartes de fracturation (4 cartes - fig. 2, 3, 4, 5)

On relève, a priori, tous les alignements morfo-structuraux décelés sur les documents aériens par la végétation, le relief, le micro-relief, les variations de teinte du sol, le tracé des marigots et des anomalies géologiques. Végétation, altération, coloration des sols, fractures ont un point commun : l'humidité. Le surplus d'humidité caractérise les zones plus fissurées.

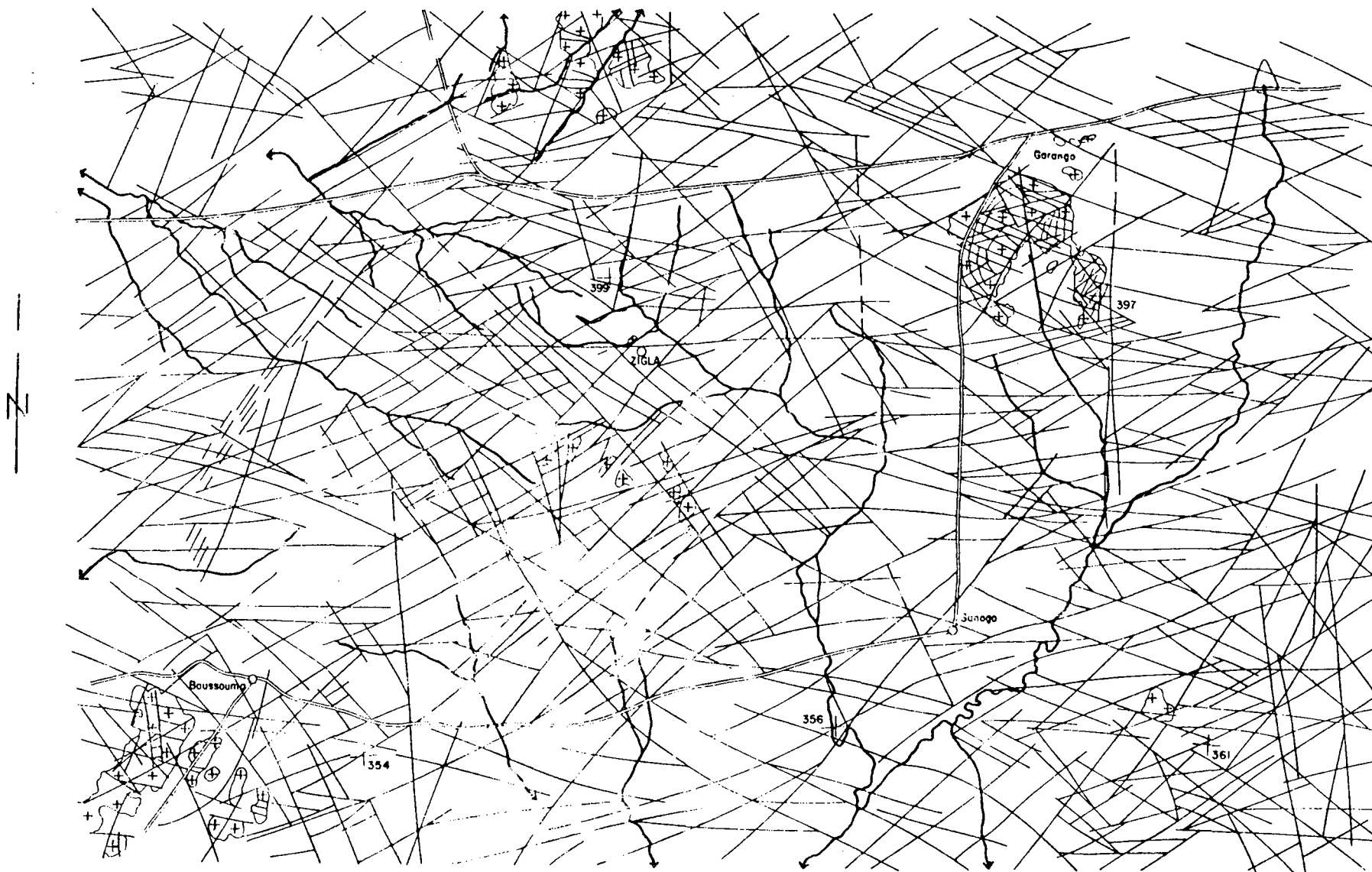
Les affleurements visibles sur la photo orientent la recherche dans certaines directions d'allongement.

Contrairement à ce que l'on pense couramment, la couverture altérée, herbacée ou arborée n'est pas d'une grande gêne. Les difficultés existent dans les régions cultivées ou urbanisées et dans les zones couvertes de sable, quoique certains alignements de cordons dunaires ont une origine tectonique.

Les cartes montrent qu'il existe des fractures partout. Elles n'ont pas toujours un rôle hydraulique positif mais au stade du levé on ne peut pas dire qu'il existe des "régions fracturées". Cette notion évoque une échelle géologique, et laisse supposer qu'entre ces "régions fracturées" il existe de grands vides stériles.

CARTE DE FRACTURATION DE LA REGION DE ZIGLA KOULPELE

H^{ie} Volta



C.I.E.H. GEOHYDRAULIQUE

M. ENGALENC 1978



Route-Piste









Fractures

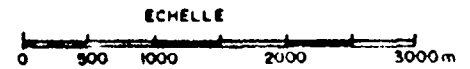
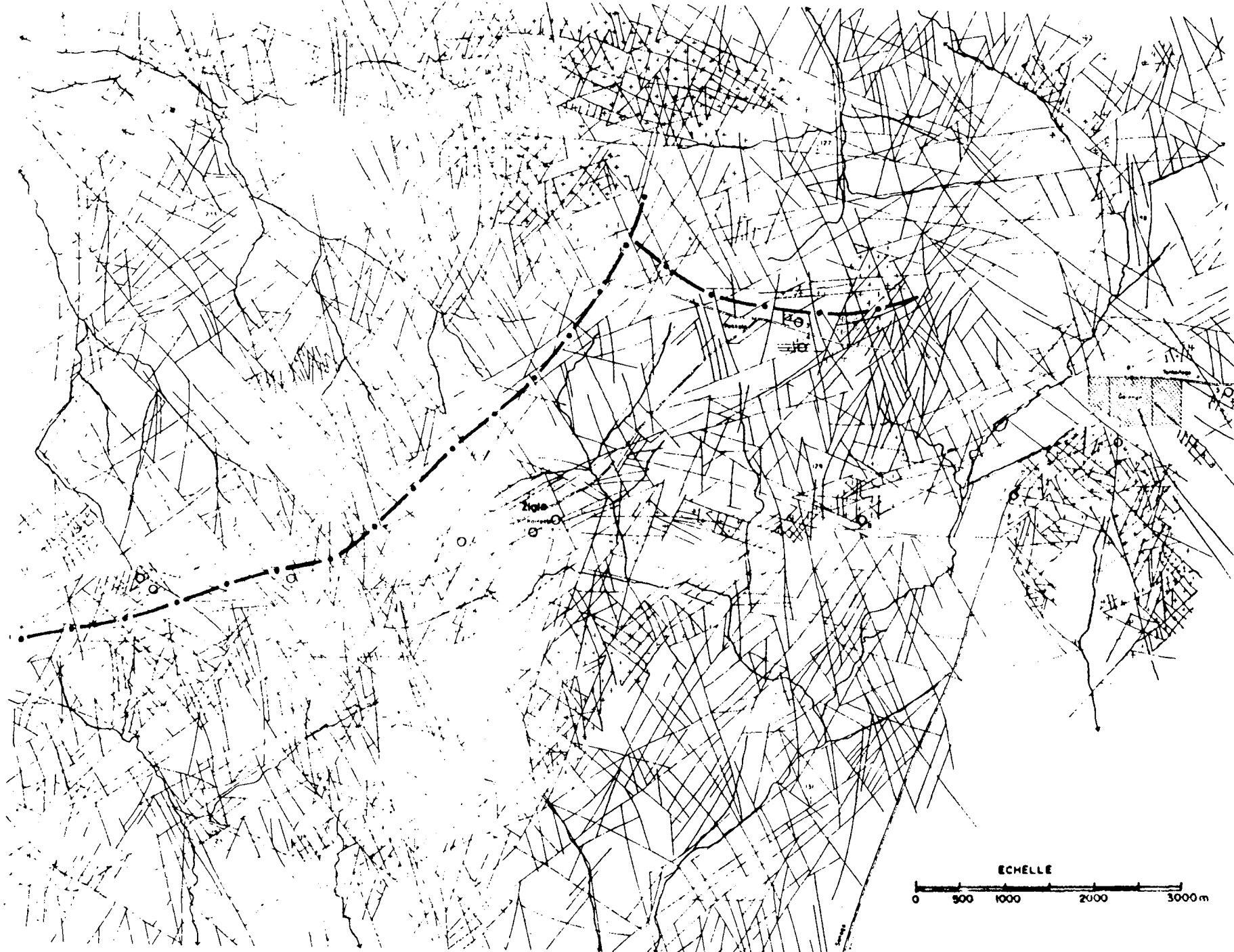
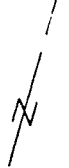
Village

Marigot

Affleurement rocheux

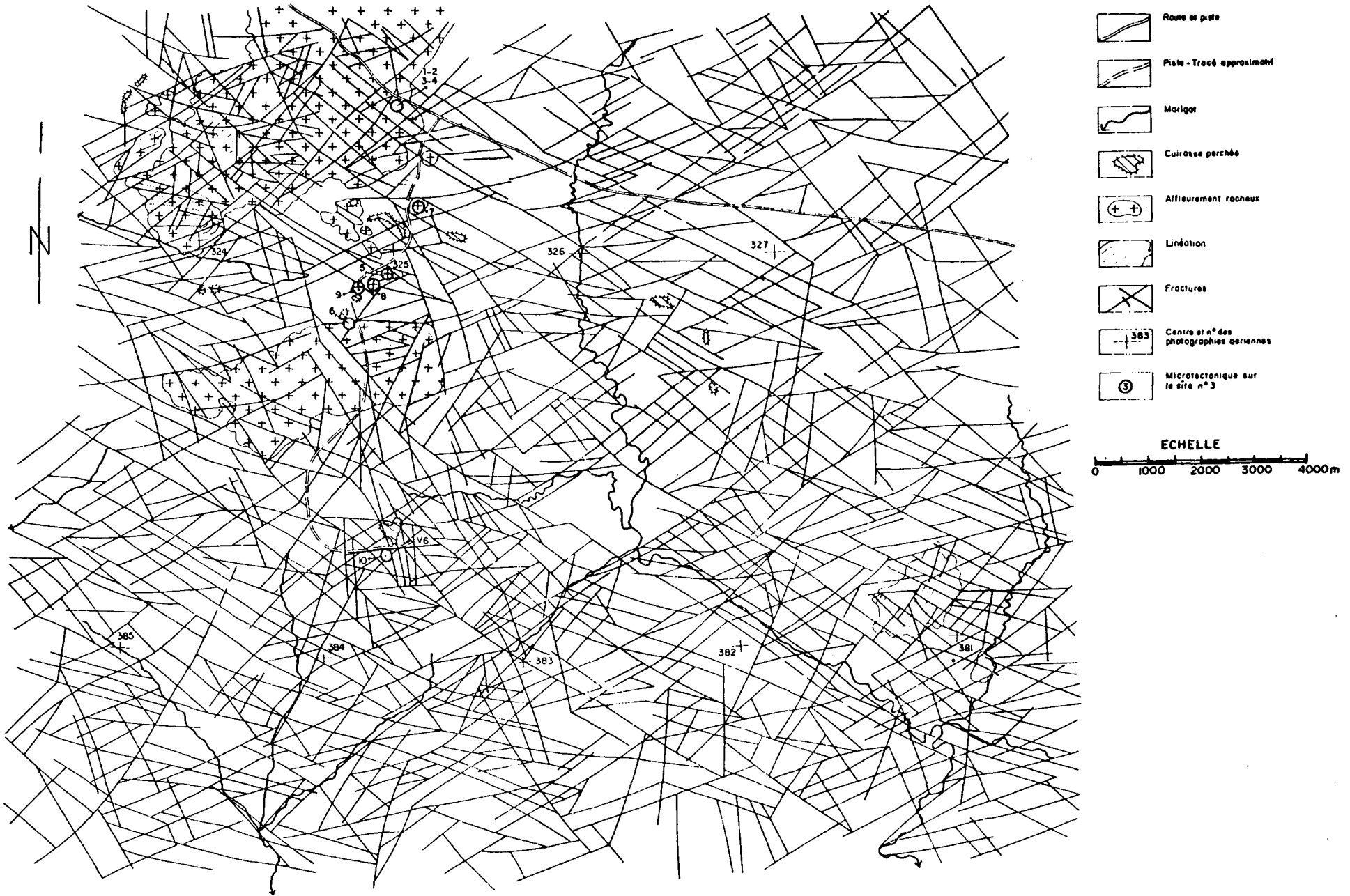
Centre et son n° des photographies aériennes

-  Centre des points géologiques
-  Centre des points géologiques
-  Centre des points géologiques
-  Centre des points géologiques
-  Centre des points géologiques
-  Centre des points géologiques
-  Centre des points géologiques
-  Centre des points géologiques



CARTE DE FRACTURATION DE LA REGION DE MOGTEDO-RAPADAMA (V6)

Figure 4



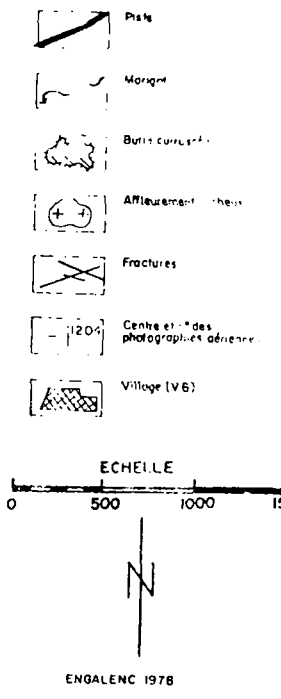
CARTE DE FRACTURATION DE LA REGION DE MOGTEDO-RAPADAMA (V 6)

Figure 5








A.V.V. HteVOLTA

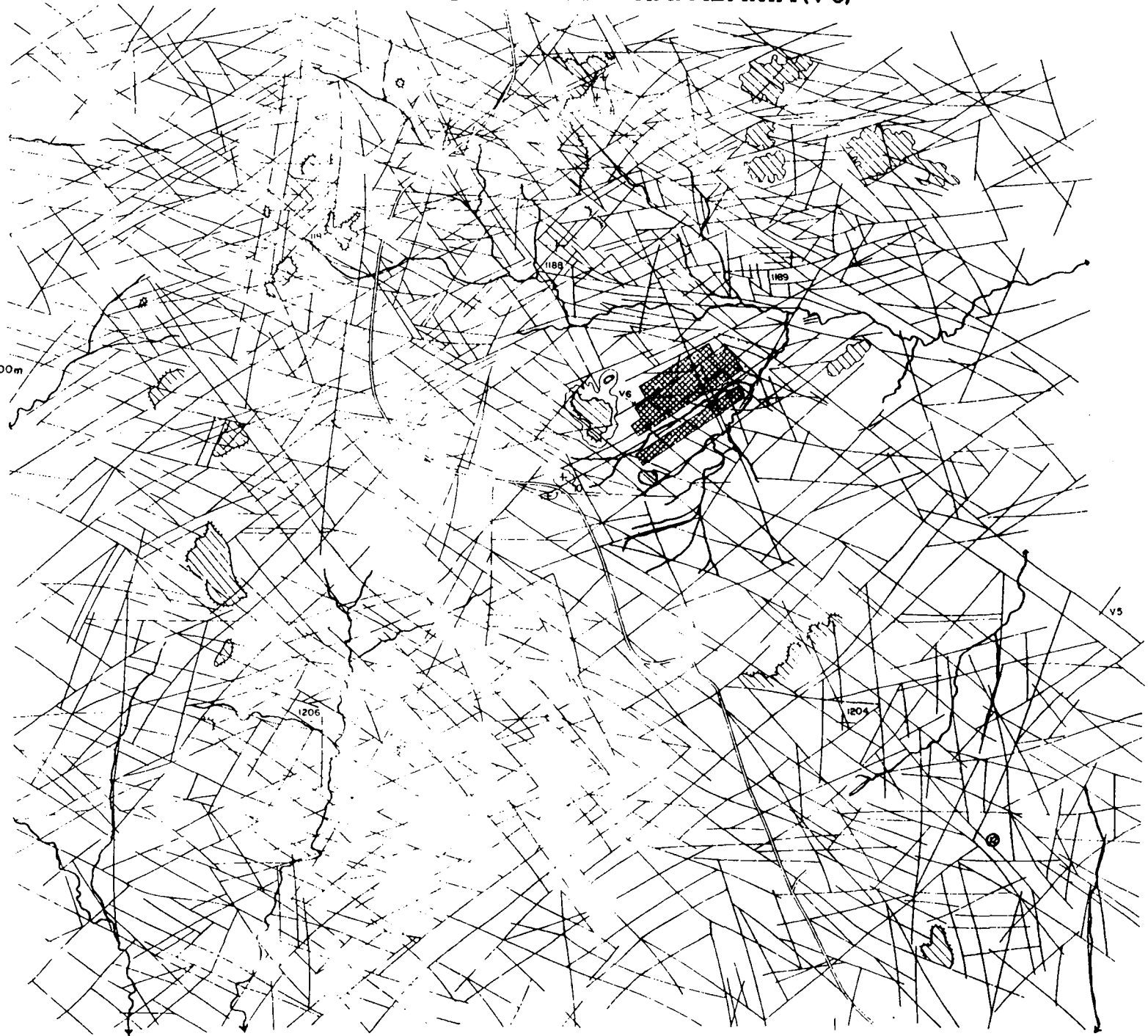
ECHELLE
0 500 1000 1500m

ENGALENC 1978



A scale bar showing 0, 500, 1000, and 1500 meters. Below it is a north arrow pointing upwards.

-  Piste
-  Marges
-  Buis courants
-  Affleurement
-  Fractures
-  Centre et. des photographies aeriennes
-  Village (V6)



Dans la mesure où la roche est fragmentée jusqu'à l'échelle décimétrique, la seule limite au tracé des fractures est le pouvoir séparateur de l'oeil : on peut dessiner une infinité de fractures. A l'échelle du 1/50 000e, le moindre trait de 1 cm représente une fracture de 500 m de long, et la plupart des traits ont plusieurs centimètres.

Même l'échelle du 1/20 000e ne permet de relever que des fractures hectométriques à kilométriques.

Avec les échelles en usage en Afrique de l'Ouest, il n'est guère aisé de définir au niveau d'un forage une zone particulièrement plus fracturée qu'une autre. Le choix du site se fait à partir des grandes fractures et non en fonction de la fissuration secondaire qui joue un grand rôle dans la constitution des réserves.

Une échelle plus grande (1/10 000 ou 1/5 000) ne peut avoir d'utilité que sur les affleurements, car dans les zones non affleurantes - les plus fréquentes - les alignements morpho-structuraux ne sont décelables, par rapprochements successifs que sur des distances assez grandes.

2.3 Que représentent les cartes d'alignements morpho-structuraux ?

Les bons résultats obtenus à partir de ces cartes ou de simples levés locaux démontrent que les alignements ont souvent un rôle positif dans la recherche de l'eau.

L'analyse des cartes de fracturation et des levés de terrain montre qu'il existe une grande analogie dans les directions d'allongement. Les alignements se groupent en familles, dont les directions répondent à des critères géologiques.

Les alignements photo-géologiques peuvent être : des fractures ouvertes ou fermées ; des failles normales, souvent subverticales ; des failles inverses à pendage incliné ; des dykes, des filons généralement associés à des fractures ; des contacts géologiques souvent faillés ; dans les roches métamorphiques, la foliation impose son allongement d'autant plus que les fractures reprennent volontiers les plans de foliation. Les haies, les clôtures, les plantations géométriques sont encore rares ; les pistes et les passages d'animaux sont localisés. Donc, dans l'ensemble, un alignement tracé sur une carte de "fracturation" est un élément susceptible d'avoir un intérêt hydrogéologique.

2.4 Paramètres relevés sur les cartes de fracturation

Avec les échelles des documents aériens (1/50 000e et 1/20 000e) on peut déterminer :

- . l'orientation des fractures,
- . la longueur des fractures,
- . la densité relative de fracturation,
- . la "largeur" de la fracture.

L'orientation des fractures est aisée quoique la distorsion latérale des photos et le raccordement d'une photo à l'autre entraînent des erreurs supérieures à 10°. La micro-tectonique nous enseigne que l'on peut confondre ainsi deux familles de fractures à comportement inverse. La longueur est facile à mesurer ; mais il est moins facile de savoir où commence et où s'arrête un alignement.

La densité de fracturation est relative et n'intéresse que des fractures de grande dimension ayant un rôle conducteur. Le rôle capacitif n'est pas apparent et on part du principe - aléatoire - qu'un grand accident, ou groupe d'accidents s'accompagne de fissures satellites.

Certains indices morphologiques (1er tome - Chap. II - Le Milieu Fracturé) donnent une idée du volume de roche induit par l'accident (fracture simple, couloir de fractures, système fracturé...). On peut noter parfois l'importance de la zone altérée.

2.5 Paramètres relevés par l'analyse du terrain (Annexe 1)

À l'échelle de l'affleurement, il est possible d'observer les fractures secondaires. Les fractures décimétriques, métriques et décamétriques sont les plus faciles à déceler, alors que les fractures d'ordre supérieur (hecto et kilométriques) ont tendance à échapper à l'observation, car elles limitent, en général, l'affleurement. Les grandes fractures ou les systèmes fracturés ceinturent, avec une morphologie en creux, les affleurements qui correspondent souvent à un centre de maille protégée.

Les fractures observées sur le terrain ne sont pas du même ordre que celles relevées sur les documents aériens. On admet que les fractures de même direction ont des caractères communs. L'analyse du terrain distingue :

- a) Des joints ouverts qui peuvent être courts ou longs, superficiels ou profonds, largement ou faiblement ouverts.

L'ouverture semble étroitement liée à la maille : les mailles les plus grandes possèdent les joints les plus ouverts. Les mailles existent à toutes les échelles.

Les joints ouverts ont des directions bien définies pour un site. Certaines directions varient d'un site à l'autre. L'ouverture des joints, mesurée en surface, est nettement surestimée en raison de l'altération qui évase les lèvres de la fissure.

Les fractures ouvertes, à maille moyenne, ont plutôt un rôle hydraulique à l'échelle du captage. Les fractures longues et profondes, au moins décamétriques ont un rôle plutôt à l'échelle du réservoir.

- b) Des joints fermés, orientés suivant des directions fixes et qui n'ont pas un intérêt hydraulique apparent.

L'analyse du terrain permet donc la sélection des joints ouverts, de connaître leur ouverture, leur longueur et leur pénétration, leur pendage et leur direction.

D'autre part, il est possible de reconstituer partiellement, ou en totalité, l'histoire tectonique de la région et de définir les phases de contraintes : l'observation ponctuelle peut être extrapolée à l'échelle régionale.

2.6 Influence de l'échelle d'observation

Certaines familles de fractures relevées sur les cartes de fracturation au 1/20 000e n'apparaissent pas au 1/50 000e (ZIGLA). Les fractures relevées sur les photographies aériennes (MOGTEDO) ne décèlent pas la direction des joints de maille inférieure qui ont un grand rôle dans l'hydraulicité du milieu.

La même distribution fissurale (1/50 000e) sur les deux secteurs n'a pas la même signification structurale et a aussi un comportement hydraulique inverse.

La plus grande fréquence d'allongement peut varier d'une échelle à l'autre. Ce n'est pas un critère de sélection de joints ouverts.

Ainsi, il apparaît que l'on ne peut pas toujours faire des corrélations entre les observations de terrain et les levés photographiques. L'analyse du terrain implique des extrapolations à l'échelle régionale à partir d'observations très détaillées sur des sites qui ne sont pas nécessairement représentatifs de la fracturation régionale : les affleurements occupent des positions particulières dans le milieu fracturé (noyau protégé, essentiellement micro-fracturé).

2.7 Utilisation des cartes de fracturation

L'analyse du terrain, quoique rapide et peu coûteuse, est peu pratiquée par les hydrogéologues. C'est dommage car elle complète, à une maille inférieure, la photo-interprétation qui reste l'observation de base la plus pratique.

A MOGTEDO, l'analyse de terrain montre que les cartes de fracturation ne sont pas de grande utilité car les fractures relevées sont en compression, donc fermées.

Toutefois, les forages implantés sur une fracture se sont révélés productifs. Aux essais, il s'est confirmé que la fracture est vraiment étanche conformément aux données du terrain. Elle n'agit pas en tant que drain mais comme une limite imperméable le long de laquelle l'eau circule en empruntant un réseau de fissures secondaires (filon) non visibles sur la photo, mais observées sur les affleurements.

L'utilisation rationnelle des données photogéologiques est assujettie à l'analyse du terrain. Dans la mesure où les documents existent :

- . ne relever au 1/50 000e que les grandes fractures kilométriques, suivant des directions ouvertes dictées par les observations de terrain ou par déduction structurale.
- . superposer ce canevas au levé au 1/20 000e des fractures ouvertes kilo et hectométriques dont la fréquence est plus élevée à cette échelle - des directions nouvelles peuvent apparaître.

- . choisir le site de forage le plus près possible d'un grand axe kilométrique (fracture simple ou association de fractures) drainant le plus grand nombre de joints ouverts.

2.8 Critères pour le choix d'une fracture productrice

2.81 Direction d'allongement de la fracture

D'après les observations de terrain les fractures sont ouvertes suivant des directions précises. Les données sont insuffisantes pour que l'on puisse généraliser à l'échelle régionale, d'autant plus que les directions ouvertes peuvent changer d'un site à l'autre. Les directions structurales ne sont pas constantes.

Les fractures allongées suivant la direction structurale sont généralement fermées. Ce sont souvent des fractures longues et pénétrantes ; des failles inverses ne sont pas rares. Leur fréquence est moins élevée dans les roches massives que dans les roches foliées.

Une fracture en compression n'est pas fermée en totalité. La sinuosité du plan de fracture entraîne l'existence de zones de tension ouvertes. En milieu carbonaté on observe des karsts développés sous les failles inverses (J. HECTOR, 1978). A MOGTEDO, des forages productifs sont aussi sous la faille et les plans de foliation.

Les fractures parallèles à la direction de contrainte (perpendiculaires aux précédentes) sont généralement courtes, pénétrantes et largement ouvertes. Elles sont plus nombreuses dans les roches massives, compétentes, que dans les roches foliées.

Les fractures diagonales aux précédentes présentent souvent des cisaillements. Ce sont en général des fractures ouvertes, pénétrantes, longues, ayant la même fréquence dans des roches de lithologie différente.

Les fractures de tension, équivalentes aux diaclases, sont courtes, superficielles, leur fréquence diminue rapidement avec la profondeur. Elles sont plus fréquentes dans les roches massives et dans la direction perpendiculaire aux structures.

Leur interconnection n'est pas toujours assurée.

2.82 Longueur de la fracture

L'ouverture d'une fracture est fonction de la taille de la maille. Cette généralité souffre des exceptions.

Les fractures longitudinales sont longues, mais en compression. Les fractures transversales, dans les roches massives, sont courtes mais largement ouvertes. Les diaclases qui leur sont souvent associées sont courtes mais ouvertes.

La productivité d'un ouvrage est fonction du pouvoir drainant de la fracture principale induite par le forage. Il faut donc choisir la fracture ou le système fissuré pouvant drainer le plus grand volume de terrain.

La propagation du "cône d'influence" le long de l'axe drainant exige le choix d'une fracture d'ordre kilométrique.

2.83 Largeur de la fracture

La fréquence élevée d'une famille de fractures n'est pas un critère de productivité. L'important est l'ouverture des fissures. Les fractures transversales des roches massives sont nettement plus productrices que les nombreuses fissures longitudinales des roches foliées.

Le débit d'une fracture est fonction du cube de la largeur de la fracture. Pour un massif de porosité donnée, une fracture équivalente de longueur kilométrique peut transiter un débit 400 fois plus élevé que pour un maillage hectométrique, 4.10^4 fois plus que pour une maille décamétrique, et 4.10^6 fois plus que pour un maillage métrique.

Deux forages implantés dans deux massifs rocheux ayant la même réserve utile n'auront pas le même débit si le réseau de fractures est différent.

2.84 Association des fractures

L'intersection de plusieurs fractures kilométriques ou hectométriques augmente la probabilité de réussite dans la mesure où parmi les directions induites il peut y avoir des fractures ouvertes. La surface drainée est accrue lorsque les fractures rayonnent dans toutes les directions.

Dans les régions faiblement altérées, c'est au niveau des associations de fractures que le milieu poreux est le plus développé. La réserve utile est accrue.

Le repérage des zones intensément fracturées est un bon guide pour la recherche hydrogéologique. Mais "Il peut être finalement dangereux d'implanter un forage aléatoirement dans une zone que l'on sait qualitativement être très fracturée. En effet, il existe toujours une probabilité non négligeable de rencontrer de faibles fréquences, dans un domaine où la fréquence moyenne est nettement supérieure à la fréquence moyenne régionale " (D. JAMIER, 1975).

2.85 Filons - Dykes

Dans les roches foliées de MOGTEDO, la fissuration le long des plans de foliation ne confère au milieu qu'une fonction capacitive. La fonction conductrice est assurée par un drain constitué par un filon de roches massives fracturées transversalement. Dans les schistes, les venues d'eau s'observent au niveau des bancs gréseux et des filons de quartz. Les filons peuvent suivre l'allongement des structures, revalorisant les accidents en compression (MOGTEDO).

Le rejeu tectonique de l'interface séparant deux milieux de compétences différentes entraîne la création d'une zone planaire laminée. De bons résultats sont notés au contact des limites des dykes.

Dans les roches métamorphiques, on recherchera des fractures dans les roches les plus dures (filons de grano-diorites ; pegmatite, quartz...)

3 - L'AQUIFERE EN MILIEU CRISTALLIN (Voir Annexe II)

3.1 Le système aquifère en milieu cristallin (fig. 6)

En milieu aquifère poreux homogène, les fonctions capacitives et conductrices sont confondues dans le même réservoir.

En milieu cristallin, ces fonctions coexistent au sein de chaque niveau aquifère mais une différenciation s'impose entre le milieu altéré essentiellement capacitif et le milieu fissuré à tendance conductrice marquée.

En schématisant, la recherche hydrogéologique en milieu cristallin est axée sur la reconnaissance et la localisation d'un système conducteur pouvant drainer le plus grand volume capacitif. L'axe conducteur drainant est une fracture ou un système fracturé. Le volume capacitif est, soit un milieu poreux (altération - sable - alluvions), soit un milieu microfissuré, formé par le massif lui-même, parcouru par une infinité de fissures secondaires, soit un milieu à double porosité (certaines roches cristallogéniques et les schistes).

3.2 Importance de la fonction capacitive

La porosité efficace d'un massif cristallin fissuré ne dépasse pratiquement jamais 1 %. Sa valeur moyenne est de 0,1 à 0,2 % mais ne peut représenter que quelques ‰.

La porosité efficace de l'altération atteint une moyenne courante de 2 à 5 %.

Il faut donc un volume de roche fissurée 2 à 50 fois plus grand qu'un volume altéré pour avoir la même réserve utile.

Dans l'exemple de ZIGLA la quasi totalité de la réserve utile est localisée dans l'altération (80 %) et, à rayon d'influence égal, le milieu fracturé ne peut qu'entretenir le débit continu d'une ou deux pompes manuelles, alors que l'ensemble du système aquifère fournit 5 m³/h en continu.

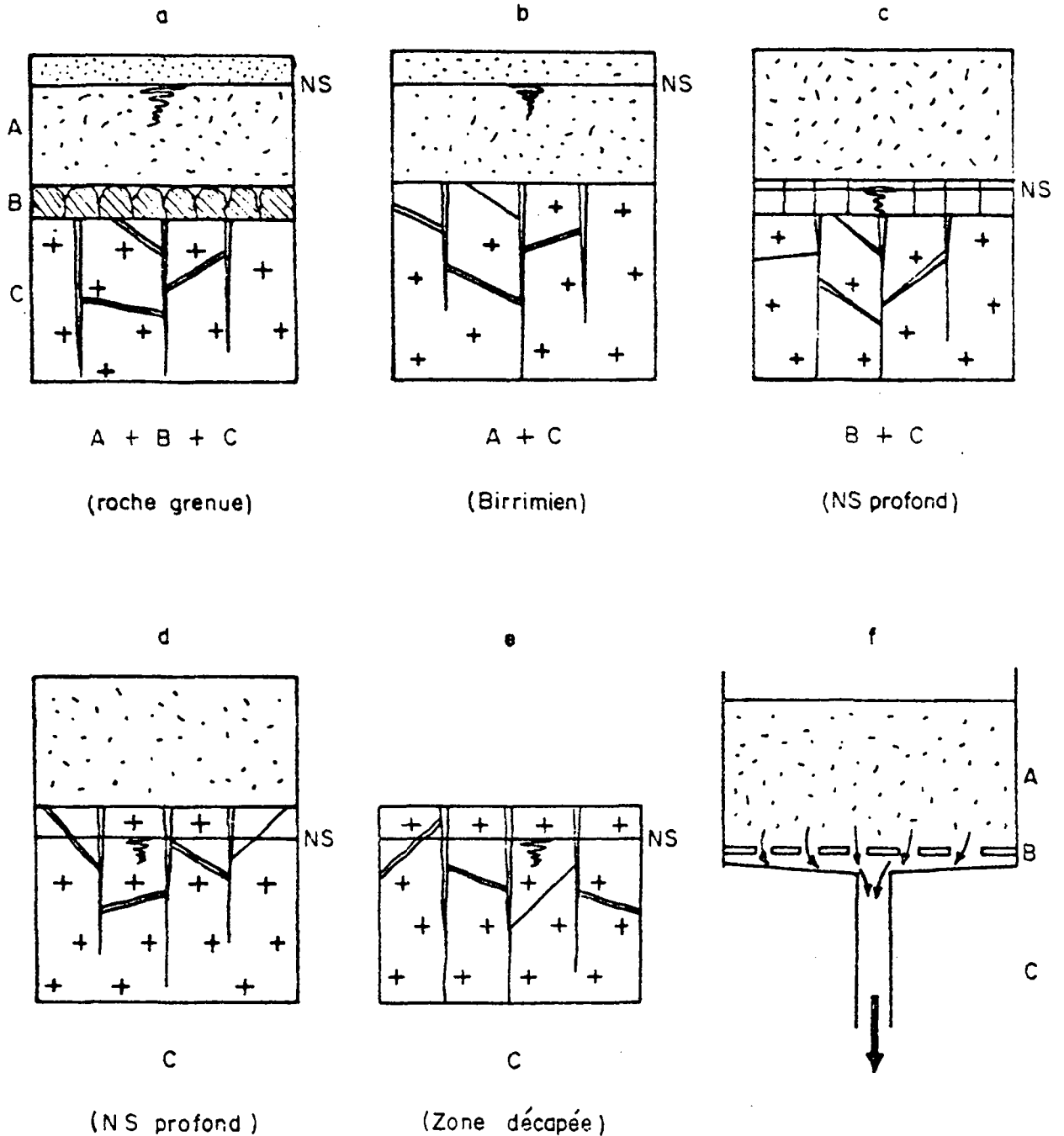
A MOGTEDO, le milieu capacitif est représenté par les roches foliées ; dans l'altération, en raison de la profondeur du niveau de l'eau, les réserves sont faibles et peuvent disparaître à l'étiage.

Les porosités cumulées des plans de foliation et des microfissures sont inférieures à la porosité efficace de l'altération : le débit d'exploitation ne peut dépasser 1,5 m³/h.

En l'absence d'un milieu poreux, ou d'un milieu finement fissuré se comportant comme un milieu poreux, la fonction capacitive est faible et, pour des débits supérieurs au m³/h il faut que le forage d'exhaure induise un volume très important de roche fissurée.

Fig. 6 SCHEMA DES DIVERS SYSTEMES AQUIFERES

(fig. f modèle équivalent de l'aquifère a)



A = milieu poreux (altérations, alluvions, sables)

B = zone fissurée s.s.

C = milieu fracturé

3.3 Importance de la fonction conductrice

3.31 Milieu fissuré seul

En l'absence d'un drain naturel, le rayon d'influence d'un pompage est trop faible pour induire un volume important de roche ; les fissures courtes et étroites ont une très faible diffusivité hydraulique. Le débit d'exhaure est toujours réduit.

Le drainage lointain d'un massif rocheux ne peut se faire que par l'intermédiaire d'une fracture ou d'un système fissuré ayant une diffusivité élevée. L'exemple de MOGTEDO montre une anisotropie hydraulique très marquée le long de l'axe drainant. Le "cône de rabattement" et, par suite, le "rayon d'influence" s'étirent démesurément le long de la fracture. Le volume de roche induit s'accroît avec le temps ; la perte de charge dans une fissure appelle la vidange de la fissure afférente et ainsi de suite de proche en proche.

L'apport plus ou moins différé du réseau de fissures secondaires constitue la contribution capacitive dans un milieu purement fissuré. Ce débit retardé peut entraîner la stabilisation durable du niveau d'eau dans le forage en pompage.

3.32 Milieu fissuré surmonté d'un aquifère poreux

Le milieu poreux peut contenir une réserve utile élevée. Mais la faible perméabilité limite le débit d'exploitation avec les ouvrages de captage classiques. La superposition d'un milieu poreux saturé à un milieu fissuré ayant une fonction drainante élevée, est l'assurance d'un bon débit pérenne.

Comme souvent la poche altérée coïncide avec le système fracturé (qui est à l'origine de l'altération) le binôme altération-fracture doit être l'objectif de la recherche hydrogéologique. Dans les roches grenues, la présence de l'horizon fissuré (s.s) au sommet du massif rocheux est un facteur particulièrement favorable car la surface drainante est considérablement accrue. La zone fissurée s.s s'intercale comme un massif filtrant entre la réserve (milieu poreux) et le drain (fracture principale souvent verticale) qui devient ainsi le collecteur d'un vaste système hydraulique.

A ZIGLA, le collecteur draine sur 260 m de long au bout de 40 h de pompage ; cette longueur est proche de 1000 m après un an de pompage continu. La longueur totale des fissures ouvertes induites par l'essai de 40 h atteint plusieurs dizaines à plus de 100 km. La surface drainée est d'environ 50 000 m².

A MOGTEDO, l'extension latérale de l'aire de drainage est très limitée mais l'influence polarisée dans l'axe de l'accident se propage vite et très loin, malgré le cheminement indirect des filets d'eau.

3.4 Diffusivité hydraulique et réactions de l'aquifère (T.T. STRELISOVA, 1978)

La vitesse de réaction à un changement de pression dans un milieu élastique est proportionnelle au coefficient de diffusivité hydraulique δ .

$$\delta = k/S$$

k = perméabilité moyenne (ou conductivité hydraulique)
S = coefficient d'emmagasinement.

Dans un milieu fissuré, k est nettement plus élevée et S nettement plus faible que dans un milieu poreux, bien que la compressibilité de fracture soit plus grande que celle du milieu poreux. Par suite, la diffusivité hydraulique de fissure est bien plus élevée que la diffusivité du milieu poreux.

Ce phénomène se traduit par des réponses instantanées de l'aquifère à une induction quelconque : tous les piézomètres réagissent quasi instantanément. La distance intervient très peu en regard du "pouvoir conducteur" d'une fissure par rapport à une autre. Cette conductivité, liée directement à la perméabilité est fonction de la largeur de la fissure qui est extrêmement variable.

La diffusivité hydraulique d'une fracture semble dépendre bien plus de k que de S.

Dans un système multi-fissuré se comportant comme un milieu homogène, mais traversé par des fractures, les réponses sont rapides dans les fractures et les réactions sont différées dans le milieu de plus faible diffusivité. Le temps de réponse du milieu de plus faible diffusivité, et par suite l'atténuation du déséquilibre de pression, sont fonction des caractéristiques élastiques du milieu, de la perméabilité moyenne et du fractionnement du massif, c'est-à-dire des dimensions des volumes unitaires.

A MOGTEDO, les niveaux chutent dans la fracture principale pendant les 40 premières minutes ; puis l'influence du milieu capacitif (débit retardé) s'affirme progressivement et la stabilisation des niveaux s'observe après 8 h de pompage.

- . L'évolution est instantanée et similaire dans les piézomètres situés sur le même accident.
- . L'évolution est indépendante de la distance par rapport au point d'induction de l'aquifère, en particulier pour les piézomètres situés à l'extérieur de l'accident principal. Les rabattements sont plus forts dans le piézomètre éloigné que dans celui qui est positionné à côté du forage.
- . A ZIGLA, la chute et la remontée des niveaux évoluent d'une façon semblable à celle d'un milieu homogène et on peut dresser des graphiques identiques à ceux utilisés pour les aquifères poreux homogènes et infinis.
- . Des ruptures de pente (ZIGLA) ou des décalages dans les droites (MOGTEDO) semblent répondre à des changements de la structure du milieu fissuré.
- . Le régime d'écoulement d'un milieu à deux perméabilités tend vers un régime pseudo-permanent ; à partir de ce moment, le taux de déclin de la pression en fonction du temps est une constante ne dépendant que de la capacité de stockage du système et du facteur de compressibilité du fluide en écoulement (P. ALBERT - J. JAISSON - H. MARION, 1959).

3.5 Remarques sur les essais de pompage

Pour l'alimentation en eau des villages il n'est pas question d'implanter des piézomètres d'observation. Par suite, il n'est guère aisé de savoir si le système aquifère se comporte comme un milieu homogène ou si l'anisotropie est bien marquée. Les graphiques classiques de l'évolution des rabattements en fonction du temps peuvent toujours être tracés ; ils donnent rapidement les réactions principales de l'aquifère et il est important de savoir si, pour le débit d'exploitation demandé, les niveaux se stabilisent (MOGTEDO) ou continuent d'évoluer dans le temps (ZIGLA). La durée de la descente doit être d'au moins 8 à 10 h. On n'est jamais certain de l'évolution des niveaux dans un milieu fracturé. La géométrie de l'aquifère peut engendrer des réactions imprévisibles. Si le débit d'exhaure est adapté aux potentialités de l'aquifère, les niveaux d'eau tendent vers une pseudo-stabilisation. Mais l'exemple de ZIGLA montre qu'après une stabilisation rapide, les niveaux chutent à nouveau.

La détermination des caractéristiques hydrodynamiques - qui se résument pour un seul point d'observation à la Transmissivité (T) - ne présente qu'un intérêt restreint, en particulier pour un système hydraulique très anisotrope. La valeur T qui n'a pas grande signification, ne peut être utilisée raisonnablement pour des calculs de bilans ou de prévisions de pompage. Au maximum T peut servir de référence relative pour caractériser la conductivité de l'aquifère, mais d'une façon ponctuelle, au droit du forage ou à la limite, sur une portion restreinte de la fracture induite. Il serait dangereux d'installer une batterie de forages après un calcul reposant sur la seule valeur de T.

3.6 Détermination du débit d'exploitation d'un forage

Par mesure d'économie et de rendement, les essais de pompage sont souvent de très courtes durées ou inexistant.

Le débit est alors estimé en cours de forage par le procédé de "l'air-lift".

3.61 Essai avec une pompe

Les courbes des rabattements en fonction du logarithme du temps (descente et remontée) obtenues avec un débit constant plus faible que le débit estimé par émulsion en fin de forage, permettent une estimation du débit d'exploitation en fonction du rabattement maximum souhaitable. Ces graphiques ont l'avantage de mettre en évidence certaines anomalies dues au réservoir et de faire des prévisions à moyen et long termes. On suppose que, comme dans les milieux homogènes, les rabattements sont proportionnels au débit.

Les courbes caractéristiques obtenues avec au moins trois paliers (4 de préférence) stabilisés pour trois débits constants ont l'avantage de définir un débit d'exploitation n'entraînant pas le dénoyage de l'aquifère. Encore faut-il que la durée des paliers soit suffisamment longue pour déceler des anomalies telle la reprise de la chute des niveaux après stabilisation (ZIGLA).

Mais il ne faut pas perdre de vue qu'en milieu fissuré le débit des puits n'est pas, en général, proportionnel à la chute de pression et que la loi d'écoulement est de la forme :

$$\Delta P = AQ + BQ^2 \text{ (fig. 7).}$$

3.62 Essai avec le dispositif "Air-lift"

En cours de forage, en particulier avec un atelier fonctionnant à l'air comprimé (marteau fond de trou, par exemple), l'air est injecté à l'intérieur de la tige de sondage et remonte dans l'espace annulaire tige-paroi du trou, avec les déblais et l'eau émulsionnée. Le foreur a ainsi une idée de la production progressive de l'ouvrage.

Dans quelle mesure ces estimations sont-elles acceptables ?

Il faut d'abord aménager la réception de l'eau à la sortie de l'ouvrage en disposant une sorte de grand entonnoir qui canalise l'eau vers le point de mesure.

L'estimation au coup d'oeil, des épanchements désordonnés à la sortie du trou, est fantaisiste.

Pour qu'un pompage par émulseur soit effectué dans des conditions correctes, il faut que la longueur totale du tube d'air (L) soit au moins égale à 2,5 fois la hauteur manométrique totale (H) (A. MABILLOT, 1971).

$$L > 2,5 H$$

Pour un forage classique de 40 m de profondeur, la hauteur manométrique ne peut excéder 16 à 20 m. Lorsque le niveau dynamique est bas, le dispositif est rapidement mis en défaut.

En cours de forage, il est impossible d'extraire correctement un débit lorsque le pied du tube d'air (en l'occurrence l'outil) est exactement au niveau des venues d'eau.

A ZIGLA, les principales venues d'eau sont situées au sommet de la zone fissurée, à 20 mètres de profondeur. Le débit ne peut être correctement estimé que lorsque le forage est à 40 m de profondeur.

A la limite, on peut se demander si bon nombre de forages n'ont pas été approfondis inutilement jusqu'à 40 mètres (mentionné par BURGEAP, 1977).

Lorsque les essais à l'émulseur sont bien menés, les débits sont très voisins de ceux issus d'un essai avec pompage (fig. 8).

3.7 Remarques sur l'exploitation des aquifères de fissures

Le milieu poreux assure la réserve utile et la réserve renouvelable. La stabilisation des niveaux peut être obtenue avec des débits d'exploitation élevés.

Fig. 7 LOI D'ÉCOULEMENT PERMANENT EN MILIEU FISSURE

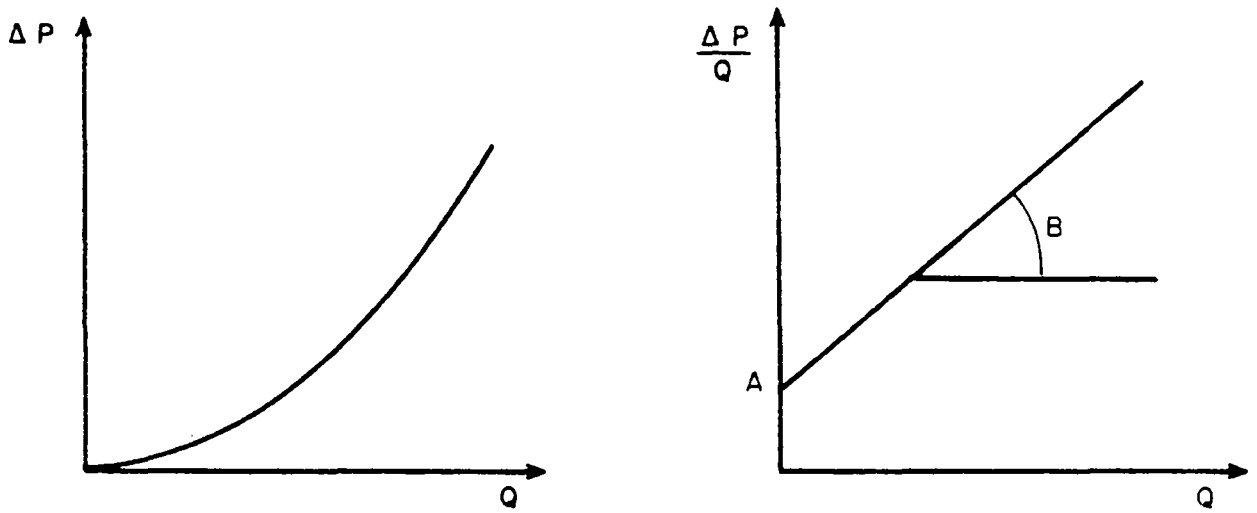
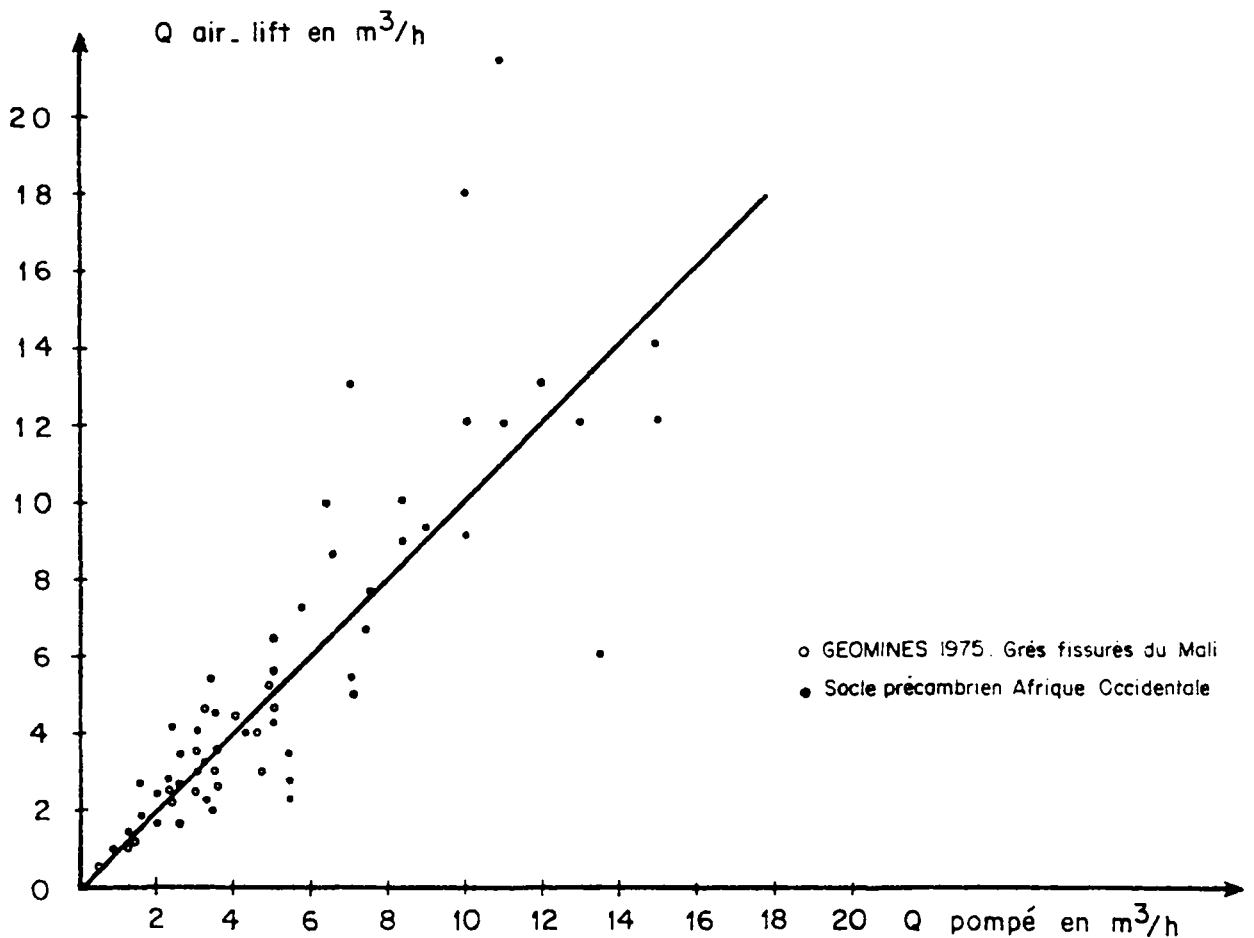


Fig. 8 COMPARAISON DES DÉBITS ISSUS D'ESSAIS A L'AIR - LIFT ET AVEC UNE POMPE



Il faut veiller à ce que le niveau dynamique, ou le niveau en pseudo-stabilisation reste toujours dans le milieu poreux. Le dénoyage du milieu poreux, en réduisant la réserve utile, va perturber le débit ; l'exploitation du seul milieu fissuré risque de modifier les caractéristiques du pompage (débit-rabattement).

- . Dans les régions humides où le renouvellement des réserves est assuré et où la tranche saturée est puissante, les débits extraits des forages sont élevés et pérennes.
- . En région de savane, si à l'étiage la tranche d'altération saturée disparaît ou ne permet pas un rabattement d'au moins 5 mètres, la pérennité et la valeur du débit initial ne sont plus assurées.
- . Dans les zones décapées où la roche affleure, ainsi que dans les régions où le niveau piézométrique se trouve au-dessous de l'altération, l'exploitation a lieu uniquement dans les fissures. Les réactions sont difficiles à prévoir et varient en fonction de la structure du milieu. Seule, l'exploitation de l'ouvrage peut permettre un programme optimal de pompage après observation des niveaux. Mais, sauf si les conditions locales de fracturation sont très favorables, les débits sont en général faibles et leur pérennité précaire.

La zonation climatique impose une zonation de la productivité des ouvrages.

Même lorsque la réserve utile est abondante, il faut trouver le collecteur (fracture ou filon) capable de drainer une grande surface de réservoir. Le débit et sa pérennité dépendent du choix de la fracture et de la position du forage qui ne doit pas être approximative.

Suivant la structure de l'aquifère, un site ne doit pas être abandonné si le premier forage est stérile ; il suffit parfois de déplacer la machine d'un mètre ou deux pour trouver le débit recherché. L'investissement fait en études géologiques et géophysiques ne mérite pas l'abandon aussi rapide d'un site jugé intéressant.

La plus grande partie du débit peut être acquise lorsque le forage atteint la zone fissurée, au sommet de la roche. Mais pour augmenter l'aire de drainage et assurer la pérennité du débit dans le temps, nous conseillons de continuer de forer pour induire au maximum la fracture principale.

Une roche foliée, "tendre" à l'avancement de l'outil et produisant des échantillons très fissurés n'a pas obligatoirement des indices de venues d'eau. Inversement, une roche massive, "dure", entrecoupée de rares fissures peut être très productive. Les terrains "durs" ont une meilleure perméabilité que les terrains "tendres".

4 - L'UTILISATION DE LA GEOPHYSIQUE PAR METHODES ELECTRIQUES POUR LA RECHERCHE D'EAU DANS LES ROCHES CRISTALLINES FRACTUREES

L'emploi des méthodes géophysiques pour la recherche d'eau dans le milieu cristallin a ses défenseurs et ses détracteurs.

La mise en cause des méthodes géophysiques a plusieurs origines :

- . soit la géophysique est superflue (mais pas inutile). C'est le cas des zones humides (P > 1000 mm en zone de savane - P > 1200 mm en zone forestière) où les très bons résultats obtenus avec l'étude de la fracturation seule, ne motivent pas l'intervention relativement coûteuse de la géophysique,
- . soit la géophysique est trop sollicitée, en particulier dans les régions où la recherche est difficile et les échecs fréquents,
- . soit que les résultats sont décevants :
 - l'interprétation des mesures est à parfaire,
 - les méthodes ne sont pas toujours adaptées au milieu étudié,
 - l'interprétation physique des mesures est insuffisante si elle ne repose pas sur une bonne connaissance du milieu fissuré.

M. BRION et J.C. LACHAUD se sont penchés sur la méthodologie et l'interprétation (Annexe III).

Il n'est pas toujours aisé d'être original dans un domaine fréquenté ; mais cette mise au point apporte des précisions et des nouveautés pratiques. Nous nous inspirons, par ailleurs, des intéressantes notes publiées par la C.G.G. (Compagnie Générale de Géophysique) en particulier de la publication de M. BRO et C. HUBERT (1978).

4.1 L'orientation des études géophysiques

Elle repose sur :

- . l'échelle de la zone à étudier : étude régionale ou étude ponctuelle d'un site,
- . la présence, ou non, d'un recouvrement conducteur,
- . l'existence, ou non, d'une étude de fracturation.

Dans la mesure du possible, nous conseillons vivement de faire précéder la prospection géophysique par une étude de photo-interprétation qui localise les fractures et les poches altérées.

Si une fracture relevée sur photographie aérienne est décelée par la géophysique, son existence est une quasi certitude.

4.2 Analyse de cas particuliers

Si, comme l'affirment M. BRO et C. HUBERT (1978) "toute fracture ou accident tectonique, même de faible importance (2 à 3 m de large) est lié à une anomalie électrique conductrice", la réciproque n'est pas toujours vraie ; et c'est là une principale source d'erreurs.

a) L'anomalie peut exister dans le recouvrement conducteur, mais pas en profondeur.

Cette anomalie peut être décelée en utilisant un double profil de résistivité avec deux longueurs de lignes. Le profil réalisé avec la petite longueur de ligne met en évidence l'anomalie superficielle. La comparaison avec le profil issu de la grande longueur de ligne permet de voir si l'anomalie se poursuit, ou non, en profondeur. Mais une variation d'épaisseur de la formation superficielle peut créer une anomalie qui n'est pas enregistrée sur le profil en petite longueur de ligne.

L'incertitude ne peut être levée qu'avec un sondage électrique, ou après étude de la fracturation sur photo.

b) Les anomalies conductrices sont stériles à MOGTEDO, car elles indiquent les roches foliées qui ont une porosité élevée mais une perméabilité de fissure très faible. Ce phénomène est fréquent dans les séries schisteuses.

Dans un milieu multifissuré, l'évolution de l'altération diminue fortement la perméabilité. L'anomalie conductrice est négative.

c) Les anomalies résistantes sont productrices (MOGTEDO) quand une roche massive compétente, donc fissurée, sert de drain dans un ensemble de faible perméabilité. C'est le cas des filons et des dykes filiformes. Les anomalies ne doivent pas être trop résistantes et présenter un allongement (filon). Les formes massives, circulaires indiquent des noyaux de roches résiduels, peu fissurés.

Les filons profonds sont résistants. Lorsqu'ils remontent près de la surface, ils peuvent être partiellement altérés et apparaître comme une anomalie conductrice, mais la foreuse atteindra tôt ou tard une roche dure : des puits forés à la tarière mécanique, implantés sur une anomalie conductrice, s'arrêtent prématurément sur la roche dure qui peut être aquifère plus bas.

Les masses intrusives, ou les gros dykes massifs sont productifs à la périphérie, grâce soit à un horizon multifissuré à la surface de la roche, soit à l'existence d'une couche de terrain encaissant induré et multifissuré par l'intrusion. Cela est fréquent dans les schistes et toutes les roches tendres.

Dans les exemples du MALI (BRO et HUBERT, 1978), de MOGTEDO et de l'AFRIQUE DU SUD (F.J. ENSLIN et L.E. KENT, 1969) l'implantation du forage doit être extrêmement précise, souvent au mètre près.

d) La zone fracturée présente un pendage :

L'anomalie électrique détermine la position de la partie supérieure de l'accident ; l'anomalie peut être résistante ou conductrice. Seule l'observation géologique, si elle est possible, peut donner la profondeur à laquelle le forage doit recouper l'accident. En SUEDE, l'utilisation de forages obliques favorise le recoupement des accidents mal localisés.

La fissuration semble plus développée sous l'accident (faille inverse) (J. HECTOR, 1978). Dans les coulées doléritiques de l'AFRIQUE DU SUD, la face inférieure est la plus productrice et les résultats sont meilleurs pour les pendages redressés que pour les coulées horizontales.

e) On ne connaît pas la profondeur de la nappe :

Les sondages électriques n'indiquent pas la profondeur de la surface de l'eau ; dans l'altération, en raison de la forte porosité totale qui permet une humidité élevée au-dessus de la zone saturée ; dans la roche fissurée, en raison de la faible porosité et de la diminution de la porosité avec la profondeur.

4.3 Analyse d'une carte de résistivité (fig. 9 et fig. 60 - Annexe III)

Lorsque les points de mesures sont serrés (MN = 10 m) il peut être très instructif de tracer une carte d'isorésistivité apparente. On s'applique à dessiner les courbes des valeurs intermédiaires : la carte présente de forts gradients et la rectitude des anomalies se prête très bien au tracé des accidents. Leur direction est en parfait accord avec les observations de terrain. Les plages résistantes sont écartées si elles sont massives ; les anomalies allongées et étroites sont intéressantes dans les roches foliées ou les schistes.

Si on connaît les directions des fractures ouvertes et fermées, leur report sur la carte permet de déceler les limites étanches ou perméables. Certains axes conducteurs s'alignent très bien avec les directions ouvertes. On obtient un schéma hydrogéologique très parlant. Les directions d'anisotropie données par les dispositifs carrés indiquent très bien l'allongement des fractures ouvertes.

Certaines anomalies conductrices, transversales et courtes, ne sont pas à négliger car elles correspondent aux fractures ouvertes perpendiculaires à la direction structurale (fig. 32 Pompage MOGTEDO).

Pour qu'une carte de résistivité soit instructive, il faut qu'elle soit dressée avec un nombre suffisant de points de mesures ; cela implique des pas de mesures et des profils rapprochés (10 m). La méthode du rectangle le permet, mais elle ne peut être employée que sur une surface limitée car la mise en oeuvre du dispositif est longue.

Si les profils sont en nombre insuffisant ou trop espacés, s'ils sont mal orientés ou si l'auteur connaît mal la structure du milieu, la forme et l'allongement des anomalies peuvent varier et l'interprétation hydrogéologique est faussée. D'autre part, les résistivités sont apparentes et l'interprétation physique des mesures est incertaine.

4.4 Avantages et inconvénients des différents dispositifs

Nous avons expérimenté les Sondages Electriques (SCHLUMBERGER), les profils de résistivité (traînés simples - profils à double longueur de lignes - rectangle) et le dispositif carré.

4.41 Le S.E. type SCHLUMBERGER.

a) Avantages :

Exécution rapide - coupe verticale des terrains - profondeurs approximatives des limites de terrain. Détermination des longueurs de lignes AB pour les profils de résistivités.

b) Inconvénients :

Le lissage des courbes entraîne des solutions différentes. A MOGTEDO, on peut choisir un modèle à 3 ou à 4 couches, chaque modèle donnant 3 solutions différentes. Pour les 6 solutions offertes, le toit de la roche saine varie de 14,4 à 46 mètres.

Principe d'équivalence : il est difficile de distinguer deux terrains résistants de résistivités et d'épaisseurs différentes si leur résistance transversale est la même. Même chose pour deux terrains conducteurs si leur conductance est la même.

Principe de suppression : si une couche a une résistivité intermédiaire entre les résistivités des terrains encaissants, elle peut n'avoir aucune influence sur la courbe du sondage électrique, si son épaisseur est insuffisante.

C'est souvent le cas pour la zone fissurée située entre l'altération et la roche saine fracturée.

Il existe une différence entre le modèle théorique choisi pour l'interprétation et le modèle réel anisotrope et hétérogène.

Il semble préférable d'orienter le S.E. parallèlement à la direction de fissuration.

Pour les poches altérées, cette orientation diminue les effets latéraux.

4.42 Profils de résistivités

a) Avantages :

La mise en oeuvre des traînés est rapide - le rectangle permet de tracer de bonnes cartes de résistivités apparentes - les profils à double longueur de ligne tiennent compte de l'influence d'une couverture conductrice. La localisation de la trace d'une fracture repérée par photo-interprétation est rapide.

b) Inconvénients :

Les résistivités ne sont qu'apparentes.

Le rectangle est long à mettre en oeuvre et coûteux pour une grande surface : il indique seulement les directions des anomalies, mais précise mal la nature des anomalies.

Le traîné seul doit être réservé à la prospection régionale ; c'est le procédé qui entraîne le plus d'erreurs d'interprétation, en particulier dans les régions présentant une couverture altérée non homogène.

Les variations de résistivités apparentes sont peu marquées au niveau de la zone fissurée. La recherche des fractures se fait, en général, indirectement en localisant les poches altérées ; mais leur présence entraîne des difficultés d'interprétation qui peuvent être partiellement levées en utilisant des profils à deux longueurs de ligne. La mise en oeuvre est plus lourde mais les résultats sont meilleurs.

c) Recommandations :

Les profils de résistivités seront orientés perpendiculairement à l'allongement des structures et des fractures. Les anomalies retenues doivent être vérifiées par un S.E.

Les petites et grandes longueurs de lignes sont définies par des S.E. préalables.

4.43 Dispositif carréa) Avantages :

Le problème de "l'embrayage" (lissage des courbes) ne se pose pas. On a moins de câble à dérouler pour une profondeur d'investigation identique avec ce dispositif qu'avec le système SCHLUMBERGER. Le coefficient d'allongement (anisotropie) est plus élevé.

La direction d'anisotropie correspond à la direction de la fissuration ouverte.

Le coefficient d'anisotropie est proportionnel à la densité de fissuration.

La série de mesures donne la valeur de la résistivité moyenne apparente.

La variation du coefficient d'anisotropie avec la longueur de la ligne enseigne sur l'état de la fissuration avec la profondeur.

La lecture du diagramme donne directement la direction et la densité relative de la fissuration.

La détection de l'orientation des fractures est aisée dans les régions où les observations de surface sont impossibles.

b) Inconvénients :

Le dispositif carré croisé est long à mettre en oeuvre. Le dispositif carré simple est aussi rapide à effectuer qu'un S.E classique. Un profil de carrés simples demande le même travail qu'un profil à deux longueurs de lignes.

Le coefficient d'anisotropie diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du recouvrement, avec l'inclinaison du plan d'anisotropie par rapport au plan de fissuration. Il augmente si le terrain présente une alternance de couches conductrices et résistantes.

L'emploi de la résistivité moyenne obéit aux mêmes limites énoncées pour les cartes de résistivités apparentes (rectangle - traîné).

Tous les paramètres obtenus sont "apparents"

Il est nécessaire de choisir correctement la longueur de ligne. Méthode très prometteuse mais pas encore assez éprouvée.

c) Recommandations :

Ce dispositif semble particulièrement adapté au milieu fissuré. Il mérite d'être expérimenté sur les roches cristallines bien au-delà de nos manipulations sur les sites étudiés.

4.5 Méthode pratique

Que ce soit à l'échelle du site ou à l'échelle régionale, la prospection géophysique par méthode électrique se résume presque toujours à des profils simples de résistivité, précédés et suivis par quelques Sondages Electriques. Cette méthode simple et rapide n'a d'efficacité que si la géophysique retrouve la trace d'une fracture décelée par la photo-interprétation. Au niveau de l'interprétation, trop de doutes subsistent pour que cette méthode soit satisfaisante, en particulier s'il existe un recouvrement conducteur non homogène (altération). Cette dernière contrainte peut être minimisée en utilisant les profils de résistivité à double longueur de ligne.

Le sondage électrique par dispositif carré, simple ou croisé, semble particulièrement adapté au milieu fissuré, en introduisant des paramètres spécifiques tels que la direction et l'intensité de la fissuration. On conçoit le grand intérêt d'une carte mentionnant ces paramètres ; la carte étant dressée à partir de profils de mesures utilisant le dispositif carré.

Pour une prospection à l'échelle régionale, destinée à localiser les couples "poches d'altération - grande fracture drainante" il faut d'abord implanter quelques sondages électriques (SCHLUMBERGER) afin de déterminer les longueurs de ligne à utiliser.

Si l'observation par photo-interprétation ou de surface est impossible les S.E. sont remplacés par des dispositifs carrés qui donnent à la fois les longueurs de ligne et les directions de la fracturation.

Exécuter ensuite plusieurs profils de résistivités à deux longueurs de ligne d'envoi de courant. Les profils sont perpendiculaires à la direction de fracturation donnée par la photo-interprétation ou le dispositif carré.

Terminer avec des S.E. classiques implantés sur les anomalies relevées sur les profils.

La précision dépend de l'écartement des profils et du pas de mesure. Au niveau de la reconnaissance régionale, la faible densité des points de mesure entraîne des risques d'erreurs élevés en raison de la très forte hétérogénéité du milieu fissuré.

A partir des conclusions de cette étude, et toujours en fonction du couple altération-fracture (ou alluvion, ou sable - fracture), délimiter les zones à étudier plus en détail.

Pour l'étude détaillée à l'échelle locale, il est important de localiser avec précision les fractures ouvertes. Quelques sites de dispositif carré croisé avec 2 ou 3 longueurs de ligne permettent de déterminer les directions de fissuration ouvertes qui ne sont pas nécessairement celles décelées par les traînés.

Un sondage carré croisé avec, au moins, une quinzaine de mesures donne les longueurs de lignes à utiliser pour la suite des travaux.

Suivant l'objectif et le budget disponible, on peut envisager un profil de sondages utilisant le dispositif carré croisé. Opération assez lourde mais riche en enseignements ; elle aboutit à une carte de directions et de densité de la fissuration et à une carte de résistivité moyenne.

Un profil avec des dispositifs carré simple donne de bons résultats pour une mise en oeuvre bien plus légère. Cette opération est aussi rapide qu'un profil avec les doubles longueurs de ligne plus classique. Nous déconseillons les profils simples. L'étude se termine avec quelques sondages électriques (SCHLUMBERGER) placés sur les sites retenus.

5 - ANALYSES ISOTOPIQUES

5.1 Généralités

L'eau pompée se renouvelle-t-elle ? On est tenté, en utilisant les traceurs naturels, de savoir si l'eau extraite de l'aquifère, provient de réserves anciennes ou si elle est récemment infiltrée.

Le débit d'exhaure résulte de l'induction de fractures principales qui sont le siège de circulations rapides et de l'apport d'un débit retardé issu de fractures secondaires à circulations plus lentes et du drainage d'un milieu poreux (altération).

L'analyse d'échantillons d'eau prélevés à différents stades de l'essai de pompage devrait mettre en évidence ces apports différentiels et contribuer à la connaissance de la structure du milieu et du cycle de l'eau.

Les éléments analysés sont en général l'Oxygène 18 et le Tritium.

Très peu d'expériences ont été réalisées dans les roches cristallines.

La méthode consiste à prélever mensuellement sur un cycle hydrologique :

- . les eaux de pluies (fonction "entrée")
- . l'eau contenue dans l'altération ; l'eau infiltrée se concentre sous l'effet de l'évapo-transpiration
- . l'eau de forages implantés sur des fractures

L'analyse isotopique est complétée par une analyse physico-chimique.

5.2 Expérimentation sur les sites de MOGTEDO et de ZIGLA*

Profitant des essais de pompage, nous avons prélevé 18 échantillons d'eau à MOGTEDO et 20 à ZIGLA, au début, à la fin et en cours de pompage.

Les résultats ne sont pas démonstratifs.

- . Le "signal entrée" est mal connu, car pendant la période des essais, la pluie faisait défaut et l'analyse a été réalisée sur un échantillon prélevé longtemps à l'avance à Ouagadougou.
- . La concentration dans la zone altérée n'a pu être observée que dans un seul piézomètre et sur un seul site.

* Etude effectuée gracieusement hors convention.

- . Au niveau de la zone fracturée, les données sont nombreuses mais les résultats ne sont pas significatifs car les variations des teneurs en O 18 et Tritium sont très faibles.

En cours d'essai de pompage, on ne peut savoir si dans la zone noyée les eaux ont des temps de séjour différents

- . soit le temps de pompage a été insuffisant pour induire tout le système aquifère, ce qui ne semble pas le cas
- . soit l'eau des micro-fissures et celle des drains principaux sont peu différentes.

Cette manipulation apporte peu sur la connaissance de la structure et du fonctionnement hydrodynamique du milieu fissuré.

Les résultats ne mésestiment pas l'intérêt de cette expérimentation qui devrait être reprise avec un équipement supplémentaire pour les observations dans la zone altérée avec des prélèvements sur un cycle hydrologique.

6 - ANALYSE STATISTIQUE SUR LA RELATION ENTRE LES CARACTERISTIQUES DES FORAGES ET LE TYPE DE FRACTURES.

6.1 Généralités

Pour une zone morphoclimatique donnée, la variabilité des résultats d'un forage à l'autre est due essentiellement aux caractéristiques de la fracture induite par l'ouvrage.

L'analyse des résultats de campagnes de forages n'a pas donné de conclusions significatives en raison :

- . du manque de données exploitables. Les documents mentionnent rarement des relevés de fractures qu'il faut rechercher dans les archives . De nombreuses "fractures" sont souvent déduites d'anomalies décelées par la géophysique et dont on ne connaît ni la nature, ni la longueur ni l'orientation.
- . du faible nombre d'observations ; les données de la Haute-Volta et du Mali, pas encore assez nombreuses, ont été collectées. Mais nous n'avons pas eu accès aux archives de la Côte d'Ivoire qui ne sont pas encore disponibles.
- . de la variabilité des directions des contraintes tectoniques sur de faibles distances, qui interdit de généraliser une observation à l'échelle régionale. Si les directions des fractures sont relativement constantes, leur fréquence et surtout leur état (fermée ou ouverte) sont très variables (MOGTEDO et ZIGLA en Haute-Volta). Des fractures de même direction peuvent avoir des comportements hydrauliques inverses.

6.2 Principaux résultats

Pour la raison énoncée ci-dessus, il serait dangereux de vouloir dégager une généralisation relative à la productivité des fractures en fonction de leur direction.

D'après les données sur la Haute-Volta, le Mali, le Togo et le Bénin (Réf. bibliographiques : 1° Tome : 34 - 35 - 36 - 37 - 67 - 78 - 83 - 109 - 151 - 258 : Etude 2ème phase : 8 - 11 - 13 - 17) des directions de fracturation sont plus fréquentes que d'autres.

Parmi les fractures ouvertes, la direction N20 - N30 est la plus fréquente (22 à 25 %) ; il ne faut pas la confondre avec la direction NS qui a des comportements variables suivant les régions (3 % à 20 % des fractures productrices). N45° est citée plus souvent que N65-70 (respectivement 18 % et moins de 10 %).

Les directions cumulées NS à NE-SO représentent plus de 60 % des fractures productrices.

Les autres allongements intéressent à des degrés moindres : E-O et N140 - N160 donnent localement satisfaction.

Les directions N110 - N120 et N130 sont certainement les plus défavorables.

- . En Côte d'Ivoire, le choix s'effectue uniquement d'après la longueur et la largeur des fractures. La direction d'allongement n'est pas prise en considération.
- . Les alignements morpho-structuraux repérés sur les photographies aériennes ne sont pas que des fractures. Des filons s'observent dans diverses directions ; leur compétence entraîne une fissuration multiple, transverse à la direction d'allongement qui est en compression. C'est l'exemple de MOGTEDO où la direction "fermée" est productrice. Les filons se sont mis en place suivant les directions d'allongement des structures (en général N40 à 60° soit NE-SO, mais la direction N-S est fréquente).
- . En Haute-Volta (Comtec 1976), sur 27 sites retenus après prospection par géophysique électrique, 16 allongements décelés par la géophysique correspondent aux directions structurales (foliation en général pour les "granito-gneiss"), 7 à la direction des filons, 2 à celle des failles caractérisées et 4 à des anomalies non définies.
- . L'exploitation des cartes de "fracturation" doit aboutir à une répartition similaire si elle n'est pas orientée par une analyse micro-structurale du terrain.

Ainsi, la photo-interprétation, en assimilant des phénomènes divers à une "fracture", offre dans son imprécision un choix plus grand d'anomalies ayant un intérêt hydraulique.

7 - RESUME DES RESULTATS ACQUIS LORS DES TRAVAUX SUR LES SITES EXPERIMENTAUX

Etudes et travaux	ZIGLA	MOGTEDO
<u>Photo-interprétation</u>		
Echelle 1/50 000	N065 = fractures ouvertes N105 = foliation - fermée	N060 = foliation - fermée N110-120 = fermée
Echelle 1/20 000	N020-030 = ouvert N000-010 et N040-055 = ouv. N090-100 = ouvert N110-120 = fermé	N060 = foliation - fermée N105 = ouvert N120 = fermé N150 = fermé
<u>Analyse microstructurale</u>		
Fractures ouvertes profondes	N020-030 - Maille métrique N060-080 - Maille décamétrique	N020-030 - Maille métrique N150-170 - Maille décamétrique
Fractures ouvertes superficielles	N000-010 ; N090-100 N040-055 ; N130-150	N000-010 N090-100
Fractures profondes fermées	N080-095 (foliation)	
Fractures superficielles fermées	N150-170 ; N110-120	N060-080 ; N110-120
<u>Système aquifère</u>		
Niveau supérieur poreux : (altération)	granito-gneiss 18 m d'altération saturé sur 12 m porosité utile : 2 à 5 % perméabilité : 2.10^{-5} m/s 80 % de la réserve utile	filon grano-diorite dans roche foliée 15 à 20 m d'altération saturé sur 0 à 6 m. Rôle faible les roches foliées ont un rôle capacitif
Niveau intermédiaire : (zone fissurée)	2 à 6 m d'épaisseur porosité utile 1 à 2 % 16 % de la réserve utile	quasi inexistant
Niveau inférieur : (roche fracturée)	épaisseur moyenne 30 m base vers - 41 m porosité utile 0,1 à 0,2 % 3 % de la réserve utile	filon de 10 à 20 m de large base de l'aquifère - 40 m
Niveau statique/sol	- 7 m	- 14 m
Débit exploitable m ³ /h	5	1,5
Rayon d'influence	500 m en 1 an	
Alimentation de l'aquifère	1,6 fois le volume exploitable	
Hydrodynamique	Multicouches, semi-infini, hétérogène, multifissuré à anisotropie masquée	Anisotropie très marquée dans la direction N050 avec écoulements transv. N020 et N160 au sein du filon

<p><u>Géophysique</u></p> <p>Sondage électrique Schlumberger</p> <p>Trainé simple</p> <p>Rectangle</p> <p>Profil à deux longueurs de ligne</p> <p>Dispositif carré</p>	<p>Erreurs < 13 % sur les profondeurs</p> <p>MN = 20 m - anomalies peu marquées</p> <p>MN = 20 m - carte des résistivités anomalies N040 et N090-100</p> <p>bonne précision sur les épaisseurs</p> <p>anisotropie marquée suivant les directions N022-045-060 100-130</p>	<p>Problème du lissage des courbes</p> <p>Erreurs de 10 à 30 % sur la profondeur</p> <p>MN = 20 m - peu significatif</p> <p>MN = 10 m - anomalies plus nettes N045°</p> <p>meilleure précision</p> <p>anisotropie très marquée suivant N005-022-160</p>
<p><u>Conclusions :</u></p>	<p>Photo-interprétation : 1/50 000 et 1/20 000 complémentaires.</p> <p>Concordance avec l'analyse de terrain qui est complémentaire.</p> <p>Concordance des méthodes géophysiques "classiques" avec la photo-interprétation et du dispositif carré avec l'analyse microstructurale</p> <p>Relative homogénéité hydrodynamique concordant avec la multi-fissuration soulignée par l'analyse structurale et les nombreuses directions décelées par le dispositif carré.</p>	<p>Désaccord photo/microstructure expliqué par l'hydrodynamique. Circulations transverses dans un filon allongé suivant une direction en compression.</p> <p>Anisotropie marquée (moins de directions fissurées - fréquences plus faibles - filon).</p> <p>Méthodes géophysiques "classiques" décelent les grandes structures dont certaines sont fermées.</p> <p>Le dispositif carré souligne les directions <u>ouvertes</u>.</p>

Complément bibliographique à l'étude

"Méthode d'étude et de recherche de l'Eau Souterraine des roches
cristallines de l'Afrique de l'Ouest"

de Février 1978

- 1 - Albert P. - Jaisson J. - Marion h., 1959 : Etude de l'écoulement radial circulaire dans un milieu fermé hétérogène.
Revue I.F.P. - XIV n° 4-5 pp. 560-588.
- 2 - Boulton N.S. - Streltsova T.D., 1978 : Unsteady Flow to a Pumped Well in a fissured aquifer with a free surface level maintained constant.
Water Resources Research - Vol. 14 n° 3 - Juin 1978 - pp. 527-532.
- 3 - Bro M. - Hubert C., 1978 : Synthèse sur l'emploi des techniques géophysiques appliquées aux recherches d'eau dans les fractures du Mali.
C.G.G. - 13 p.
- 4 - Burgeap, 1977 : Etude des ressources en eau souterraine du Massif granitique de Fougères - Rapport de fin d'études - D.D.A. Ille et Vilaine.
- 5 - C.G.G., 1978 : Volta Blanche - Etude par traîné et S.E. - 5 p.
- 6 - Choukroune P. - Delair J., 1976 : Un modèle cinématique de la fracturation liée au plissement concentrique : l'exemple des Petites Pyrénées.
Bull. Soc. Géol. de France, 1976 (7) t XVIII n° 6 - pp. 1591-1597.
- 7 - D.D.A. Morbihan, 1978 : L'Eau Souterraine dans le Morbihan.
- 8 - Géomines LTEE, 1975 : Recherches Hydrogéologiques dans les cercles de SAN et TOMINIAN - Rep. Mali - Dir. Hyd. et de l'Energie
- 9 - Gringarten A.C. - Bertrand L., 1978 : Détermination des caractéristiques Hydrauliques des aquifères fissurés par pompages d'essai en régime transitoire -
B.R.G.M. Orléans - 32 p. - 18 figures.
- 10 - Guiraud A., 1976 : Sur la présence des nappes aquifères dans le socle précambrien de l'Afrique Intertropicale - 4e Réunion -
Sc. de la Terre - Soc. Géol. de France - Avril 1976.
- 11 - Iwaco B.V., 1978 : Reconnaissances Géophysiques et Hydrologiques des blocs de Manga-Est et de Sondre-Est. DITH - AVV - Ouagadougou (Haute-Volta).
- 12 - Mabillot A., 1971 : Les forages d'eau - Crépines Johnson - 237 p.

- 13 - Ousmane Boureima, 1978 : Contribution à l'étude hydrogéologique des régions de socle du Sahel : l'hydrogéologie du Damagaram Occidental (environs de Zinder - Niger) - Thèse USTL Montpellier - Labo. Hydrog. 66 p.
- 14 - Plote H. - Martin G., 1974 : Recherches hydrogéologiques dans les cercles de Kayes et de Yelimane - B.R.G.M. - Rep. Mali - Dir. Hydr. et de l'Energie - 74 DAK 002.
- 15 - Raynaud S. - Delair J., 1978 : Genèse et mécanismes de la rupture fragile dans un calcaire et un granite soumis à un champ naturel de contrainte en compression. Bull. B.R.G.M. (2e série) Sect. IV - n° 1 - 1978 pp. 39-47.
- 16 - Setzer J., 1964 - Fraturas observadas em fotografias aereas e sua significação hidrogeologica - Bol. Soc. Bras. Geol. V 13 - n° 1-2, 1964 - pp 55-60
- 17 - Simonot M., 1978 : Etude des Eaux souterraines dans la vallée de la Bougouriba - A.V.V. Ouagadougou - PNUD.
- 18 - Streltsova T.D. - Adams, 1978 : Well Hydraulics in heterogeneous aquifer formations - p. 357 - 423 (Water Resources)
- 19 - Trinquard : Carte géologique au 1/200 000 de Tenkodogo - Haute-Volta
- 20 - Van der Meer Mohr, 1978 (?) : Fracture analysis from aerial photographs pp. 59-61
- 21 - Van Wyk W.L., 1961 : The selection of boring sites for water by means of the electrical resistivity method on Stormberg lavas - Zululand Natal - Conf. Interafricaine sur l'Hydrologie - C.C.T.A. Nairobi - pp. 399-404.



ANNEXE I

STRUCTURE DES AQUIFERES FISSURES

EN MILIEU CRISTALLIN

**Etude Microstructurale et Photogéologique
de Zigla et Mogtéo**

par J.C. GRILLOT

STRUCTURE DES AQUIFERES FISSURES EN MILIEU CRISTALLIN *

SITES DE MOGTEDO ET DE ZIGLA

RESUME

1. INTRODUCTION

2. ANALYSE STRUCTURALE EN MILIEU CRISTALLIN

- 2.1 Méthodologie d'étude sur le terrain
- 2.2 Contexte de l'étude
- 2.3 Identification quantitative de la fracturation
- 2.4 Identification qualitative de la fracturation
- 2.5 Synthèse des observations microtectoniques

3. FRACTURATION A L'ECHELLE PHOTOGEOLOGIQUE

- 3.1 Site de Zigla
- 3.2 Site de Mogtedo

4. CONCLUSIONS

* Cette étude a été effectuée par M. JC GRILLOT, Hydrogéologue, Maître-Assistant au Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc - Montpellier - France.

RESUME

Des mesures et analyses de terrain, réalisées sur deux sites (MOGTEDO et ZIGLA), ont permis d'appréhender la structure d'une zone où affleure le socle cristallin (migmatites foliées).

Sur le plan tectonique, deux états de contrainte en compression, le dernier s'étant manifesté en deux temps de serrage, ont façonné la structure du milieu, dont la mise en place et les jeux en ouverture d'accidents coulissants. Les caractéristiques de ces derniers (maille et ouverture) laissent entrevoir, sur le plan hydraulique, le rôle majeur de certains joints.

Dans le secteur de MOGTEDO, on distingue ainsi principalement :

- . des joints N020-N030, à maille métrique et à ouverture décimétrique. Leur jeu en décrochement-écartement senestre permet de leur attribuer un rôle hydraulique prépondérant à l'échelle d'un captage et de sa zone d'influence,
- . des joints N150-N170, à maille décamétrique, voire hectométrique et d'ouverture métrique. Leur jeu en décrochement-écartement dextre laisse penser que leur fonction hydraulique est dominante à l'échelle du système aquifère.

Dans le secteur de ZIGLA, les mêmes caractéristiques concernent respectivement les joints N020-N030 (décrochement-écartement dextre) et des fractures N060-N080 (décrochement-écartement senestre).

La confrontation de ces données structurales avec des relevés de fracturation réalisés à partir de clichés aériens (échelles du 1/50 000e et du 1/20 000e) permet d'identifier ces champs de fractures et de préciser leur sens hydrogéologique. Il ressort ainsi que si, dans le secteur de ZIGLA, les deux échelles sont complémentaires et autorisent une sélection des joints au rôle hydraulique probable, par suite de conditions géodynamiques externes différentes (qualité des affleurements), elles ne conviennent que très partiellement dans le secteur de MOGTEDO.

Il s'ensuit que le choix des échelles d'observation photogéologique est étroitement dépendant des caractéristiques structurales visibles sur le terrain et des conditions d'affleurement. Néanmoins, la prospection hydrogéologique basée sur la structure du milieu fissuré ne saurait se passer des deux méthodes d'analyse qui sont insécables et complémentaires.

1 - INTRODUCTION

La prospection hydrogéologique en milieu fissuré - qu'il soit carbonaté ou non - tend de plus en plus à s'appuyer sur une définition géométrique du magasin aussi précise que possible.

En effet, dans ce type de réservoir aquifère, les fractures conditionnent essentiellement, de par leurs caractéristiques (longueur, direction, pendage, maille, degré d'ouverture), les propriétés hydrodynamiques du système.

Dans les roches cristallines, de récents progrès dans le domaine hydrogéologique ont été réalisés grâce à une approche photogéologique de la structure du magasin :

- . repérage d'alignements subrectilignes assimilés, mais le plus souvent de façon subjective, à des joints de rupture,
- . recherche de points d'intersection, noeuds, couloirs de fractures,
- . localisation de zones broyées.

De fait, l'implantation, au droit de ces zones, de forages se révélant productifs dans une forte proportion, a montré que la méthode prospective utilisée était efficace, sinon prometteuse.

Toutefois, en l'absence d'une définition objective de la structure (identification des véritables joints de rupture, de leur nature, ...), il est hasardeux d'établir une relation entre "fracturation" extraite de la photo-interprétation et hydraulicité du milieu, car le comportement hydrodynamique d'un aquifère fissuré peut être très différent selon que l'on s'intéresse :

- . soit à un volume de roche relativement réduit (cas d'un captage et de sa zone d'influence),
- . soit au système lui-même considéré en tant qu'unité hydrologique.

Autrement dit, l'identification sur le terrain, des réseaux de discontinuités, apparaît indispensable tant dans la perspective d'une interprétation rationnelle des champs de fractures que dans l'idée de mieux appréhender les propriétés hydrauliques de l'aquifère.

C'est dans cet esprit qu'un travail d'analyse a été effectué sur le socle africain (République de Haute-Volta) et dont les résultats sont exposés ci-après.

2 - ANALYSE STRUCTURALE EN MILIEU CRISTALLIN

Deux sites ont été retenus (MOGTEDO et ZIGLA), offrant tous deux les conditions suivantes :

- . l'essentiel du matériel - reconnu par ailleurs aquifère - est formé par des roches granitoïdes où dominant des miigmatites foliées,
- . le milieu est intensément fissuré,
- . l'étude photo-interprétative (M. ENGALENC) a pu être réalisée à deux échelles : 1/50 000e et 1/20 000e,
- . les affleurements, en général sous forme de dômes ou de bandes discontinues, y sont relativement fréquents.

2.1 Méthodologie d'étude sur le terrain

Les différentes mesures faites sur le terrain visent deux objectifs :

- . identifier la fracturation de façon quantitative : il s'agit, pour chaque station retenue, d'opérer un comptage des joints de rupture en fonction de leur direction, de leur maille, de leur degré d'ouverture et de leur pendage. Cet ensemble de caractéristiques permet alors de représenter, sous forme de polyèdres élémentaires, l'unité de fracturation pour chacune des stations et de visionner la fréquence directionnelle des joints (séparation en familles) sur l'ensemble du secteur,
- . identifier la fracturation de façon qualitative : l'intérêt se porte ici sur la genèse des joints et leur évolution mécanique éventuelle (stades successifs d'ouverture et de fermeture). Les méthodes utilisées ont pour base l'observation et le relevé dans l'espace de toutes les microstructures tectoniques dont le traitement, à la fois statistique et géométrique (diagrammes tectoniques), permet, dans bon nombre de cas, de reconstituer les états de contrainte (détermination directionnelle des axes principaux de déformation) subis par la roche.

Ces méthodes nécessitent cependant, de par l'utilisation statistique des données, une répartition spatiale des points de mesure relativement homogène et un nombre de données important. Cela implique donc, en toute rigueur, que les affleurements soient bien entendus fréquents mais offrent aussi une bonne vision des structures dans l'espace ("surfaces structurales" et plans verticaux).

2.2 Contexte de l'étude

L'ensemble des conditions qui viennent d'être énoncées n'est que partiellement respecté sur les deux sites étudiés, car une certaine hétérogénéité existe aussi bien dans la répartition géographique des affleurements que dans leur superficie et leur qualité. Sur ce dernier point, l'absence totale, à une exception près (site de MOGTEDO), de front de carrière, a rendu parfois délicate une analyse de la fracturation en profondeur.

Malgré ces limites, l'étude structurale a été rendue possible grâce à la présence de nombreux indices de déformation dus à des contraintes tectoniques et à l'intense fracturation affectant le matériel granitique.

2.3 Identification quantitative de la fracturation

2.31 Site de ZIGLA

Onze stations de mesures ont été retenues (localisation sur la carte photo-interprétative au 1/20 000e). Pour chacune d'elles (figure 10), un ou plusieurs polyèdres élémentaires ont été construits (macro et microfracturation) représentant l'unité de fracturation.

Pour l'ensemble du secteur, les joints de rupture s'organisent selon de nombreuses directions qui sont, par ordre décroissant de fréquence d'apparition :

- . N060-N080, N000-N010 et N020-N030
- . N110-N120
- . N150-N170 et N090-N100
- . N040-N055 et N130-N150*

Tous ces joints n'ont pas les mêmes caractéristiques. On peut ainsi observer que :

- 1) Ils ne sont pas tous subverticaux. Certains d'entre eux (N090-N100 en particulier) s'individualisent en deux familles distinctes selon leur pendage :

- . soit subvertical
- . soit plongeant de 40 à 50° au SE.

En ce qui concerne ces fractures à faible pendage au SE, elles correspondent toujours à la direction de foliation des migmatites. Cette remarque aura par la suite son importance dans la reconstitution génétique des différents joints.

- 2) Leur ouverture en surface semble étroitement liée à leur maille : lorsque celle-ci est d'ordre décimétrique (cas des fractures N060-N080) l'ouverture est métrique. Si elle est d'ordre métrique, l'écartement du joint est décimétrique...

On ne peut toutefois extrapoler cette relation avec la même rigueur en profondeur car la corrosion de surface, donnant aux affleurements une allure typique en boule, déforme par excès l'ouverture réelle des joints.

* angle par rapport au Nord magnétique exprimé en degré. Rotation dextre.

Figure 10

IDENTIFICATION QUANTITATIVE DE LA FRACTURATION
SITE DE ZIGLA

Polyèdres élémentaires donnant l'unité de fracturation sur chaque station.

Avec :

a : macrofracturation (maille métrique, décamétrique ;
ouverture décimétrique à métrique).
Représentée en traits forts.

b : microfracturation (maille décimétrique ;
ouverture millimétrique à centimétrique).
Représentée en traits fins.

S₁ : Station de mesures

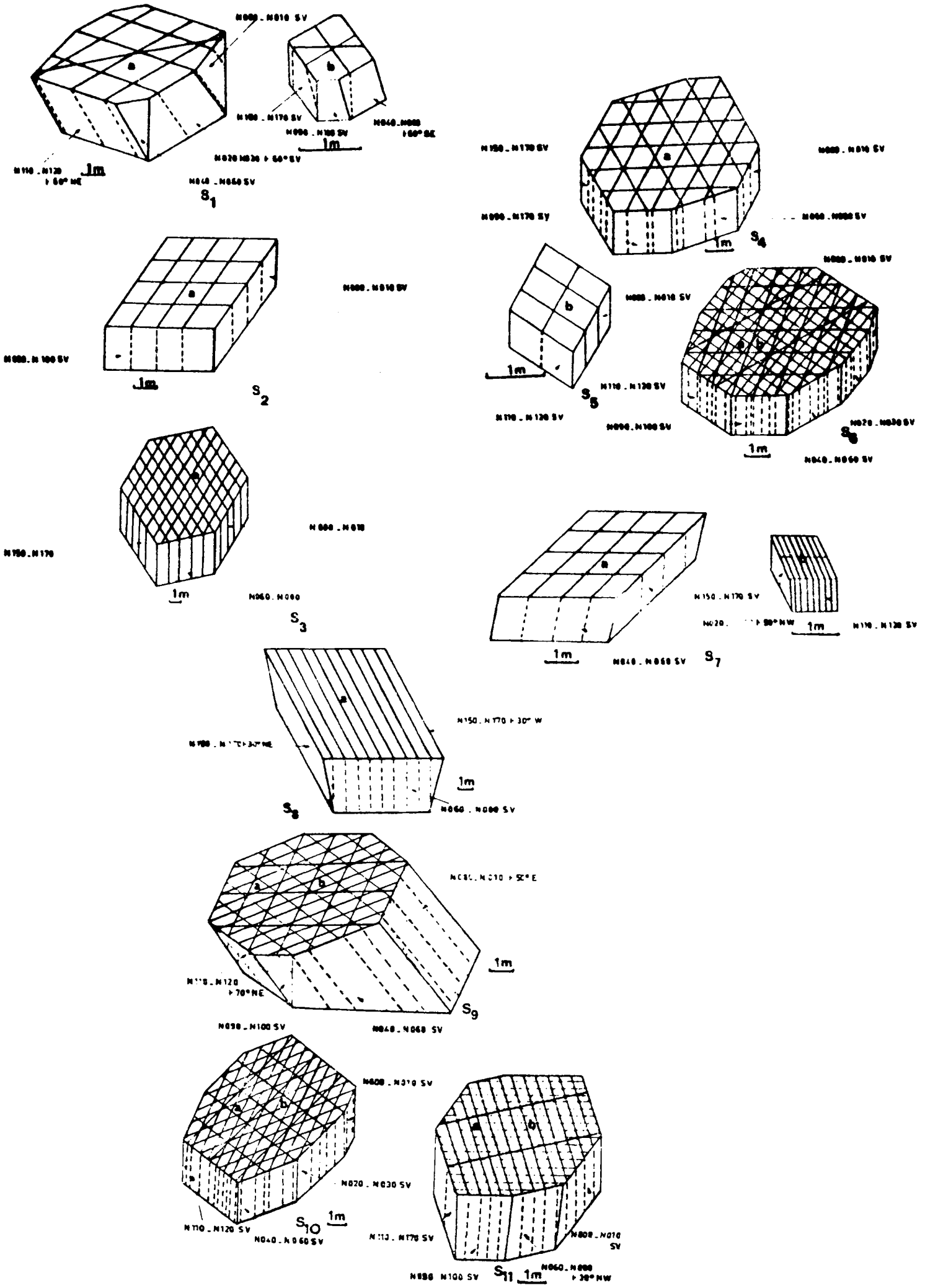
SV : Fracture sub-verticale (ex. : N 100 SV)

Remarque

La représentation par un bloc diagramme unique n'a pas été retenue en raison de :

- . la variabilité de la fréquence fissurale, malgré la constance des directions d'une station à l'autre
- . la répartition aléatoire des stations qui peut ne pas être représentative de la fracturation régionale.

Figure 10



- 3) Leur fréquence d'apparition est nettement différenciée selon les familles. C'est ainsi que les directions N060-N080, N000-N010 et N020-N030, sont prépondérantes (présentes respectivement sur 8 et 9 stations).

Il est même probable que, compte tenu des surfaces d'affleurement parfois inférieures à 100 m², la disparition sur quelques stations de la famille N060-N080 ne soit qu'apparente.

2.32 Site de MOGTEDO

Sur 12 stations analysées (figure 11 et cartes photo-interprétatives au 1/20 000e et 1/50 000e), l'arrangement directionnel des fractures est de même type qu'à ZIGLA, sauf que l'on note :

- . la disparition des joints N040-N055 et N130-N150,
- . une maille d'ordre décamétrique pour les joints N150-N170 et non plus N060-N080.

Comme sur ZIGLA, ces joints ont des caractéristiques différentes :

- 1) Une individualisation se fait en fonction de leur pendage, particulièrement pour les joints N150-N170, qui sont :
- . soit subverticaux,
 - . soit avec un faible pendage de 30° E ou W, s'organisant ainsi en fractures conjuguées.

Les joints N060-N080, quant à eux, ont toujours un pendage SE (40 à 50°) et correspondent à la direction de foliation.

- 2) L'ouverture est en surface, comme à ZIGLA, étroitement liée à la maille des fractures.
- 3) La fréquence d'apparition est nettement marquée ici selon les directions N020-N030, N000-N010 et N150-N170.

2.33 Synthèse des données qualitatives

Si les deux sites offrent à première vue une certaine constance dans l'organisation directionnelle de la fracturation, la fréquence et certaines caractéristiques de chaque famille sont variables d'un secteur à l'autre puisque l'on constate :

- 1) la disparition des familles N040-N055 et N130-N150 sur MOGTEDO.
- 2) une direction de foliation, soulignée par des joints de rupture, qui a tendance à s'infléchir vers une direction E-W de MOGTEDO vers ZIGLA. Toutefois, une direction constante de fracturation N060-N030 se conserve sur ZIGLA (qui correspond à la direction de foliation sur MOGTEDO), ce qui montre l'origine polygénétique de ces joints.

3) une famille de joints, à maille décamétrique et à ouverture métrique, s'individualise sur chacun des sites, mais dans des directions différentes :

- . N060-N080 sur ZIGLA,
- . N150-N170 sur MOGTEDO

4) deux familles ont des fréquences d'apparition identiques :

- . N020-N030,
- . N000-N010

Cette disparité dans la fréquence d'apparition des joints, qui se révèle même d'une station à l'autre, ne permet pas, en toute objectivité, de construire un bloc élémentaire fissural pour chacun des sites. Malgré ce, les joints peuvent être définis de la façon suivante :

MEGA FRACTURES

Elles découpent la roche selon des polyèdres de dimension métrique (figure 12); elles sont largement ouvertes en surface (de l'ordre décimétrique) et ont un pendage, dans l'ensemble, subvertical.

Les figures polygonales ainsi délimitées s'inscrivent à l'intérieur d'un système fissural à maille lâche (décamétrique) selon deux directions bien marquées :

- . N060-N080 (ZIGLA)
- . N150-N170 (MOGTEDO)

MICRO FRACTURES

A l'intérieur des polygones, il est fréquent d'observer une microfracturation (figure 13) d'ouverture millimétrique à centimétrique, dont la direction est souvent celle de la macrofracturation la plus développée sur la station.

Il y a donc, à l'échelle des affleurements, une hiérarchisation de la fracturation selon la maille des joints :

MAILLE DECAMETRIQUE :

Organisation simple donnant des couloirs de fractures (N060-N080 à ZIGLA ; N150-N170 à MOGTEDO).

MAILLE METRIQUE :

Organisation complexe de forme polyédrique incluant des joints dont la fréquence, d'une station à l'autre, n'a pas un caractère constant.

Figure 11

IDENTIFICATION QUANTITATIVE DE LA FRACTURATION
SITE DE MOGTEDO

Polyèdres élémentaires donnant l'unité de fracturation sur chaque station.

Avec :

- a : macrofracturation (maille métrique, décamétrique ;
ouverture décimétrique à métrique).
Représentée en traits forts.
- b : microfracturation (maille décimétrique ;
ouverture millimétrique à centimétrique).
Représentée en traits fins.

S₁ : Station de mesures

SV : Fracture sub-verticale (ex. : N 100 SV)

Remarque

La représentation par un bloc diagramme unique n'a pas été retenue en raison de :

- . la variabilité de la fréquence fissurale, malgré la constance des directions d'une station à l'autre
- . la répartition aléatoire des stations qui peut ne pas être représentative de la fracturation régionale.

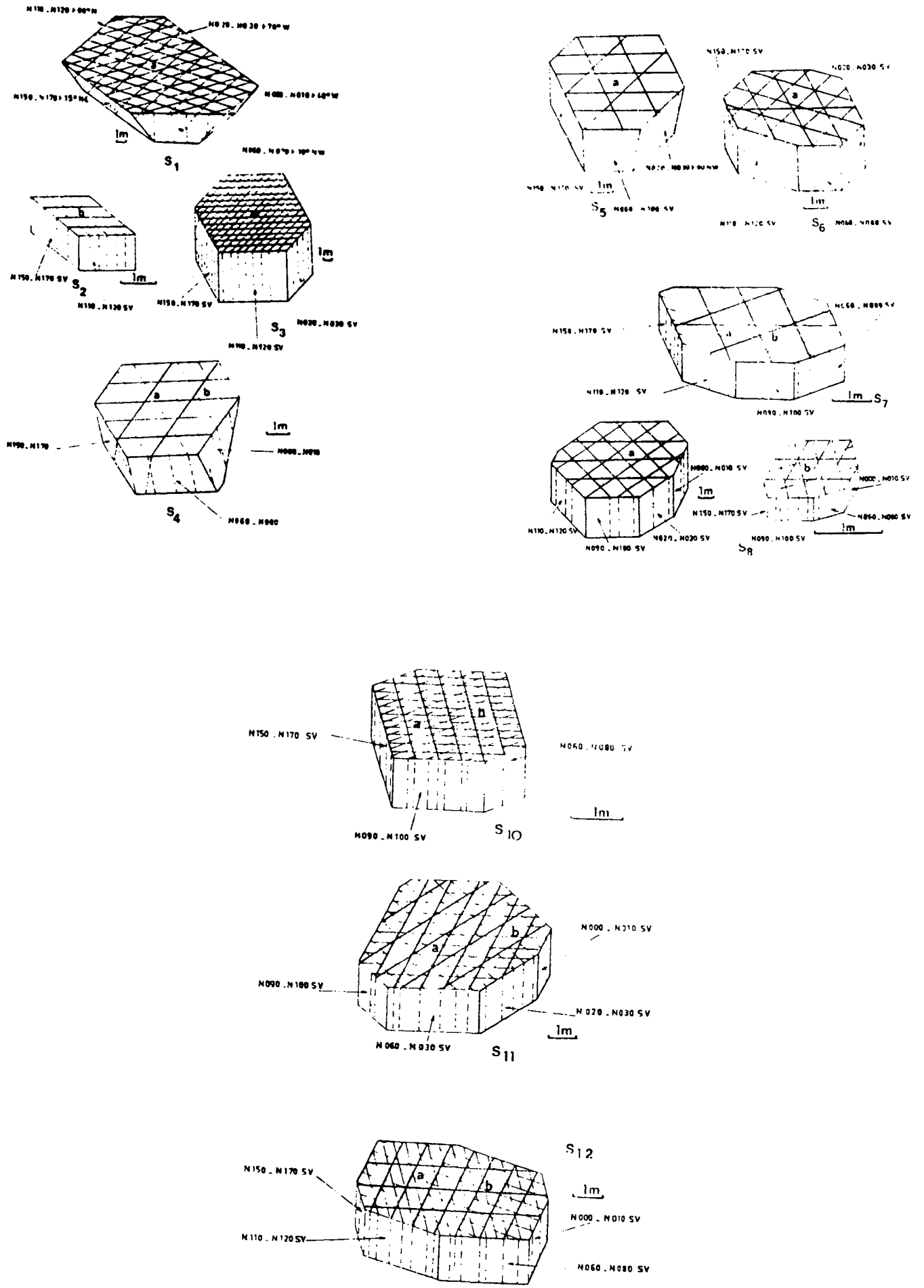


Figure 12

MACROFRACTURATION DES MIGMATITES



Exemple de découpage de la roche par une fracturation
de maille métrique et d'ouverture décimétrique.

(Site de MOGTEDO, station 9).

F = foliation

┊ = pendage

Figure 12

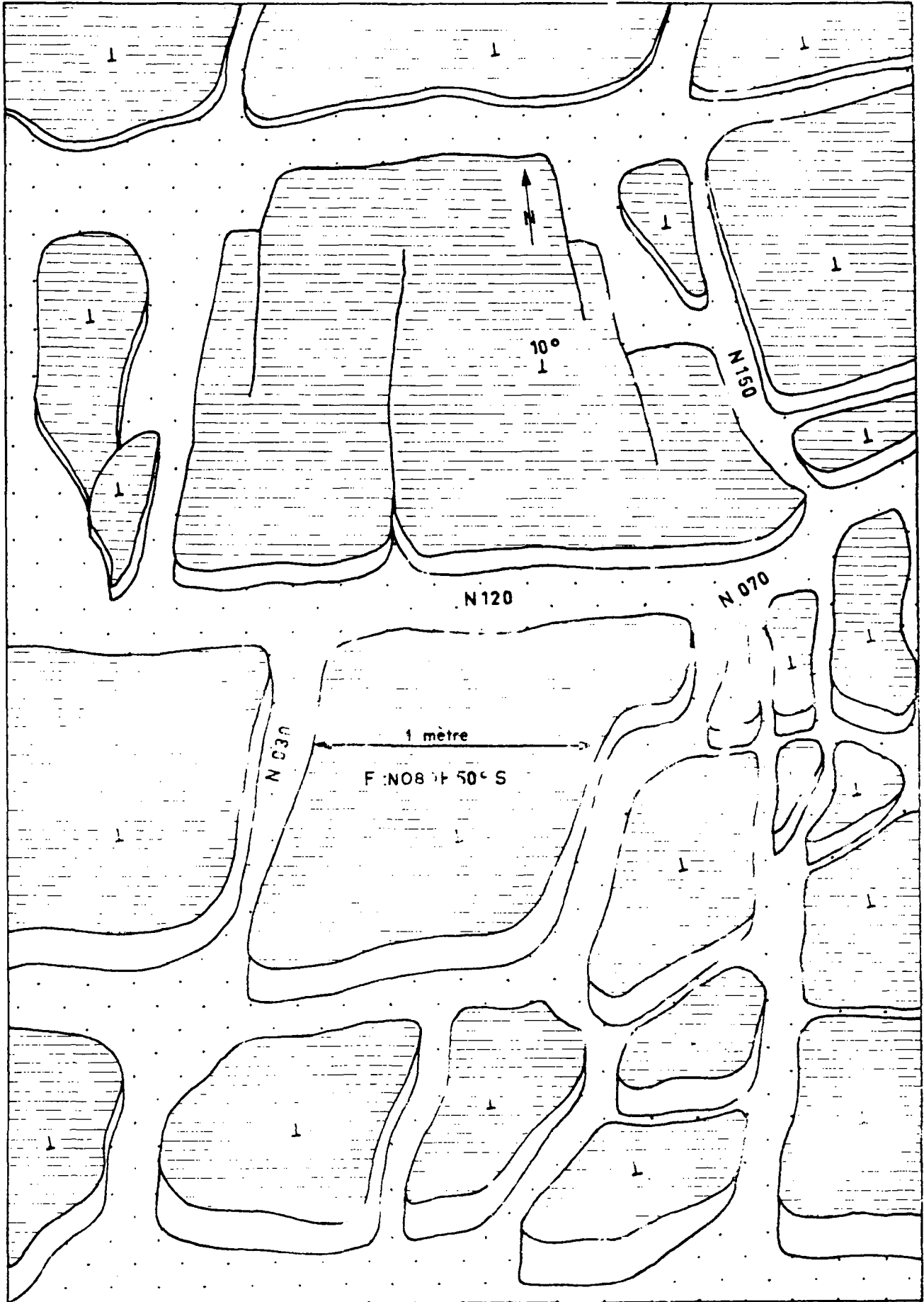


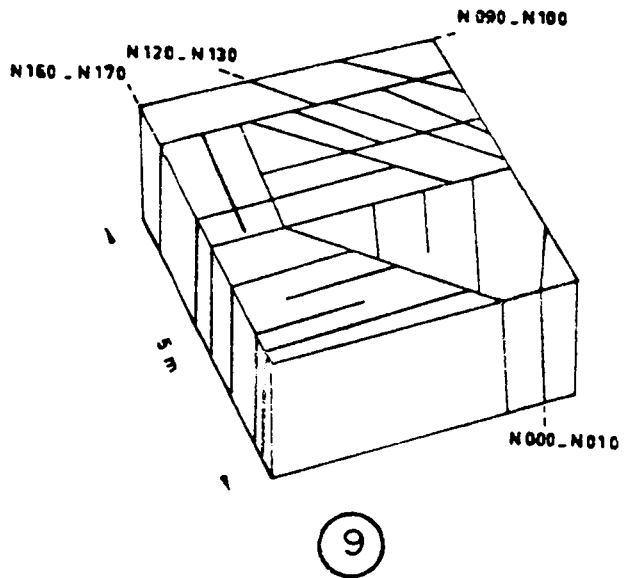
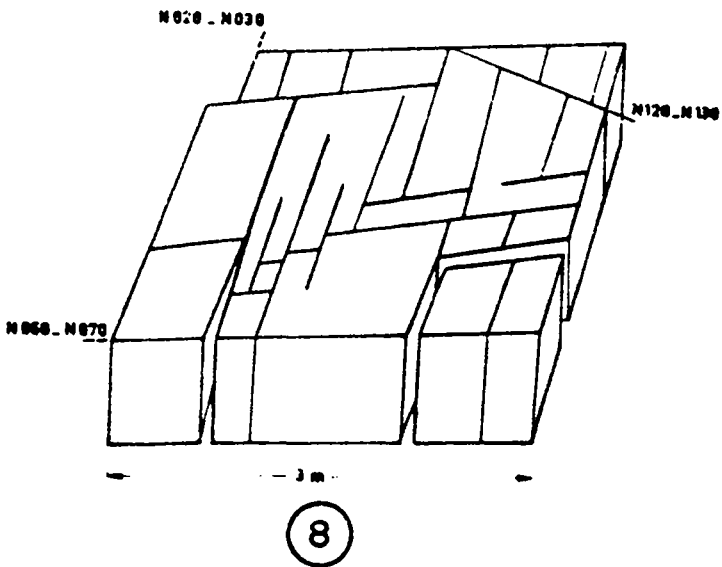
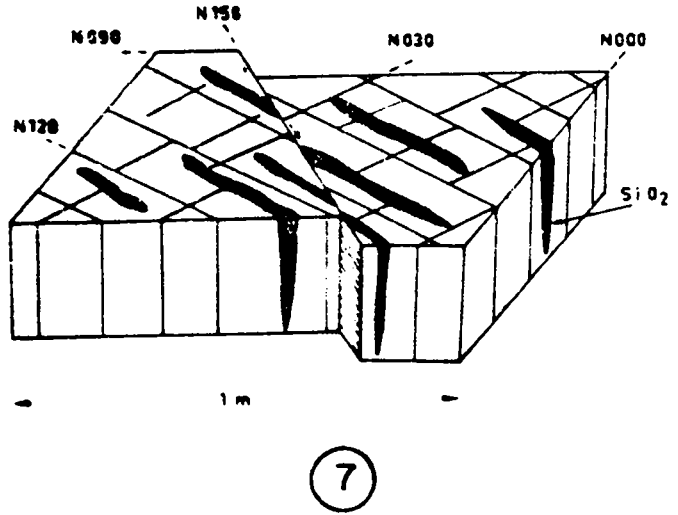
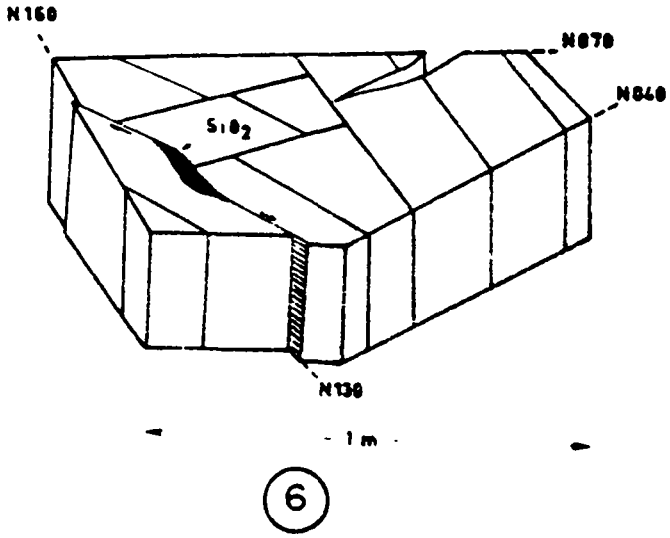
Figure 13

MICROFRACTURATION DES MIGMATITES

Exemples de microfracturation de maille décimétrique et d'ouverture millimétrique à centimétrique.

(Site de MOGTEDO, stations 6, 7, 8, 9).

Figure 13



MAILLE DECIMETRIQUE

Organisation tout aussi complexe de forme polyédrique mais qui se compose de joints de rupture en général représentés aux limites des polygones à maille métrique.

2.4 Identification qualitative de la fracturation

Sur de nombreuses stations (environ les 2/3), des indices microtectoniques dénotent une ou plusieurs mise sous contrainte de la roche :

- . microdécrochements (crochons et décalage de filons d'aplite et de quartz),
- . failles inverses avec stries de glissement sur miroirs quartzeux,
- . microfailles normales,
- . fentes de tension (à remplissage de quartz) dont les directions correspondent aux fractures à pendage subvertical.

Sur le plan pratique, ces indices, à l'échelle d'une station, ne permettent pas, le plus souvent, de donner une interprétation tectonique précise (reconstitution des champs de contrainte). En effet, pour prendre en exemple les microdécrochements, si ces structures sont relativement nombreuses, une seule population (soit dextre, soit senestre) représente à elle seule près de 90 % des microstructures d'une station. Aussi nous avons préféré compiler l'ensemble des données recueillies sur chacun des sites, afin de présenter un schéma évolutif tectonique applicable à tout le secteur étudié (figure 14). C'est pourquoi les diagrammes tectoniques classiques sont remplacés par des blocs-diagrammes synthétisant l'ensemble des mesures réalisées.

Deux observations sont à signaler avant toute étude de détail :

- 1) Sur tous les affleurements, la roche (migmatite) présente une foliation assez fortement replissée ; les plis ont de très petits rayons de courbure et des axes plongeant vers le Sud (50 à 60°) ; leur charnière ont des directions qui s'inscrivent dans la fourchette N010-N040.

Ces observations impliquent deux données structurales fondamentales :

- . la fracturation de la roche est postérieure à sa foliation. L'origine des joints n'est donc pas à rattacher à d'anciennes surfaces de refroidissement liée à la cristallisation du magma.
 - . au moins une contrainte compressive post-foliation a affecté le milieu.
- 2) Chaque fois que la roche est fracturée, toute direction de joints de rupture est accompagnée de fentes à remplissage quartzeux qui s'associent le plus souvent deux à deux en position suborthogonale. Il est donc permis de penser que la majorité des joints correspond à d'anciennes fractures nées en tension et non en cisaillement.

Un groupe de stations, sur le site de MOGTEDO (secteur de la Petite Suisse), est particulièrement intéressant du fait qu'il est possible de visionner les structures sur le plan vertical. On peut y analyser ainsi plusieurs événements tectoniques qui sont, par ordre chronologique :

- . Une phase compressive à raccourcissement probable N060-N080 (figure 14, bloc 5).

Cette phase induit des jeux en failles inverses sur les fractures de direction N150-N170 (pitch proche de 90°) et de pendage 30° E et W. Cette contrainte pourrait être responsable de certains microplissements observés au niveau de la foliation dont les plis, sur ces stations, ont une charnière subméridienne.

Le jeu en failles inverses est souligné par des remplissages de quartz le long des joints (stries de glissement), ce qui tendrait à prouver que ces joints, dans leur mise en place, sont anté-tectoniques (figure 14, bloc 2). Or, étant donné qu'ils ne peuvent être assimilés à d'anciennes surfaces de refroidissement (ils sont post-foliation), nous pensons qu'ils sont l'héritage, dans l'encaissant migmatique, de la mise en place en profondeur d'intrusions granitiques tardives et de leurs joints de retrait. Cette genèse expliquerait, comme nous l'avons signalé, que la fréquence directionnelle d'une famille de joints peut varier, voire s'annuler d'une station à l'autre.

- . Une deuxième phase compressive à raccourcissement N150-N170 (figure 14, bloc 6).

Cette contrainte est matérialisée par des failles inverses N060-N080, à pitch proche de 90°, qui recoupent systématiquement les accidents de même nature N150-N170.

Ici les fractures N060-N080 ne se surimposent pas à un état fissural précoce mais utilisent les joints de foliation, ce qui donne une succession de microripages le long de ces plans.

Cette remarque est particulièrement utile pour distinguer, lorsque la roche est fortement encroûtée (altération superficielle), les phénomènes de "shetting" (litage des migmatites) et sur lesquels nous reviendrons ultérieurement.

- . Un troisième état compressif à raccourcissement subméridien (N000-N010).

Le caractère cassant de cette contrainte est attesté par de nombreux jeux coulissants sur fractures. La compilation de ces microstructures impose toutefois, à ce niveau, de séparer les deux sites, car il semble qu'il y ait une nette différence d'évolution tectonique entre eux.

Site de MOGTEDO

La fréquence des décrochements est bien marquée selon deux directions :

- . N020-N030 (senestres)
- . N150-N170 (dextres)

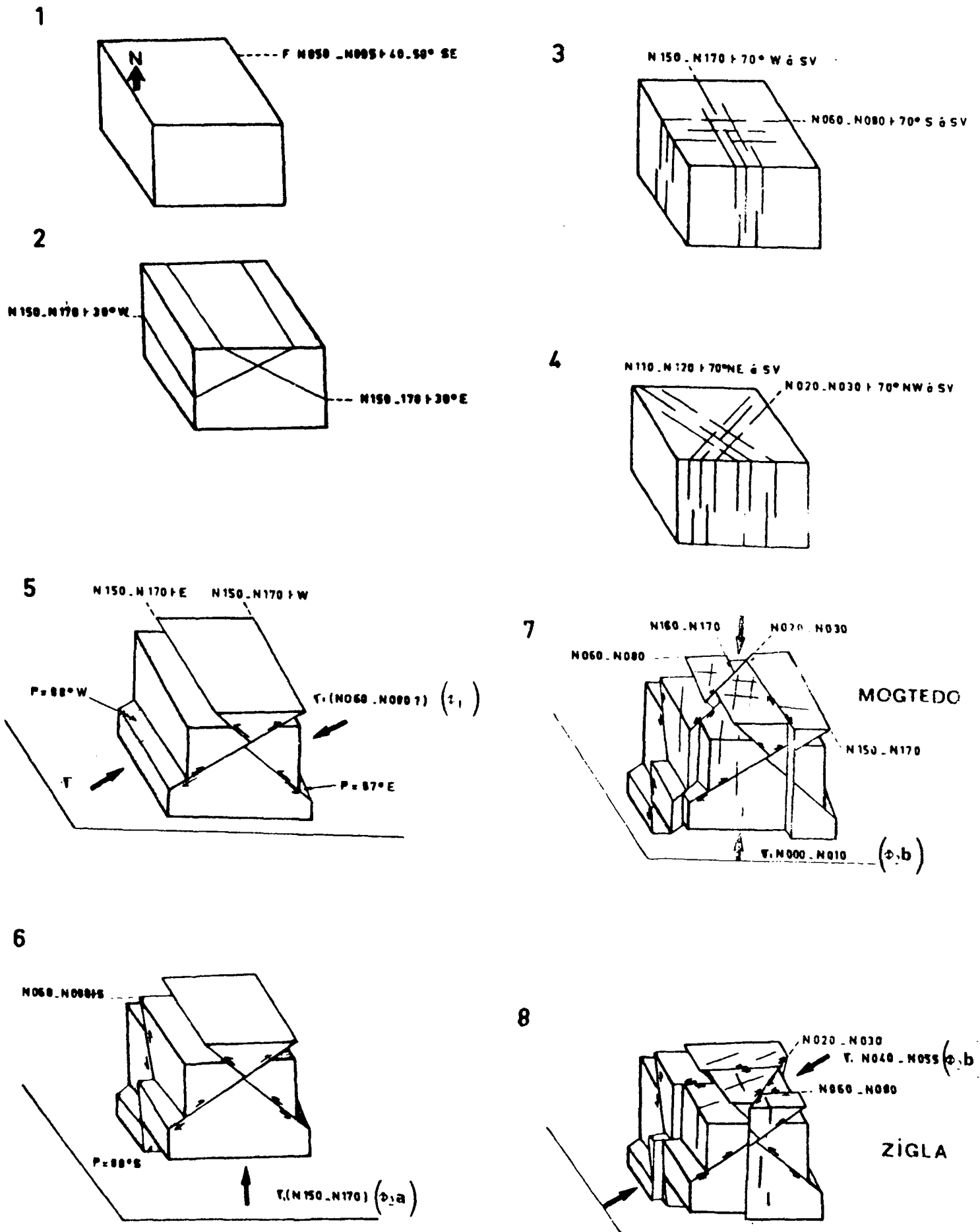
Figure 14

IDENTIFICATION QUALITATIVE DE LA FRACTURATION

-
- . Stade 1 : foliation des migmatites
 - . Stades 2, 3, 4 : joints hérités conjugués apparaissant dans les migmatites. (post-foliation et anté contraintes tectoniques).
 - . Stade 5 : contrainte compressive à raccourcissement E-W (σ_1). Première phase mise en évidence (ϕ_1).
 - . Stade 6 : contrainte compressive à raccourcissement subméridien (σ_1). Deuxième phase avec manifestation d'un premier temps de serrage ($\phi_2 a$).
 - . Stades 7 et 8 : deuxième temps de serrage ($\phi_2 b$) avec jeux coulissants inversés sur joints N020-N030 (stade 7 MOGTEDO ; stade 8 ZIGLA).
Jeux coulissants préférentiels sur fractures
- | | |
|-----------|-----------|
| N150-N170 | N060-N080 |
| (MOGTEDO) | (ZIGLA) |
| N020-N030 | N020-N030 |

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

Figure 14



On pourrait donc penser, à première vue, que ces joints sont des fractures de cisaillement (contemporaines de l'état de contrainte) et non de tension.

En fait, les observations de terrain, particulièrement au niveau des fentes de tension, montrent que les joints s'associent toujours de façon suborthogonale, ce qui donne des "couples de fractures" dans les directions suivantes :

- . N000-N010 et N090-N100,
- . N020-N030 et N110-N120,
- . N060-N080 et N150-N170.

Ces associations tendent à montrer que les joints sont tous apparus en tension et que leur origine est plurigénétique. On peut dès lors les différencier comme suit :

Joints de tension anté-tectoniques et liés à la mise en place, en profondeur, d'intrusions granitiques tardives (figure 14, blocs 2, 3, 4) :

- . N150-N170 (conjugués à pendage faible E et W),
- . N060-N080 (subverticaux),
- . N150-N170 (subverticaux),
- . N020-N030 et N110-N120

Joints de rupture liés aux plans de foliation (figure 14, bloc 1) :

- . N060-N080 à pendage Sud.

Joints syntectoniques (figure 14, bloc 7) :

- . N000-N010 et N090-N100 subverticaux.

Les accidents cassants (décrochements) donnant une direction de raccourcissement subméridienne, il est probable qu'en fait cette contrainte ne soit qu'un deuxième temps de serrage de la phase compressive 2 ayant provoqué les jeux en failles inverses sur plans de foliation (σ_1 N150 à N170). De cette sorte, deux phases tectoniques compressives distinctes se seraient bien manifestées dans la région et non trois.

Nous avons observé quelques failles normales (rejet centimétrique au plus) sur les stations de la Petite Suisse. Leur dispersion sur diagramme et leur rareté ne permet pas d'attribuer cependant ces effets à un véritable état de contrainte en distension. Nous pensons, pour notre part, que ces jeux ne correspondent qu'à des réajustements locaux sans mise sous contrainte régionale.

En résumé :

Sur le site de MOGTEDO, quatre systèmes de joints apparaissent préférentiellement ouverts :

- . joints N000-N010 et N090-N100 : d'origine syntectonique, ils seraient apparus tardivement (deuxième temps de serrage de la dernière contrainte compressive).

Ils n'ont subi aucune réactivation mécanique et ont toutes les apparences de diaclases : fractures courtes mais serrées, n'ayant en conséquence qu'un développement réduit en profondeur. Ces fractures ne devraient jouer un rôle hydraulique que dans une tranche très superficielle de l'aquifère.

- . joints N020-N030 et N150-N170 : leur origine serait anté-tectonique aussi ont-ils bénéficié de rejeux mécaniques et en particulier coulissants (décrochements). Ceci a eu pour conséquence de mettre en place de longues fractures ouvertes et profondes offrant de la sorte un intérêt hydrologique probable.

A côté de ces joints ouverts apparaissent d'autres fractures dont le rôle hydraulique est certainement insignifiant étant donné leurs caractéristiques.

- . joints N060-N080 : qu'ils aient un pendage peu ou très accusé, ils sont fermés (suborthogonaux à la contrainte compressive de direction subméridienne). Certains d'entre eux (joints de foliation) se prolongent toutefois en profondeur.
- . joints N110-N120 : conjugués aux fractures N020-N030, ils ont évolué en décrochement-rapprochement et sont donc relativement fermés. Malgré leur extension probable en profondeur, leur rôle hydraulique est en conséquence très limité.

Site de ZIGLA

Dans ce secteur, la fréquence des décrochements est bien marquée aussi selon deux directions :

- . N020-N030 (dextres)
- . N060-N080 (senestres)

On notera, d'une part, que si une famille de joints est constante sur les deux sites (N020-N030), les jeux coulissants s'inversent ; d'autre part, qu'un changement directionnel de la deuxième famille dominante s'opère (N150-N170 sur MOGTEDO, N060-N080 sur ZIGLA).

Sur le site de ZIGLA, le raccourcissement pourrait se situer dans la direction N040-N060 (figure 14, bloc 8), ce qui tendrait à montrer que l'on assiste à une nette déviation de la contrainte à caractère cassant (N000-N010 vers N040-N060). De fait, il apparaît sur le terrain une nouvelle association de joints (N040-N055 et N130-N150) auxquels nous attribuons donc une origine tectonique.

Toutefois, la présence sur ce site de fractures N000-N010 et N090-N100 (ouvertes mais sans jeu apparent) pose un problème de genèse de ces différents joints. Ayant admis une origine tectonique des diaclases N000-N010 sur MOGTEDO, doit-on attribuer une genèse identique sur ZIGLA ?

Dans ce cas, il faudrait admettre que deux états de contrainte distincts se sont manifestés (raccourcissement N000-N010 et N040-N060). Aucun argument de terrain ne permet de faire cette distinction. Doit-on y voir alors une origine liée à la mise en place de surfaces de refroidissement dans un matériel granitique profond post-tectonique (pas de jeux apparents sur ces joints) ? Nous pencherions pour cette deuxième hypothèse, étant donné l'absence de mouvements sur ces fractures.

En résumé :

Sur le site de ZIGLA, six systèmes de joints apparaissent préférentiellement ouverts :

- joints N000-N010 et N090-N100 : ils ne semblent pas avoir une origine tectonique mais il est difficile de préciser chronologiquement leur apparition.

Ils présentent les caractéristiques de diaclases, c'est-à-dire de joints courts et serrés, sans jeu mécanique. Leur prolongement en profondeur serait en conséquence limité et ils ne joueraient un rôle hydraulique que dans une tranche très superficielle de l'aquifère. Il est à noter, toutefois, que la direction de foliation prenant une orientation nettement E - W (N080 à N095), il est probable que se surimposent dans la direction N090-N100 des joints de rupture selon les plans de foliation. Ces plans sont d'ailleurs fermés par des jeux en failles inverses précoces (phase compressive 2, premier temps de serrage).

- joints N020-N030 et N060-N080 : pour les premiers, les jeux en décrochements dextres montrent qu'ils résultent d'un état fissural anté-tectonique. Ces accidents cassants ont une extension en profondeur certaine et offrent donc un intérêt hydrologique particulier.

Quant aux seconds, principalement ceux qui ont un pendage proche de la verticale, ils apparaissent ici comme étant de longues fractures ouvertes (maille décimétrique, ouverture métrique) par suite de la mise en place d'accidents décrochants senestres. Leur rôle hydraulique est donc de même nature que celui des joints N020-N030.

- joints N040-N055 et N130-N150 : d'origine supposée syntectonique, ils apparaissent tardivement. Sans jeu apparent, se sont des diaclases courtes et serrées, peu profondes mais bien ouvertes. Elles s'identifient, sur un plan hydraulique, aux fractures N000-N010 et aux joints N090-N100 autres que les plans de foliation.

A côté de ces joints ouverts existent d'autres fractures n'offrant, sur le plan hydraulique, qu'un intérêt très limité :

- joints N150-N170 : ils sont très souvent fermés ou faiblement ouverts de par leur position suborthogonale à la dernière contrainte compressive (N040-N055),
- joints N110-N120 : leur jeu en fermeture est comparable aux fractures précédentes.

2.5 Synthèse des observations microtectoniques

Si les deux sites analysés ont des structures très voisines quant à la direction des joints de rupture, ils ont néanmoins subi à un certain stade des évolutions structurales différentes. Il en résulte que leur hydraulicité est probablement modifiée de la façon suivante :

1) Site de MOGTEDO

Fractures ouvertes et profondes :

- . N020-N030
- . N150-N170

Les premières ayant une maille moyenne d'ordre métrique devraient avoir un rôle hydraulique essentiel à l'échelle d'un captage et de sa zone d'influence.

Les secondes, de maille moyenne décimétrique, un rôle tout aussi majeur mais plutôt à l'échelle du magasin.

Fractures ouvertes et superficielles :

- . N000-N010
- . N090-N100

Ces joints que l'on peut assimiler à des diaclases, pourraient jouer un rôle important d'emmagasinement (sous-systèmes faiblement diffusifs) au niveau d'un captage, à condition que celui-ci ne pénètre pas trop profondément dans l'aquifère (au-dessus de la limite inférieure de la zone décomprimée superficielle).

Joints de décompression superficielle :

En général, subparallèles à la morphologie des affleurements, ces joints, dont la mise en place est nettement post-tectonique, ont un rôle majeur dans la continuité hydraulique du système. Ils sont ouverts en surface (ouverture d'ordre centimétrique) mais se referment peu à peu en profondeur et disparaissent progressivement (leur disparition doit être subordonnée à celle des joints N000-N010 et N090-N100).

Autres joints :

N060-N080, N110-N120, N150-N170 à pendage faible : toutes ces fractures ont joué en fermeture et n'offrent, en conséquence, qu'un intérêt hydraulique mineur, voire inexistant.

2) Site de ZIGLA

Fractures ouvertes et profondes :

- . N020-N030
- . N060-N080 (à pendage subvertical).

Les premières ont une maille moyenne d'ordre métrique et devraient, comme à MOGTEDO, jouer un rôle hydraulique essentiel à l'échelle d'un captage et de sa zone d'influence.

Les secondes, de maille moyenne décamétrique, devraient jouer ce rôle à l'échelle du magasin.

Fractures ouvertes et superficielles :

- . N000-N010
- . N090-N100
- . N040-N055
- . N130-N150

Leur rôle est probablement important à faible profondeur (dans la zone décomprimée superficielle) au niveau de sous-systèmes à fort emmagasinement. Une exception cependant pour les joints correspondant aux plans de foliation (N080-N095) qui, bien que profonds, sont fermés.

Joints de décompression superficielle :

Rôle majeur dans la continuité hydraulique du système mais à des profondeurs limitées.

Autres joints :

N150-N170 (subverticaux ou à faible pendage), N110-N120 : par leur jeu en fermeture, ils n'offrent que peu d'intérêt.

3 - FRACTURATION A L'ECHELLE PHOTOGEOLOGIQUE

Parallèlement aux mesures de terrain, l'analyse photo-interprétative des deux sites a été réalisée (M. ENGALENC).

3.1 Site de ZIGLA

Les cartes d'alignements subrectilignes établies à deux échelles différentes ont été traitées au banc d'optique (figure 15).

3.11 Echelle du 1/50 000e (Carte fig. 2).

L'histogramme obtenu (longueurs cumulées selon les directions) montre un net allongement selon les orientations N065 et N105.

Allongement N065

Il correspond bien, sur le plan directionnel, aux fractures à maille décimétrique ayant joué en décrochements et dont l'ouverture est prépondérante sur le site.

Notons l'apparition, pour ces joints, d'une maille hectométrique. L'échelle du 1/50 000e rend donc compte de la fracturation à laquelle nous pensons pouvoir attribuer un rôle hydraulique à l'échelle du système aquifère.

Allongement N105

La prépondérance de cette direction peut surprendre de prime abord : les joints relevés sur le terrain ont des caractéristiques telles (faible longueur et maille serrée) qu'il est difficile d'admettre qu'ils soient visibles à cette échelle.

Nous avons noté toutefois une nette déviation de la foliation (N080 à N095), ce qui laisse penser qu'en fait ce maxima correspond essentiellement à la direction de foliation.

Autrement dit, sachant que ces plans sont, pour la plupart fermés, on ne peut leur attribuer qu'un rôle hydraulique mineur malgré leur forte densité.

Il en résulte que, sur un plan pratique, la recherche de "noeuds de fractures" N065-N105 n'apparaît pas judicieuse puisque une famille de joints n'a probablement aucune fonction hydraulique intéressante.

Nous pensons, en conséquence, que l'échelle du 1/50 000e n'est ici qu'un élément photogéologique partiel et non suffisant.

3.12 Echelle du 1/20 000e (Carte fig. 3)

Le changement d'échelle s'accompagne d'une nouvelle différenciation des joints puisque un maxima bien prononcé apparaît dans la direction N020-N030.

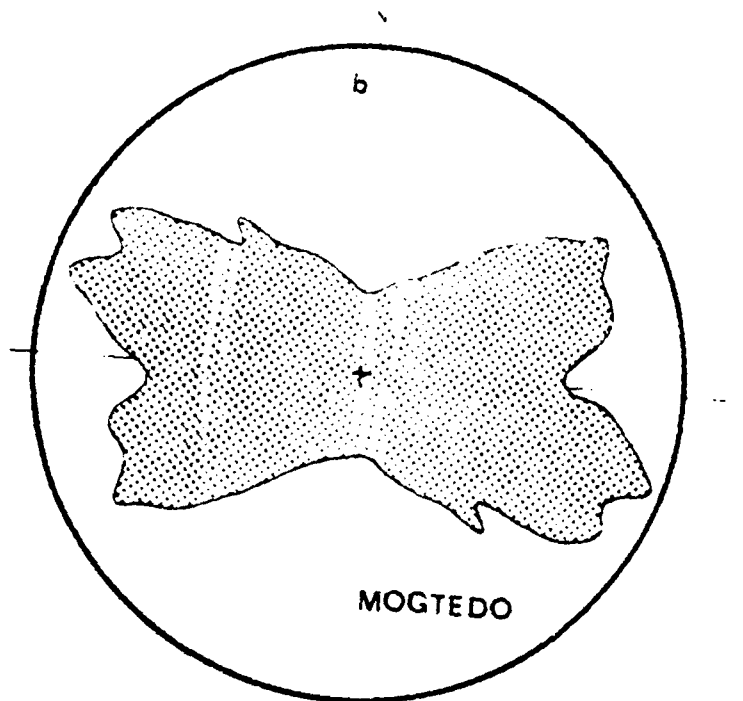
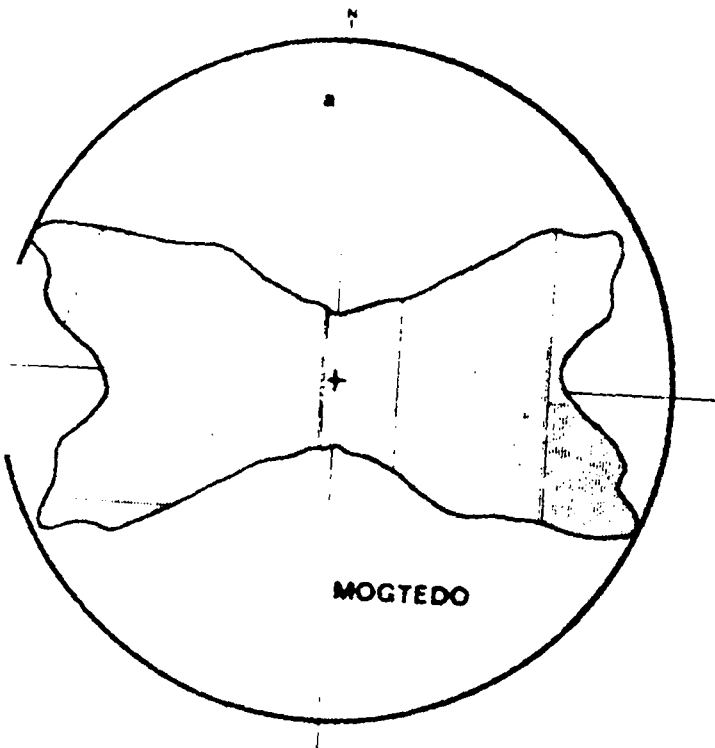
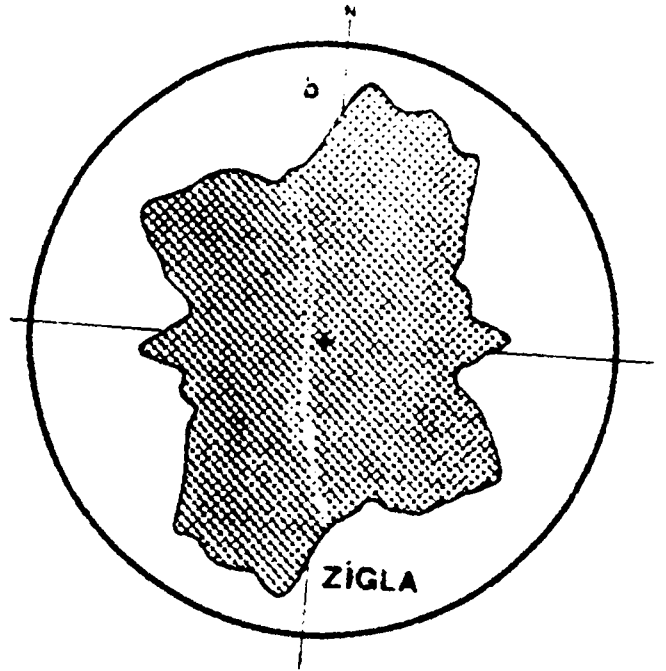
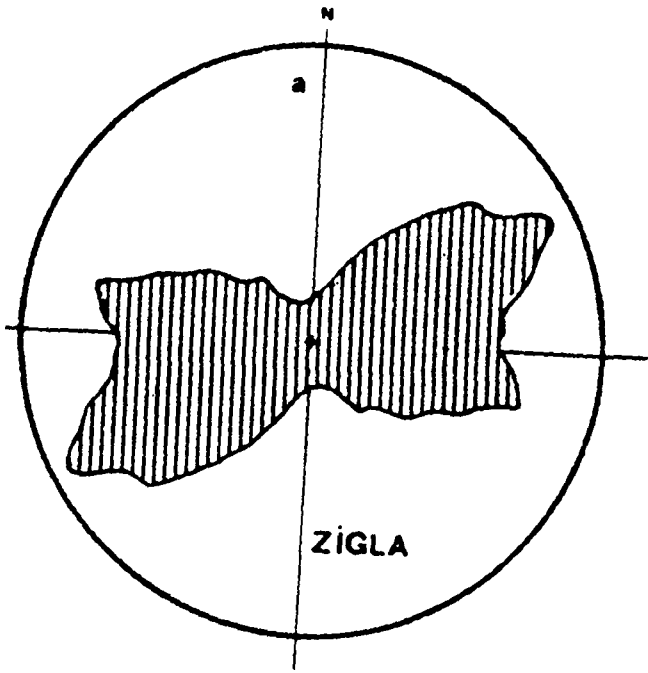
Figure 15

Traitement statistique des cartes de fracturation
réalisées sur les deux sites (banc d'optique).

a : échelle du 1/50 000e

b : échelle du 1/20 000e

Figure 15



Or, sur le terrain, celle-ci correspond à l'orientation des décrochements à maille métrique et largement ouverts dont on a signalé l'intérêt hydraulique probable. On notera l'étalement assez marqué de ce pic, ce qui laisse penser qu'il inclut des joints N000-N010 et N040-N055.

Enfin, apparaissent des pics N090-N100 et N110-N120, qui sur le plan directionnel correspondent à tous les joints majeurs du site ayant une maille métrique (y compris, mais nettement moins prépondérante, la direction de foliation N080-N095).

Ainsi l'échelle du 1/20 000e se prête convenablement à une analyse des champs de fractures par comparaison directe avec les données de terrain :

- . identification objective des alignements subrectilignes relevés et reconnaissance, parmi eux, de fractures aux jeux mécaniques précis,
- . séparation des joints qui devraient jouer un rôle hydraulique essentiel.

3.13 Synthèse des données photogéologiques sur ZIGLA

Il apparaît bien que le choix d'échelle dans une analyse photo-interprétative du milieu fissuré est fondamental : cette analyse doit, pour être pleinement rentable, rendre compte de la structure réelle du milieu que seules les observations et mesures de terrain permettent de définir. Aussi ce choix d'échelle est-il conditionné par les analyses de terrain qui sont la condition nécessaire de toute extrapolation de données structurales à un champ de fractures affectant un système aquifère.

Dans l'exemple traité on voit ainsi que :

- 1) A l'échelle du 1/50 000e apparaissent aussi bien des joints à intérêt hydraulique probable, mais concernant davantage le fonctionnement général du système, que des fractures dont l'hydraulicité est minime, voire nulle.
- 2) A l'échelle du 1/20 000e apparaissent des joints auxquels on peut attribuer une fonction hydraulique au niveau du captage.

On conçoit dès lors qu'une approche méthodologique dans l'implantation de forages pourrait, sur le site de ZIGLA, être conduite de la façon suivante :

- . recherche, à une échelle du 1/50 000e, de zones fracturées où dominant des alignements N060-N080,
- . agrandissement de ces zones au 1/20 000e et délimitation de secteurs où on notera une forte concentration de joints N020-N030 surtout, éventuellement N040-N055 et N130-N150,
- . recherche de périmètres à proximité immédiate de fractures N060-N080 et à forte densité de joints N020-N030 essentiellement.

3.2 Site de MOGTEDO

3.21 Echelle du 1/50 000e (carte fig. 4)

Deux allongements prépondérants s'individualisent dans les directions N060 et N115.

Cet histogramme, sur le plan directionnel, est remarquablement comparable à celui du secteur de ZIGLA. On pourrait donc être tenté de l'interpréter de la même façon. Or, les analyses de terrain montrent que pour MOGTEDO :

- 1) la direction N060 est celle de la foliation (plans de rupture fermés par jeu en failles inverses et non d'accidents ouverts coulissants (ZIGLA),
- 2) la direction N115 correspond aux joints N110-N120 ayant évolué en décrochement-rapprochement dextre (contrainte compressive à raccourcissement subméridien).

Ainsi, aucun de ces joints, malgré leur prépondérance en cliché aérien, n'offre des conditions propices aux circulations. Il en résulte que la recherche de couloirs ou noeuds de fractures selon les directions N060 et N115 conduirait vraisemblablement à des échecs de prospection hydrogéologique par forages.

3.22 Echelle du 1/20 000e (carte fig. 5)

Malgré la ressemblance assez surprenante avec l'histogramme précédent, on note une distinction plus fine des maxima suivants :

- . N060
- . N105
- . N120
- . N150

ce qui amène les commentaires suivants :

- . les décrochements N020-N030, fréquents sur le terrain, n'apparaissent pas en photogéologie au 1/20 000e comme sur le secteur de ZIGLA,
- . la direction de foliation (N060) reste toujours bien marquée,
- . les décrochements N110-N120 se distinguent des joints N090-N100 (pic N105) dont l'apparition, à cette échelle, est conforme aux caractéristiques de ces fractures (courtes et serrées),
- . les accidents coulissants N150-N170 (pic N150), de maille hectométrique (décamétrique au plus sur le terrain), s'individualisent mais sans acquérir une nette prépondérance.

On est donc amené à conclure que l'échelle du 1/20 000e, sur le site de MOGTEDO, est mal adaptée à la vision des fractures ayant un rôle hydraulique présumé majeur puisque les deux systèmes de joints N020-N030 et N150-N170 sont peu ou pas représentés.

Nous pensons que seules des conditions géodynamiques externes rendent sur MOGTEDO cette échelle insuffisante : altération plus développée masquant en tout ou partie certaines fractures (N020-N030 en particulier), affleurements moins fréquents...laissant à l'opérateur une plus grande marge de subjectivité dans le relevé photogéologique de la fracturation.

3.23 Synthèse des données photogéologiques sur MOGTEDO

La différence de cartographie des champs de fractures obtenue ou non avec le changement d'échelle montre bien que la photo-interprétation est soumise à certaines règles d'utilisation puisque :

- 1) en l'absence de données de terrain, deux secteurs présentant une même distribution fissurale (cas du 1/50 000e) peuvent être interprétés de façon identique alors que leur signification structurale est totalement différente :
 - . joints N060 qui sont des décrochements ouverts sur le secteur de ZIGLA alors qu'ils soulignent des plans de foliation fermés sur MOGTEDO,
 - . joints N105-N115 qui figurent des plans de foliation fermés sur ZIGLA, des décrochements, bien que peu ouverts, sur MOGTEDO.

- 2) le choix d'une plus grande échelle (1/20 000e dans le cas présent) ne doit pas être arbitraire mais s'appuyer impérativement sur les analyses quantitatives et qualitatives de terrain : elle doit faire apparaître les joints dont les caractéristiques mécaniques sont propices à un rôle hydraulique probable de ces fractures ; elle n'est donc pas forcément unique pour tout un champ de fractures, dépendant essentiellement des conditions d'affleurement du matériel fissuré.

On peut, selon ces critères, mesurer toute l'importance des données de terrain dans l'identification des champs de fractures et dans le choix de sites d'implantation de forages : sur le site de MOGTEDO par exemple, la photo-interprétation à l'échelle du 1/20 000e ne rend pratiquement pas compte de la structure ouverte du milieu et ne doit être retenue en conséquence que partiellement.

4 - CONCLUSIONS

Nous pensons avoir montré qu'en l'absence d'analyses de terrain, mêmes partielles, la photo-interprétation peut, dans certains cas, conduire à des échecs car elle est totalement imprécise quant à la définition de la structure du milieu fissuré.

Cette structure est, comme nous l'avons dit, à la base même de l'hydraulicité du système pour laquelle il convient cependant de distinguer deux notions :

- 1) soit que l'on veuille appréhender cette fonction à l'échelle de l'aquifère : elle met en jeu des discontinuités longues, de maille lâche, qu'une petite échelle photogéologique aura toute chance de souligner. Toutefois, d'autres joints peuvent apparaître aussi importants mais n'offrir, en réalité, qu'un faible intérêt hydrogéologique de par leur nature et leurs caractéristiques mécaniques. Une grosse part d'incertitude réside donc dans l'utilisation d'une seule échelle photogéologique.
 - . d'une part, elle peut conduire à associer des joints (couloirs, noeuds) dont les fonctions sont différentes, voire opposées,
 - . d'autre part, elle s'adresse aux fractures ayant un rôle hydraulique à l'échelle du système surtout. Elle ne peut donc constituer le seul critère d'implantation de captages pour lesquels elle ne peut rendre compte de l'organisation fissurale environnante.

- 2) soit que l'on s'intéresse au fonctionnement hydraulique du milieu à l'échelle du captage et de sa zone d'influence : entrent en jeu des fractures plus courtes et de maille plus serrée dont l'observation en clichés aériens dépend aussi bien de ces caractéristiques (particulièrement l'ouverture et la maille) que des conditions d'affleurement. Il y a donc tout intérêt à opérer une étude photo-interprétative à plus grande échelle dont le choix est conditionné par les analyses de terrain :
 - . mise en évidence des joints dont ceux qui ont été reconnus ouverts et pénétrant profondément dans l'aquifère,
 - . sélection des fractures ouvertes dans tout le champ de fractures.

En résumé, l'étude qui vient d'être entreprise permet de préciser sur les deux sites choisis la structure du milieu et de soupçonner ses caractéristiques hydrauliques potentielles:

1) Site de ZIGLA

A l'échelle du système aquifère :

- . joints N060-N080 en maille décamétrique et hectométrique, à ouverture métrique.
- Rôle drainant probable.

A l'échelle d'un captage et de sa zone d'influence :

- . joints N020-N030, en maille métrique, à ouverture décimétrique.
Rôle drainant probable.
- . joints N000-N010, N090-N100, N040-N055, N130-N150. En maille décimétrique à métrique, à ouverture centimétrique-décimétrique.
Rôle important dans l'emmagasinement (sous-systèmes à faible diffusivité).
- . "shetting" ou pseudo-stratification : "bancs" d'épaisseur décimétrique à métrique ; ouverture des joints d'ordre centimétrique.
Rôle fondamental dans la continuité hydraulique du milieu dans les limites de la zone décomprimée superficielle.

Choix d'échelles photogéologiques :

- . 1/50 000e : utile, car elle met en évidence des fractures ouvertes N060-N080 ; insuffisante, car elle ne permet pas de relever d'autres joints ayant cette même caractéristique, sinon des directions des plans de foliation (N105) qui sont fermés, donc à ne pas retenir.
- . 1/20 000e : nécessaire, puisqu'elle révèle des fractures ouvertes N020-N030 (à retenir en priorité) ; N000-N010; N090-N100, N040-N060.

Utilisation pratique des données photogéologiques

- . ne relever au 1/50 000e que les joints N060-N080,
- . extraire du 1/20 000e les alignements N020-N030, N000-N010, N090-N100, N040-N060,
- . superposer les deux documents afin de localiser les périmètres à forte densité de discontinuités précédemment citées,
- . choisir un site de forage à la fois le plus près possible d'une ou plusieurs fractures N060-N080 (couloir) et incluant le maximum des joints N020-N030, N000-N010, N090-N100 et N040-N055.

2) Site de MOGTEDO

A l'échelle du système aquifère :

- . joints N150-N170 (subverticaux) en maille décamétrique-hectométrique, à ouverture métrique.
Rôle drainant probable.

A l'échelle d'un captage :

- . joints N020-N030 en maille métrique, à ouverture décimétrique.
Rôle drainant probable.

- . joints N000-N010 et N090-N100 en maille décimétrique-métrique, à ouverture centimétrique-décimétrique.
Rôle important dans l'emmagasinement (sous-systèmes à faible diffusivité).
- . "shetting" (continuité hydraulique du milieu).

Choix d'échelles photogéologiques :

- . 1/50 000e : inutile, car les discontinuités relevées sont, pour la plupart, fermées.
- . 1/20 000e : utilisable partiellement (joints N105 et N150 à retenir); s'il y a possibilité, rechercher le meilleur agrandissement qui fasse apparaître les fractures N020-N030 et N150-N170 essentiellement, N000-N010 et N090-N100 éventuellement.

Utilisation pratique des données photogéologiques :

- . ne relever au 1/20 000e que les joints N150-N170,
- . ne retenir, à une échelle plus grande, que les fractures N020-N030, N000-N010 et N090-N100,
- . superposer les deux documents afin de localiser des périmètres à forte densité de joints précédemment cités,
- . choisir un site près d'une ou plusieurs fractures N150-N170 (couloir) incluant le maximum de joints N020-N030 et N000-N100 essentiellement, N090-N100 éventuellement.

Ces deux exemples, différenciés au niveau des caractéristiques mécaniques des joints de rupture qu'ils présentent, soulignent la nécessité de s'appuyer sur des analyses de terrain si l'on veut interpréter rationnellement des champs de fractures. Il apparaît ainsi que sans cette connaissance qualitative de la structure du milieu, l'utilisation de la fracturation des systèmes aquifères dans le repérage des périmètres propices à l'implantation de forages peut conduire à des échecs dès l'instant où, malgré leur prépondérance statistique directionnelle, certains joints ont essentiellement évolué en fermeture : photo-interprétation et analyses de terrain sont donc bien insecables et complémentaires si l'on veut appréhender l'hydraulicité des milieux fissurés et par voie de conséquence, mieux les exploiter.



ANNEXE II

LES STATIONS EXPERIMENTALES

DE ZIGLA KOULPELE ET DE MOGTEDO

ESSAIS DE POMPAGE

LES STATIONS EXPERIMENTALES DE ZIGLA ET DE MOGTEDO

Essais de pompage

1. SITE EXPERIMENTAL DE ZIGLA KOULPELE

- 1.1 Equipement de la station
- 1.2 Structure géologique
- 1.3 Les venues d'eau
- 1.4 L'aquifère
- 1.5 Les essais de pompage
- 1.6 Fonctionnement du système aquifère

2. SITE EXPERIMENTAL DE MOGTEDO RAPADAMA V6

- 2.1 Equipement de la station
- 2.2 Structure géologique
- 2.3 Les venues d'eau
- 2.4 Le système aquifère
- 2.5 Interprétation des essais de pompage
- 2.6 Fonctionnement du système aquifère

LES STATIONS EXPERIMENTALES DE ZIGLA KOUPELE ET DE MOGTEDO (HAUTE-VOLTA)
ESSAIS DE POMPAGE

Les travaux de forage ont été réalisés :

- . à MOGTEDO, par le service forage de l'AVV, avec MM. BILLIAULT, IMBERT, TAO
- . à ZIGLA par la Société AFORCOM avec MM. Guy et Daniel CLAUDE.

Le but des essais est de contribuer à la connaissance de la structure du milieu fissuré, de son comportement hydrodynamique et de définir quelques règles pratiques concernant l'exploitation des aquifères.

Chaque station est composée d'un forage d'exhaure et de trois piézomètres. Les piézomètres ont été implantés en fonction de l'étude microstructurale et photogéologique (orientation - taille des mailles de fractures).

1 - SITE EXPERIMENTAL DE ZIGLA KOUPELE

1.1 Equipement de la station (fig. 16)

	Forage d'essais F	Piézomètre P1	Piézomètre P2	Piézomètre P3
Aquifère capté	fracture	fracture	fracture	altération
Profondeur m	41,50	26	26	16
Diamètre du tube	6" 5/8	60 mm	60 mm	60 mm
Hauteur tubée	0 à 11 m	0 à 22 m	0 à 22 m	0 à 10 m
Hauteur crépinée	11 à 41,5 m	22 à 26 m	22 à 26 m	10 à 16 m
Nivellement relatif	0	+ 0,50 m	+ 0,475	+ 0,115
Niveau statique m*	7,075	7,20	7,125	6,885
Distance au forage m	-	5,20 m	10,05 m	3 m
Orientation par rapport à F	-	N 70° E	N 285° E	N 230° E

Le forage F a été implanté en 1967 par COMTEC.

* Nivellement relatif par rapport à la surface haute de la margelle du forage F (cote 0).

Figure 16

Schéma de la station expérimentale de Zigu

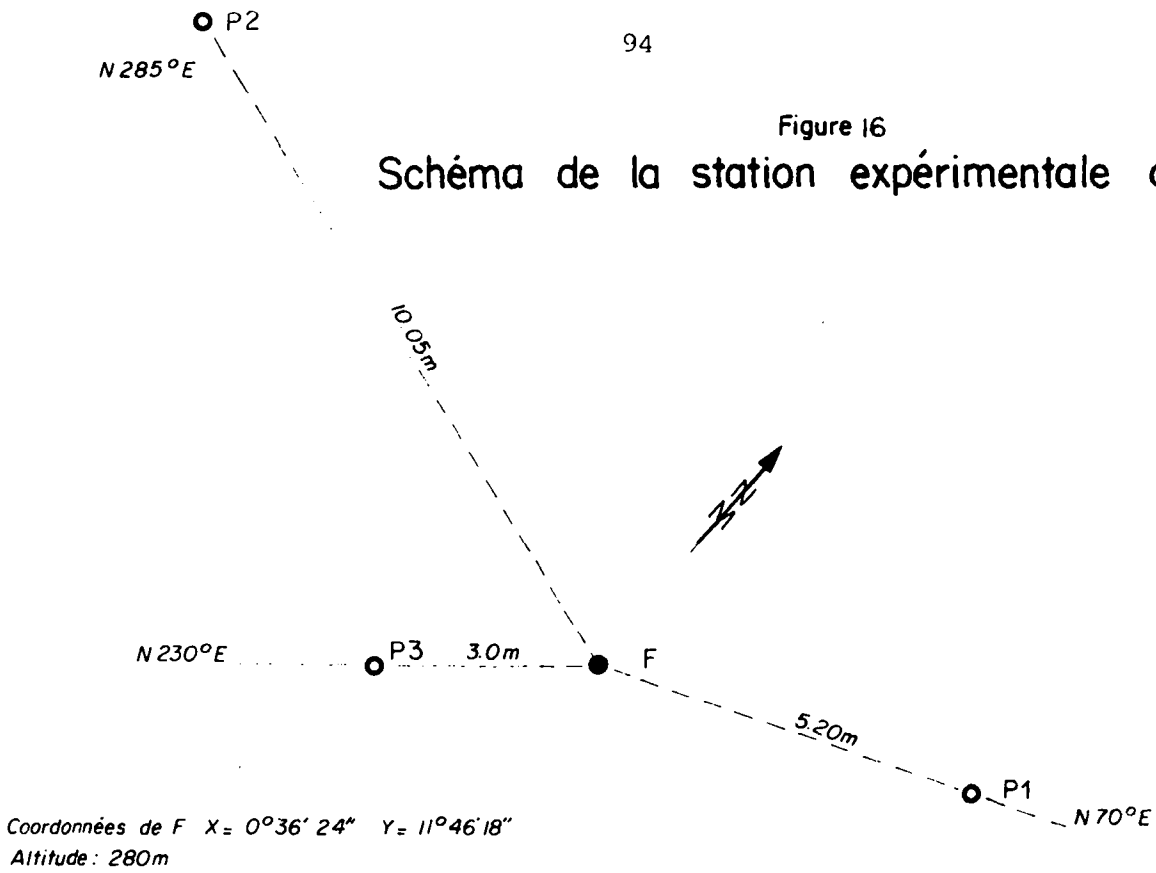
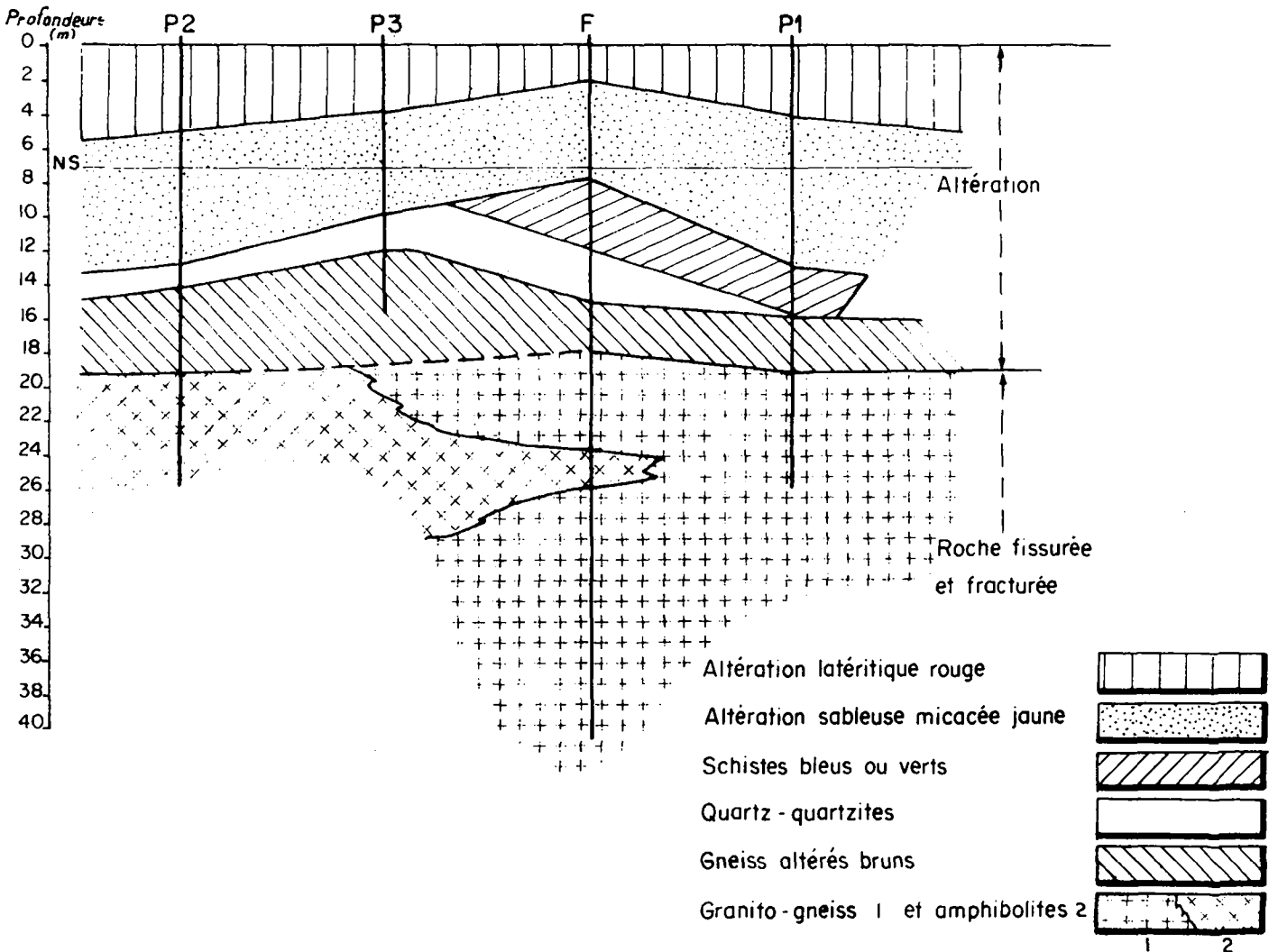


Figure 17

Coupe géologique récapitulative des forages



1.2 Structure géologique (fig. 17 et 18)

La roche d'origine est formée d'une série superficielle à rattacher au Birrimien (schistes - quartzites) presque entièrement altérée (18 à 19 m d'épaisseur) et d'une série inférieure (granito-gneiss, amphibolites) peu altérée mais fissurée.

1.3 Les venues d'eau

En cours de forage le trou est sec avec seulement des traces d'humidité, jusqu'à 19 m. Brusques venues d'eau de plusieurs m³/h dès que l'outil atteint la zone fissurée. L'eau en charge remonte jusqu'à 7 m. La charge est de 12 m.

D'autres venues d'eau entre 18 - 20 m, 23 à 25 m et 32 à 34 mètres.

1.4 L'aquifère

Le niveau supérieur poreux (altération) est saturé sur 12 m d'épaisseur.

Le niveau sous-jacent correspond au socle cristallin fissuré jusqu'à 41 m.

Les niveaux piézométriques sont voisins.

La zone fissurée s.s sert de transition entre le milieu poreux et le milieu fracturé.

Le système aquifère est un couloir fissuré et altéré de 500 m de large environ, orienté suivant la direction NE/SO.

1.5 Les essais de pompage

1.51 Durée des essais

La descente à débit constant (0,650 m³/h) a duré 37h30 du 20-11-78 à 10h10 au 21-11-78 à 23h40. La remontée a été suivie jusqu'à 14h le 22-11-78 après 14h30 de mesures.

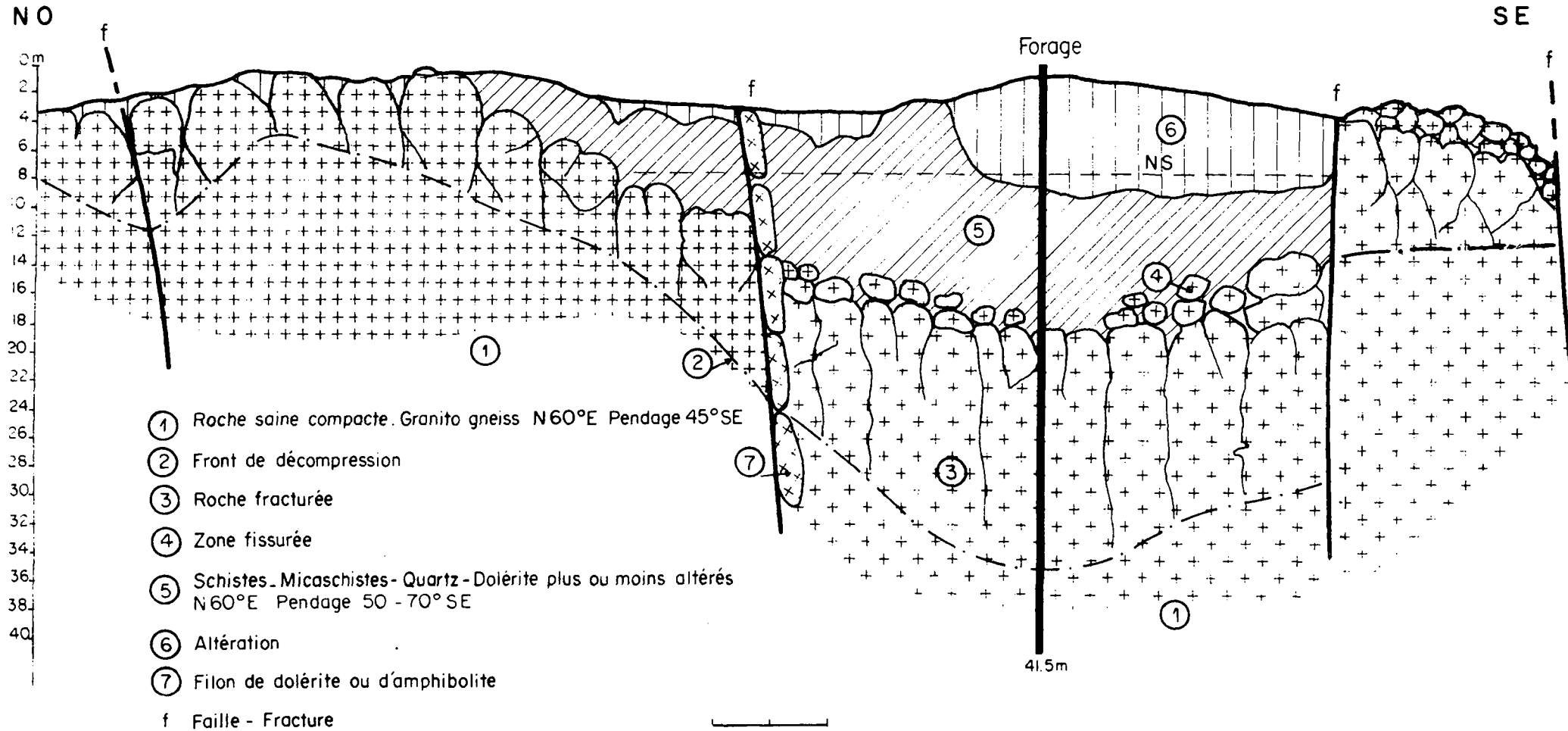
1.52 Graphique des rabattements en fonction du logarithme des distances des piézomètres au forage (fig. 19)

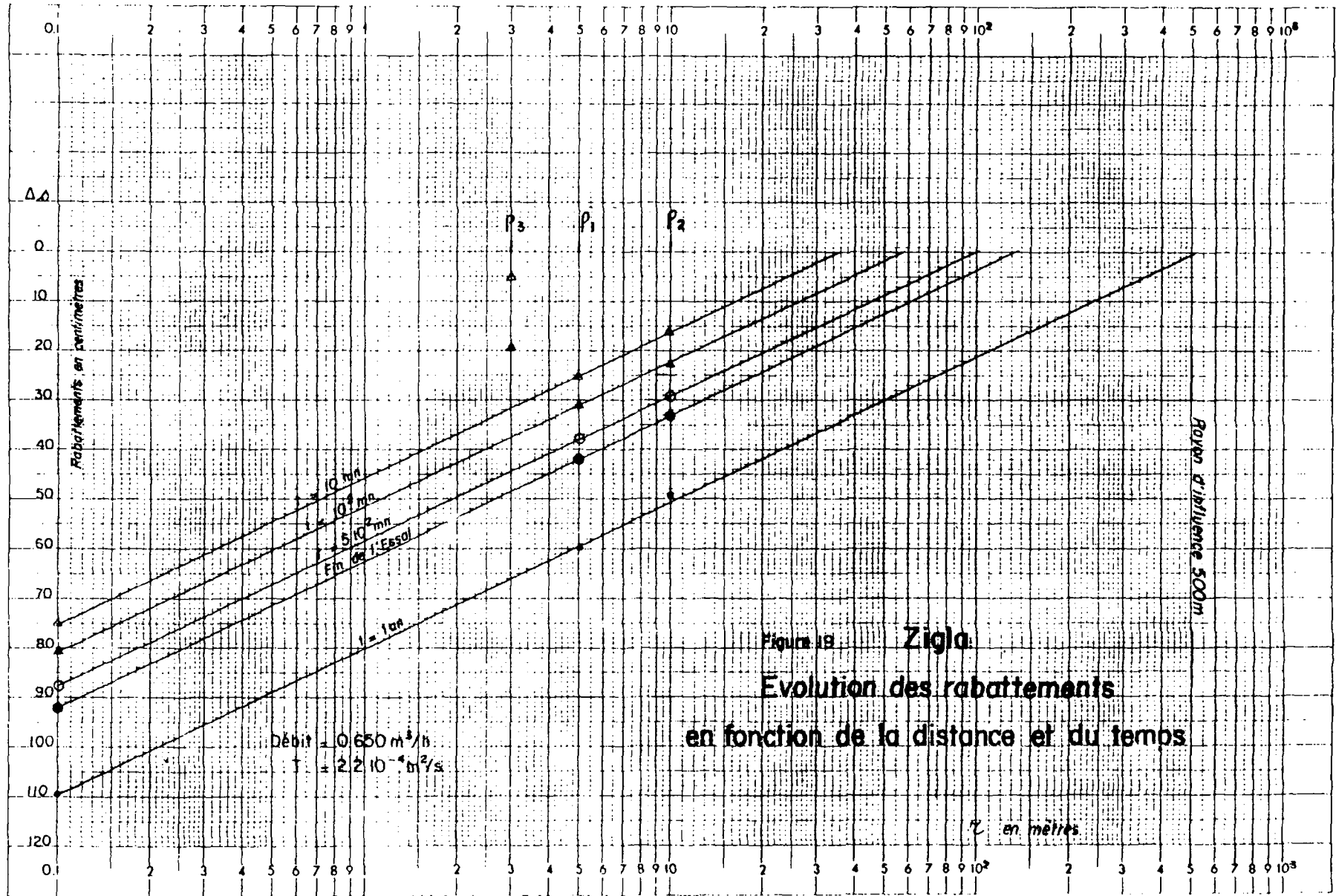
Le système aquifère réagit comme un milieu homogène.

- . le modèle hydrodynamique est constant dans le temps,
- . le rayon d'influence croît avec le temps. Il est de 500 m au bout d'un an de pompage continu, il est indépendant du débit d'exhaure,
- . dans l'altération, l'évolution des niveaux est différente de celle des piézomètres profonds.

Figure 18

ZIGLA — Coupe géologique interprétative





1.53 Graphique des rabattements/log. temps (fig. 20)

Moins de 6 mn après le début du pompage on note une rapide stabilisation des niveaux, due au faible débit d'exhaure par rapport au débit de l'aquifère, à la très bonne diffusivité des fissures secondaires permettant la stabilisation rapide de la fonction capacitive, de la densité de la fissuration, d'une réalimentation par effet de drainance à partir de l'aquifère des altérites.

Dans l'altération, la baisse des niveaux continue et rapide confirme la vidange du niveau supérieur avec réalimentation du niveau fracturé. Après 45 mn, une nouvelle baisse des niveaux persiste jusqu'à la fin de l'essai, sans que le débit soit en cause. Est-ce l'effet d'une limite peu perméable située à 25 - 30 m et visible sur la carte des résistivités ? L'homogénéité observée sur le graphique s/log distance n'est qu'apparente et ne doit pas masquer l'anisotropie naturelle d'un milieu multicouche, hétérogène et demi-infini.

1.54 Courbes de remontée (fig. 21)

Le parallélisme des droites confirme la relative homogénéité. Quelques ruptures de pentes trahissent l'influence de la structure fissurée.

Dans le piézomètre superficiel, la remontée est rapide et différente de celle des piézomètres profonds.

1.55 Courbe log s/log t pour le P2 (fig. 22)

Une stabilisation précoce décale la courbe expérimentale de la courbe standard. On a un effet Boulton perturbé par la complexité du milieu.

On note que l'aquifère réagit immédiatement à toutes les impulsions.

Depuis la création du forage (COMTEC, 1967), en 11 ans, le niveau statique, le niveau dynamique et le débit d'exploitation optimal n'ont pas changé.

1.56 Détermination des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères

Dans la mesure où le milieu fissuré a une apparence homogène, on peut être tenté de calculer les caractéristiques hydrodynamiques comme pour un milieu poreux.

La "Transmissivité" du milieu, non influencée, est voisine de $4 \cdot 10^{-4}$ m²/s. Après influence des limites, la "transmissivité" qui commande l'évolution des potentiels dans le temps est de $2,5 \cdot 10^{-4}$ m²/s.

La porosité ou le coefficient d'emménagement ne sont pas déterminés avec précision, mais la porosité semble proche de 0,2 % pour le milieu fracturé.

La perméabilité du milieu altéré voisine $2 \cdot 10^{-5}$ m/s.

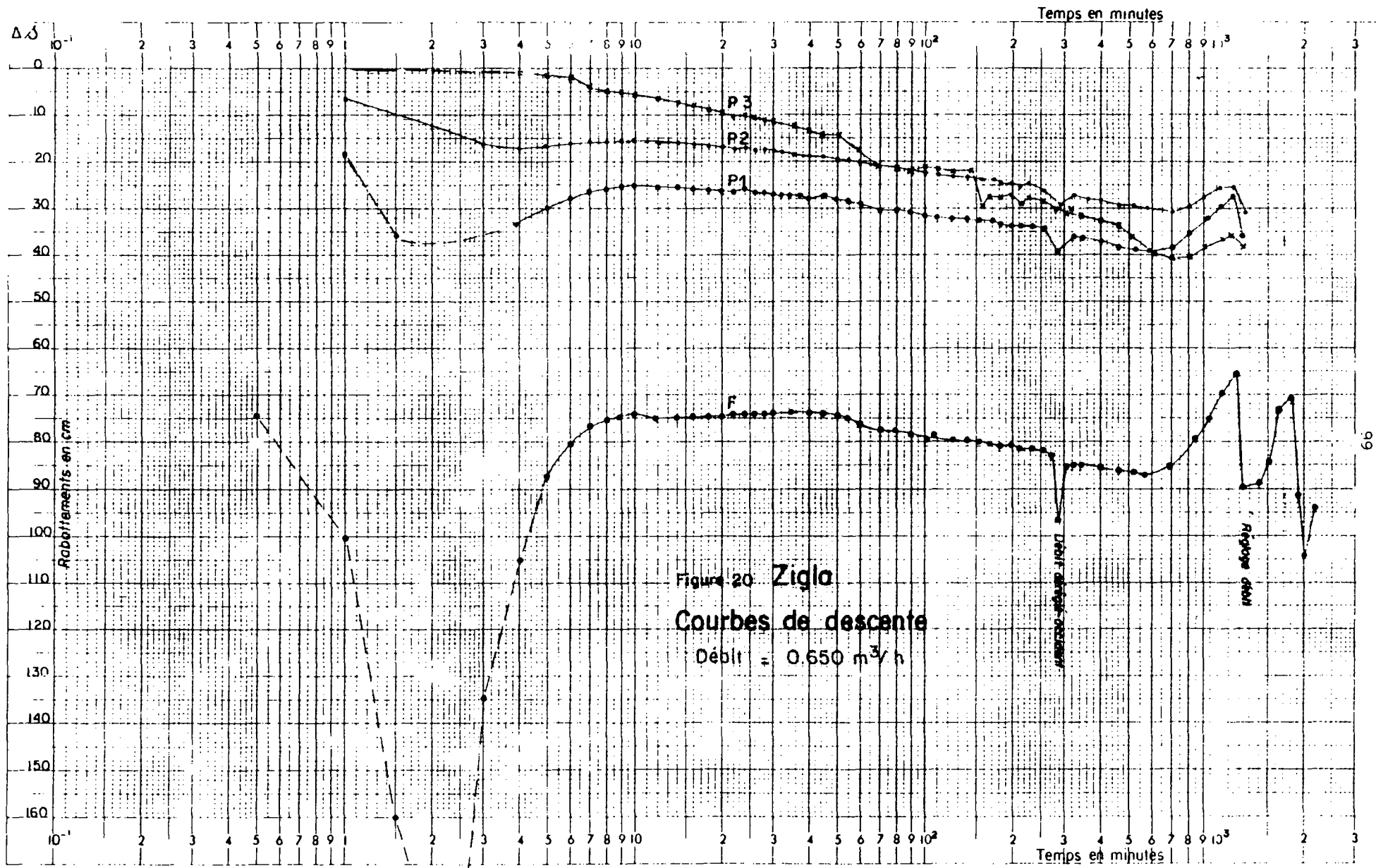


Figure 20 Zigla
 Courbes de descente
 Débit = 0.650 m³/h

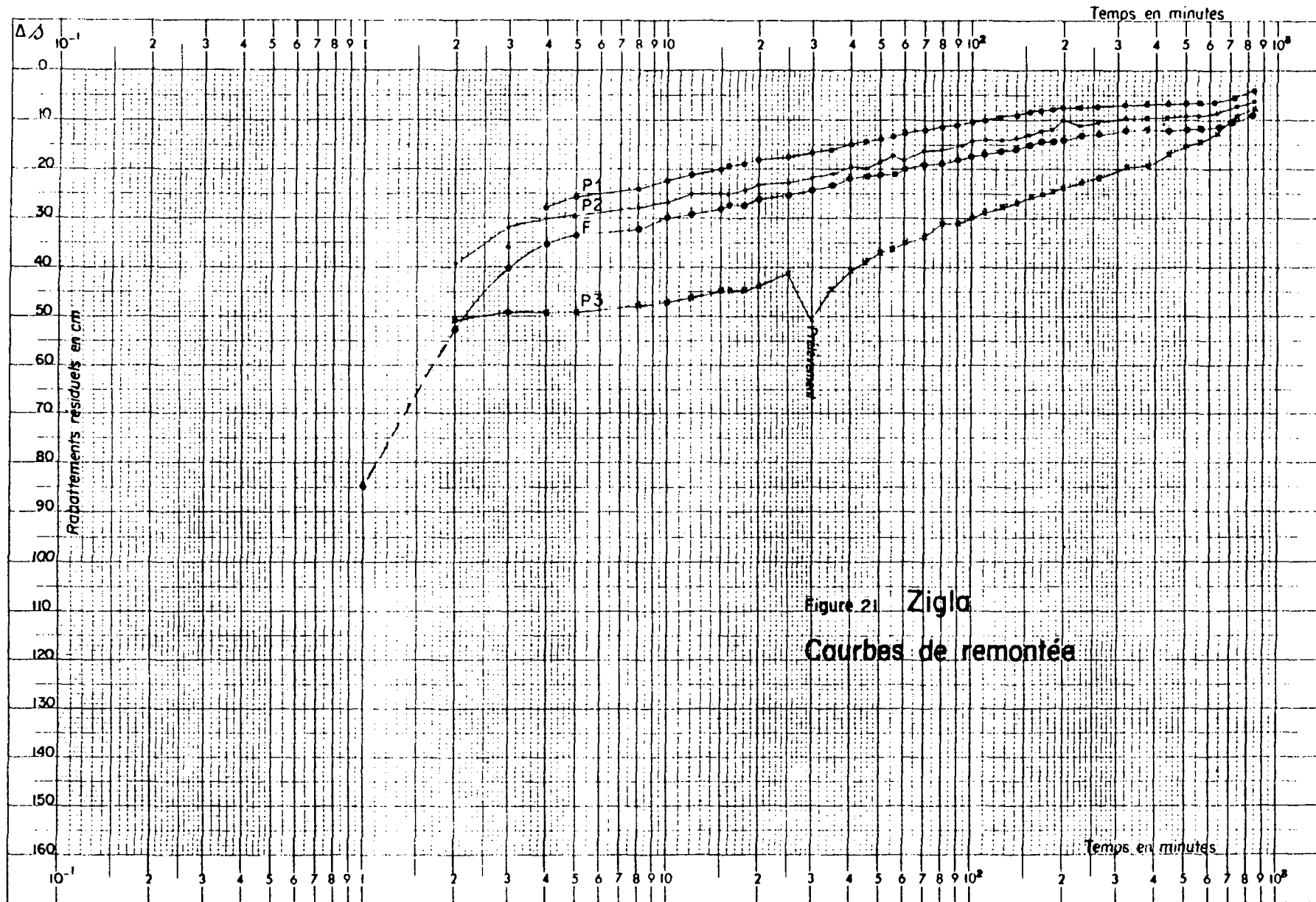
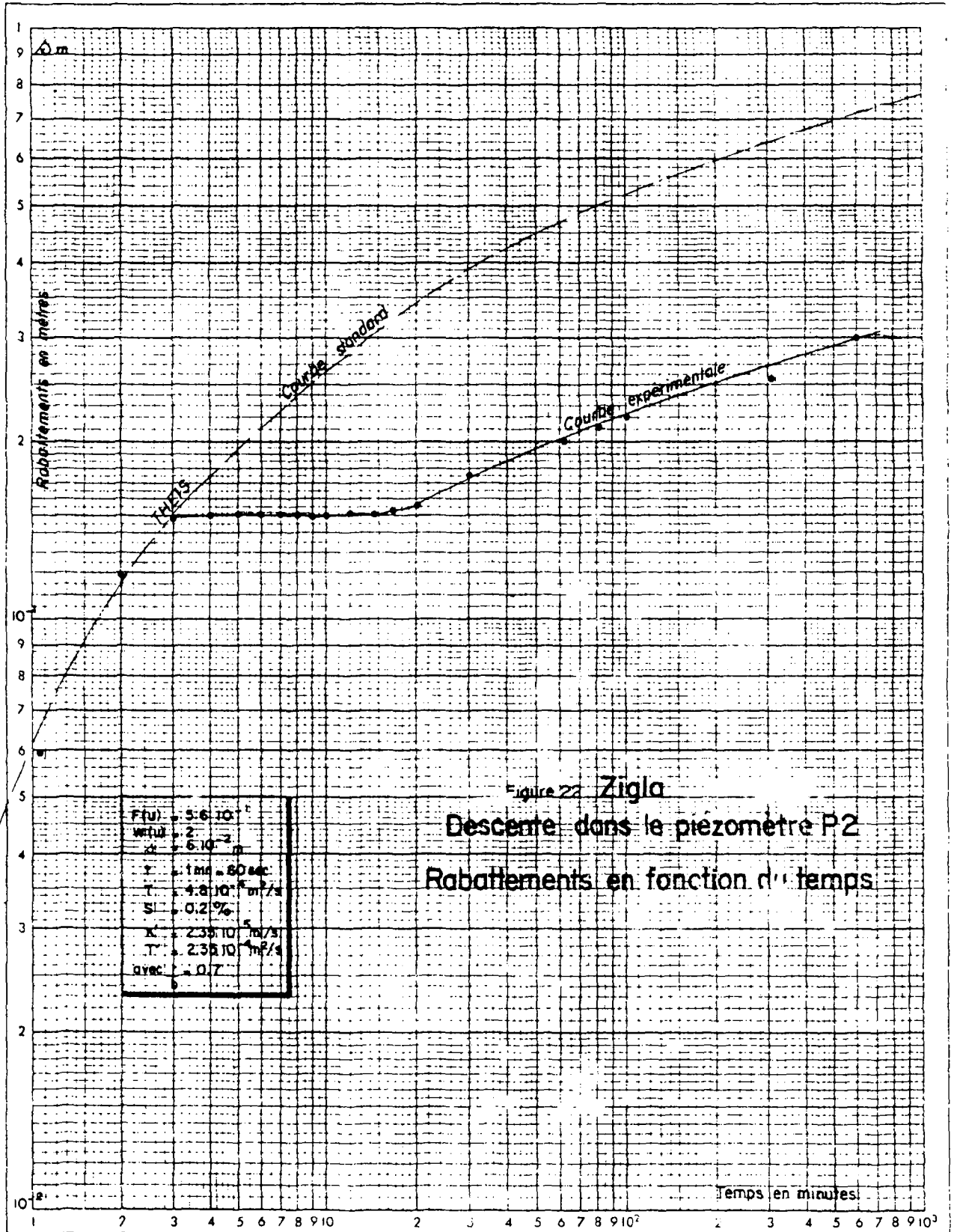


Figure 21 Zigla
Courbes de remontée





	Milieu fracturé		Altération	
	T m ² /s	S	T m ² /s	K' m/s
1. Forage				
s/logt	descente	3,9.10 ⁻⁴	-	-
"	remontée	2,5.10 ⁻⁴	-	-
s/log $\frac{t}{t'}$	remontée	2,5.10 ⁻⁴	-	-
s/logr	descente	2,2.10 ⁻⁴	-	-
2. P2	s/logt	4,2.10 ⁻⁴	-	-
	logs/logt	4,8.10 ⁻⁴	2,35.10 ⁻⁴	2,35.10 ⁻⁵
		5,4.10 ⁻⁵ (?)		
		0,2 % (?)		
3. P3	s/logt	-	1,8.10 ⁻⁴	1,8.10 ⁻⁵
	descente	-	-	-
	remontée	-	1,65.10 ⁻⁴	1,65.10 ⁻⁵

1.6 Fonctionnement du système aquifère

Le modèle hydrodynamique (fig. 23) se schématise par :

- a) Un étage inférieur strictement fracturé et fissuré, parcouru par une ou plusieurs fractures longues et profondes (N60-80° et N20-30°) recoupées par le forage. L'homogénéité révélée par les essais traduit une diffusivité hydraulique élevée et une bonne interconnexion entre les différents réseaux de fissures. En fin d'essais, une fracture peut être induite sur 260 m de long et sur 1000 m au bout d'un an.

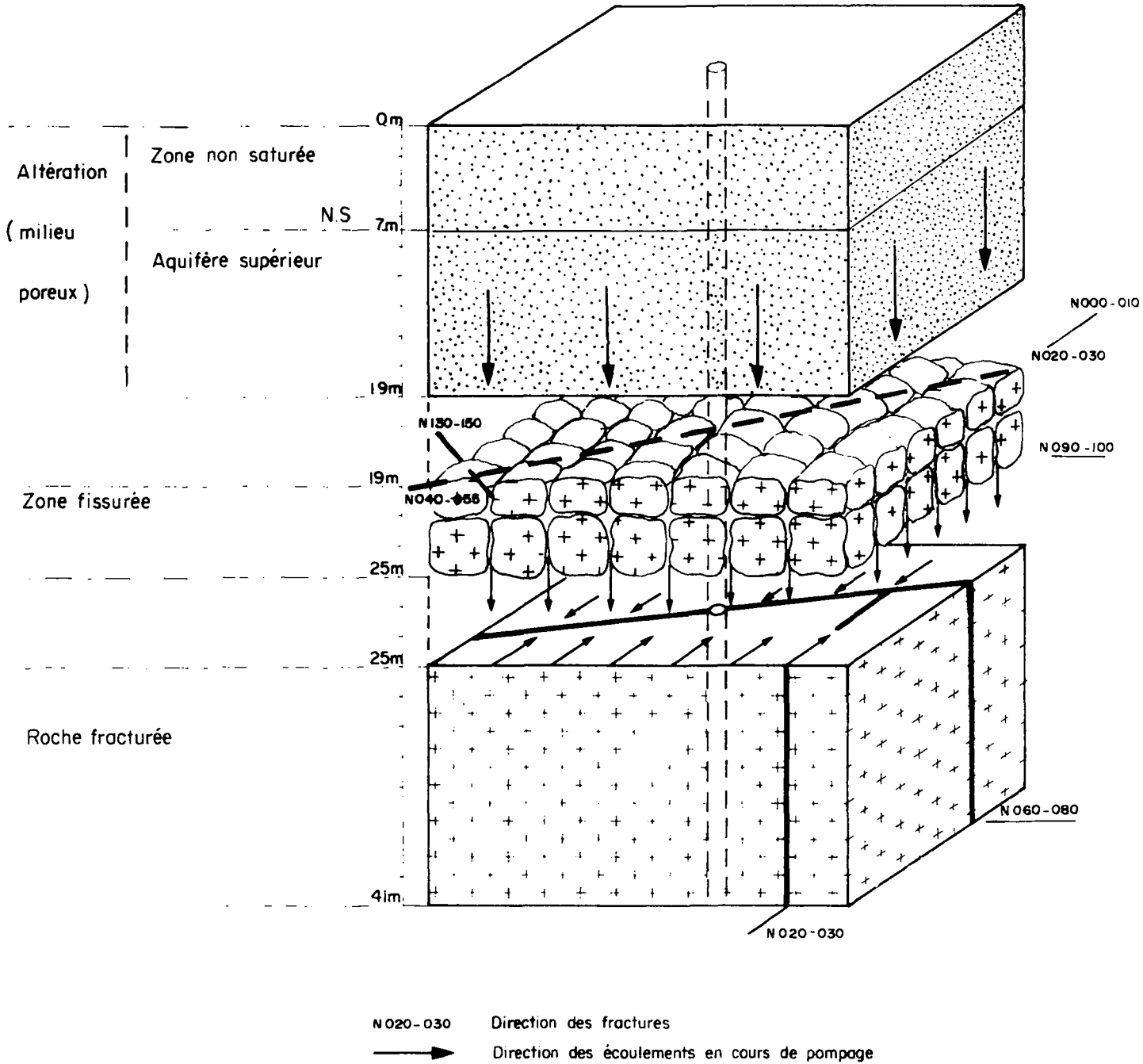
L'étage inférieur est épais de 15 m en moyenne.

- b) Un étage intermédiaire qui est la zone fissurée, épaisse de 2 à 6 m. Les fractures longues et profondes (N60-80°, N20-30°) de l'étage inférieur se retrouvent dans ce niveau qui est extrêmement morcelé par de nombreuses fractures courtes et serrées (mailles métriques) (N000-010°, N40-55°, N130-150°, N90-100°). Ce niveau possède une perméabilité de fissure élevée malgré un remplissage partiel des vides par les produits de l'altération. Son rôle drainant est primordial car la surface de contact avec la couverture altérée est très grande (53 000 m² à la fin de l'essai et 785 000 m² au bout d'un an de pompage continu).

En prenant une maille fissurée de 4 x 4 m (joints métriques N000-010 et N090-100°, par exemple) la longueur cumulée des fissures est de l'ordre de 30 km en fin d'essai. Cette approche est théorique car les mailles peuvent être plus serrées et les familles de joints plus ou moins nombreuses sans compter les joints décimétriques.

Figure 23

Schéma du système aquifère de Zigla Koulpélé



c) le manteau altéré forme le niveau supérieur, de mauvaise perméabilité (2.10^{-5} m/s) mais possédant une fonction capacitive élevée (5 % environ de porosité efficace).

		Essais de 37h30	Pompage continu sur 1 an		
Surface induite		53 000 m ²	785 000 m ²		
Débit d'exhaure		0,650 m ³ /h	Pompe à main = 0,7 m ³ /h	Max = 5 m ³ /h	
Volume extrait		24,37 m ³	6 132 m ³	43 800 m ³	
Réserves utiles	Altération	Porosité			
		5 %	31 800 (83,3 %)	471 000	
	2 %	12 720 (80 %)	184 400		
	Zone fissurée	2 %	5 300 (13,89 %)	78 500	
		1 %	2 650 (16,6)	39 250	
	Roche fracturée	0,2 %	1 060 (2,8 %)	15 700	
		0,1 %	530 (3,3)	7 850	
	Total		38 160 à 15 900 m ³	565 200	à 231 500 m ³

Le tableau ci-dessus donne, pour un volume cylindrique du système aquifère de rayon égal à celui du rayon d'influence, pour l'essai réel et pour un an de pompage en continu, la répartition des réserves utiles par niveau aquifère.

La quasi totalité des réserves utiles est contenue dans l'altération (80 %).

Le rôle capacitif de la roche fracturée est faible (3 %) mais non négligeable pour une exploitation continue par pompe manuelle.

Le volume extrait par une pompe manuelle est insignifiant en regard des réserves utiles (1,08 à 2,6 % pour une exploitation continue sur un an). Il peut théoriquement être fourni par le niveau fracturé. Par contre, le débit maximum d'exploitation (5 m³/h) en continu, ne peut être soutenu que par la zone fissurée ou plus aisément par l'altération.

Cet exemple montre :

- que le débit d'exploitation (5 m³/h) et sa pérennité ne peuvent être maintenus que par la présence du niveau supérieur altéré.

- . le volume à extraire est fonction de l'aire de drainage de la couche altérée. Le rayon d'influence croît avec le temps et avec la diffusivité (T/S), si bien qu'il faut implanter le forage dans une zone à forte densité de fissures (équivalent du niveau moyen fissuré) et sur une fracture longue et profonde de grande diffusivité servant de collecteur principal (1 000 m).
- . dans les zones dépourvues d'aquifère supérieur (absence d'altération, absence d'une nappe dans l'altération) la réserve utile est très réduite et le débit d'exploitation moyen correspond à celui d'une pompe manuelle, sauf cas particulier de réalimentation quelconque ou de fissuration développée.
- . le rôle de réserve du niveau altéré ne peut être maintenu que pour une hauteur d'aquifère de 8 à 10 m à l'étiage si on veut assurer un débit d'exploitation permanent de 5 m³/h.
- . la recharge effective de l'aquifère correspond à 10 % environ de la pluviométrie (P = 925 mm à Garango) (Lelong, 1966) soit 1,6 fois plus que le volume extrait à 5 m³/h.

Essai de pompage - ZIGLA KOULPELE - Descente

Date	Heure	temps en mn	Rabattements en mètres				Débit temps en mn	Observations	
			Forage	P1	P2	P3			
20/11 78	9h30	N.S	7,25						
	10h10	0	-	-	-	-			
		0,5	0,75						
		1	1,00	0,18	0,06	0,25	<1 mm		
		1,5	1,60						
		2	1,85	0,35	0,12	0			
		2,5	1,93	-	-	-			
		3	1,35	0,36	0,16	-	2,5		
		4	1,05	0,33	0,17	0,01			
		5	0,87	0,30	0,165	0,015			
		6	0,81	0,28	0,16	0,02			
	10h21	7	0,77	0,267	0,155	0,04			
		8	0,76	0,26	0,155	0,05			
		9	0,755	0,255	0,155	0,05	2,9		
		10	0,75	0,255	0,155	0,06			
		12	0,75	0,255	0,155	0,06			
		14	0,75	0,256	0,157	0,07			
		16	0,755	0,26	0,16	0,08			
		18	"	0,262	0,165	0,09			
		10h31	20	0,753	0,265	0,167	0,095		
			22	0,745	0,265	0,17	0,10		
	24		"	0,265	0,172	0,10			
	26		"	0,266	0,172	0,105	2,43		
	10h41	28	0,74	0,268	0,175	0,11			
		30	0,745	0,27	0,177	0,115			
		35	0,74	0,272	0,18	0,12	2,50		
		40	"	0,275	0,183	0,13			
		45	0,745	0,277	0,187	0,14			
		50	0,75	0,28	0,19	0,14			
	11h11	55	0,755	0,284	0,193	0,15			
		60	0,77	0,29	0,20	0,23	2,43	Echant. d'eau	
		70	0,775	0,302	0,207	0,22			
80		0,78	0,305	0,212	0,215				
90		0,79	0,31	0,217	0,215				
100		0,795	0,314	0,22	0,215	2,45			
12h00	110	0,79	0,316	0,227	0,215	2,45			
	125	0,795	0,32	0,23	0,22				
	140	0,80	0,32	0,231	0,22		Echant. d'eau		
	155	0,80	0,328	0,234	0,30				
	170	0,85	0,326	0,237	0,27				
	185	0,81	0,33	0,24	0,275				
	200	0,81	0,332	0,243	0,27				
	215	0,815	0,337	0,25	0,29	2,45			
14h00	230	0,815	0,336	0,247	0,28				
	14h30	260	0,82	0,34	0,26	0,28			
	290	0,97	0,39	0,29	0,295	2,18			
	310	0,85	0,36	0,295	0,305	2,39			
	320	0,85	0,359	0,27	0,30				

Essai de pompage - ZIGLA KOULPELE - Descente (suite)

20/11 78	16h00	350	0,85	0,361	0,274	0,315	2,43	
		410	0,855	0,37	0,282	0,325		
	18h00	470	0,86	0,38	0,31	0,345	2,445	
		530	0,86	0,385	0,31	0,36		
	20h00	590	0,87	0,39	0,32	0,395		
	710	0,85	0,382	0,325	0,40			
	Minuit	830	0,79	0,352	0,31	0,40		
21/11	2h00	950	0,75	0,322	0,29	0,37		
	4h00	1070	0,71	0,30	0,28	0,37		
	6h00	1190	0,65	0,27	0,265	0,36	3,45	
	7h00	1250	0,90	0,36	0,335	0,39	2,30	
	8h00	1310	0,90	0,37	0,34	0,42		
	10h00	1430	0,89	0,38	0,345	0,43	2,41	Echant. d'eau
	12h00	1550	0,845	0,378	0,335	0,43	2,57	
	14h00	1670	0,73	0,325	0,30	0,40		
	16h00	1790	0,705	0,316	0,285	0,38	3,35	Réglé à 2,20
	18h00	1910	0,915	0,345	0,28	0,462		
	20h00	2030	1,04	0,46	0,40	0,50		
		2150	0,94	0,435	0,39	0,50		
		23h40	2250	-	-	-	-	

Essais de pompage - ZIGLA KOULPELE - Remontée

Date	Heure	t mn	t' mn	$\frac{t}{t'}$	Rabattements résiduels				Observations			
					Forage	P1	P2	P3				
21/11	23h40	2250	0		-	-	-	-	Arrêt du pompage t = temps depuis le début de pompage t' = temps depuis le début de la remontée			
		1	2250	0,85	-	-	-	-				
		2	1125	0,53	-	0,40	0,51					
		3	750	0,40	0,36	0,32	0,495					
		4	563	0,35	0,28	-	0,495					
		5	451	0,34	0,26	0,30	0,49					
		8	282	0,32	0,24	0,28	0,48					
		10	226	0,30	0,22	0,27	0,47					
		12		0,29	0,21	0,25	0,46					
		14		0,28	-	-	-					
		15		0,28	0,20	0,25	0,45					
		16		0,27	0,19	0,25	0,45					
		18		0,27	0,19	0,24	0,45					
		20	113,5	0,26	0,18	0,23	0,44					
		25		0,25	0,175	0,225	0,41					
		22/11	24h00	2270	30	76	0,24	0,165		0,215	0,50	Prélèvement
				2285	35		0,23	0,16		0,21	0,45	
				2290	40	57,2	0,22	0,15		0,19	0,41	
2295	45				0,21	0,145	0,20	0,39				
2300	50			46	0,21	0,14	0,185	0,37				
2305	55				0,21	0,13	0,17	0,36				
2310	60			38,5	0,20	0,13	0,18	0,35				
2320	70			33,14	0,19	0,12	0,16	0,34				
1h00	2330			80	29,12	0,185	0,115	0,16	0,31			
2340	90			26	0,18	0,11	-	0,31				
2343	93			-	-	-	0,15	-				
2350	100			23,5	0,17	-	0,14	0,30				
2352	102			-	-	0,104	-	-				
1h30	2360			110	21,45	0,165	0,10	0,14	0,29			
2375	125			19	0,16	0,097	0,14	0,28				
2h00	2390			140	17,07	0,155	0,09	0,14	0,27			
2405	155			15,5	0,15	0,086	0,135	0,26				
2420	170			14,23	0,145	0,083	0,12	0,255				
2435	185			13,16	0,142	0,080	0,12	0,25				
3h00	2450			200	12,25	0,14	0,077	0,10	0,242			
2480	230			10,8	0,13	0,074	0,11	0,23				
4h00	2510			260	9,65	0,13	0,073	0,105	0,22			
2570	320	8,03	0,127	0,07	0,098	0,20						
6h00	2630	380	6,92	0,125	0,069	0,097	0,19					
2690	440	6,11	0,125	0,069	0,095	0,172						
8h00	2750	500	5,5	0,125	0,069	0,095	0,16					
2810	560	5,01	0,125	0,073	0,095	0,15						
10h00	2870	620	4,63	0,12	0,069	0,09	0,13					
12h00	2290	740	4,04	0,105	0,054	0,075	0,10					
14h00	3110	860	3,61	0,095	0,041	0,06	0,085	Fin remontée				

2 - SITE EXPERIMENTAL DE MOGTEDO RAPADAMA V62.1 Equipement de la station expérimentale (fig. 24)

Les deux forages d'exploitation existants ont été implantés par P. BERARD⁽¹⁾ en 1977 pour alimenter en eau le village V6 installé par l'AVV.

	Forage d'essai F	Piézomètre P1	Piézomètre P2	Piézomètre P3
Aquifère capté	fracturé	fracturé	fracturé	fracturé
Profondeur en m	37	45	37	45
Diamètre du tube	125 x 112,5	125 x 112,5	125 x 112,5	125 x 112,5
Hauteur tubée	21	25	21	17
Hauteur crépinée	16	20	16	28
Nivellement relatif	0	+ 29,5 cm	+ 7,5 cm	+ 39 cm
Niveau statique m (*)	14,49	12,70	14,44	15,01
Distance au forage F	0	4	11,30	17,30
Orientation	-	N 200°E	N 230°E	N 280°E
Débit estimé m ³ /h	2	0,350	1,5	très faible

(*) Niveaux non stabilisés. La cote zéro est la dalle de béton du forage F.

2.2 Structure géologique (fig. 25 et 26)

Après 15 à 20 m d'altération argileuse verdâtre micacée recoupée par des filons de quartz, les forages pénètrent dans la roche.

Les vitesses d'avancement relevées par M. IMBERT permettent de distinguer des roches "tendres" verdâtres, foliées avec des amphibolites et des roches plus dures avec des grano-diorites.

Les roches "tendres" paraissent plus fissurées et broyées en cours de forage, mais le débit de la roche peut être dû uniquement à la foliation. Les roches dures sont grenues, massives, mais les venues d'eau indiquent une fracturation certainement plus développée que celle observée en cours de forage.

(1) Pierre BERARD, hydrogéologue de Géohydraulique détaché à l'AVV Ouagadougou.

Figure 24

Schéma de la station expérimentale de Mogtedo

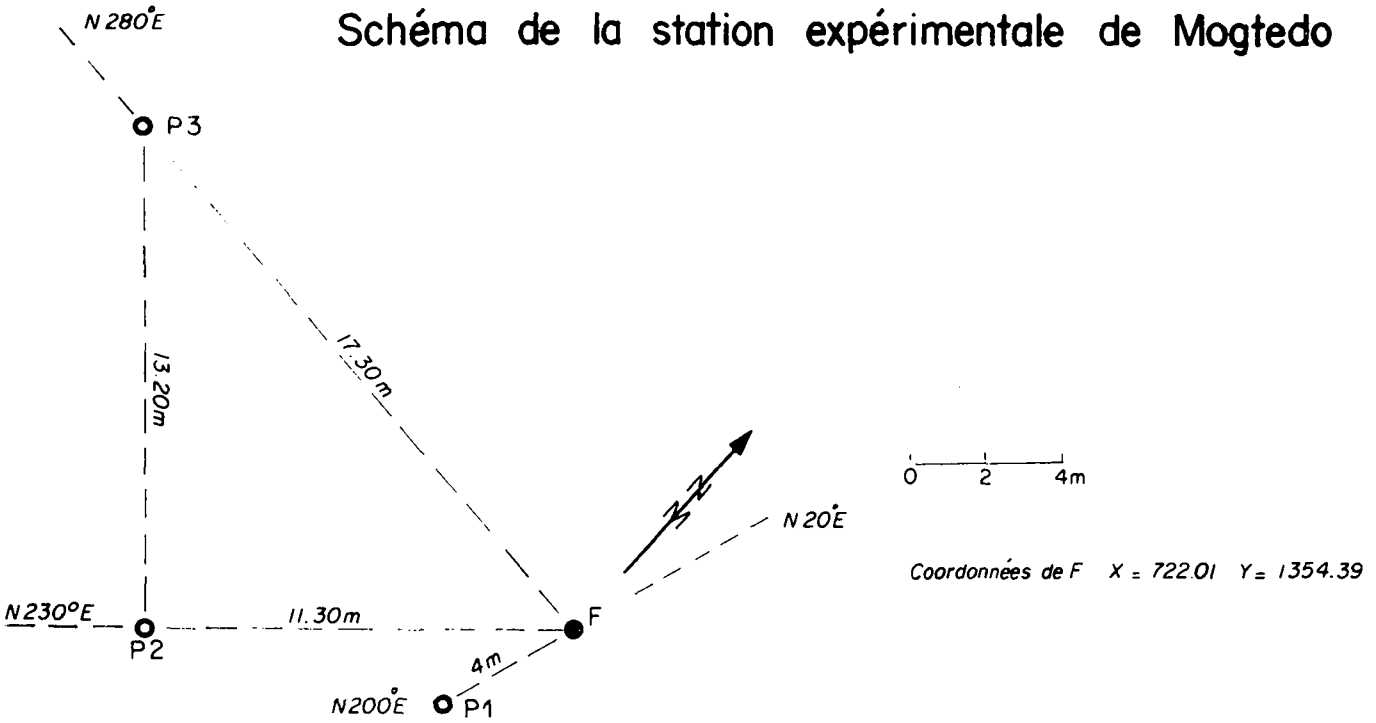


Figure 25

Coupe géologique récapitulative des forages

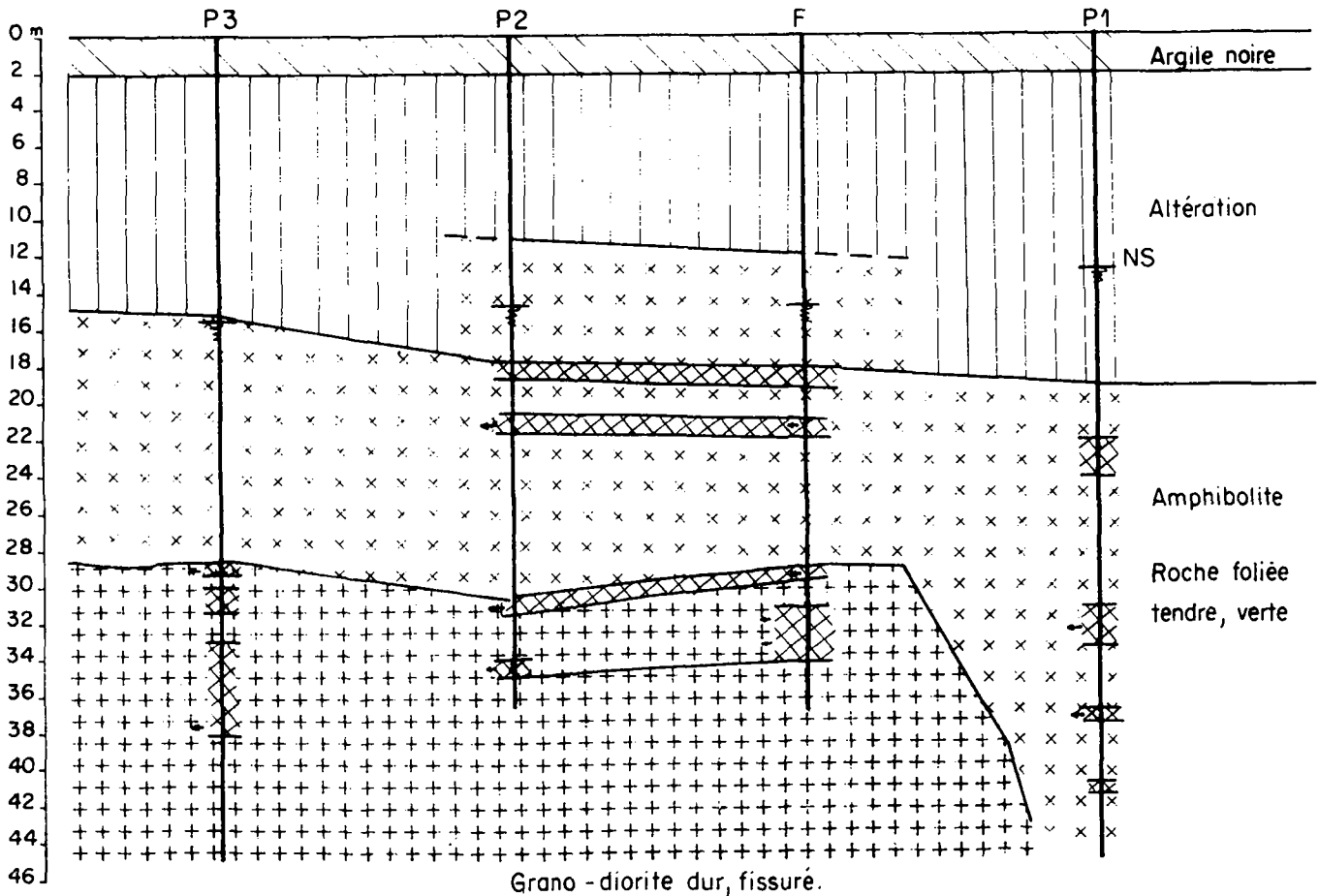
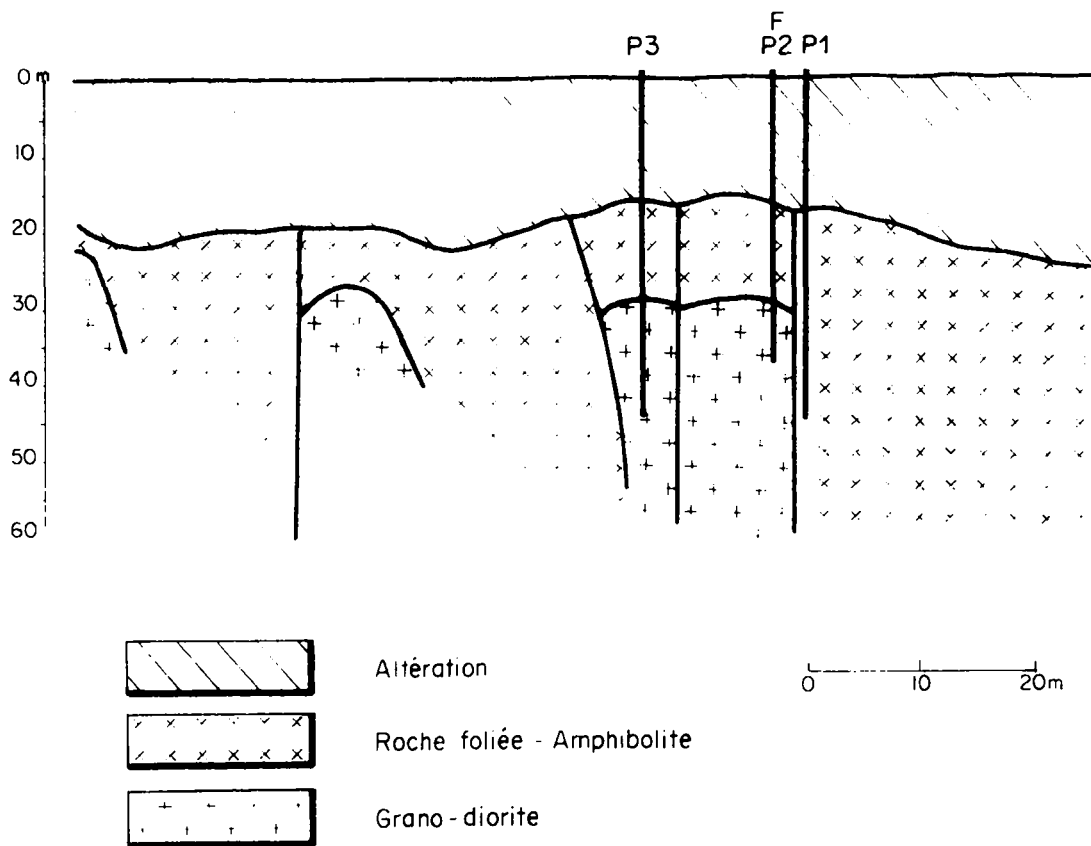


Figure 26
Interprétation géologique du site de Mogtedo



	P1		P3	
	Vitesse d'avancement	Interprétation géologique	Vitesse d'avancement	Interprétation géologique
1 tige 3 m	9 mn	Zone Altérée 19,50 Roche fissurée Roche dure 37 Roche tendre 45	8 mn	Altération
2 " "	9 mn		7 mn	
3 " "	7 mn		6 mn	
4 " "	7 mn		6 mn	15,50
5 " "	8 mn		7 mn	
6 " "	13 mn		23 mn	Roche
7 " "	36 mn		20 mn	
8 " "	53 mn		21 mn	tendre
9 " "	94 mn		29 mn	
10 " "	93 mn		38 mn	31
11 " "	91 mn		92 mn	
12 " "	76 mn		95 mn	Roche dure
13 " "	57 mn		75 mn	
14 " "	55 mn		80 mn	(grano-diorite)
15 tige 2 m	38 mn		65 mn	

La zone altérée est bien individualisée. Par contre, la zone fissurée s.s (à la base de l'altération) est peu marquée ; elle n'est pas soulignée par les habituelles brusques venues d'eau. Quelques suintements s'observent dans les forages F et P2.

Les grano-diorites et les gabbros sont massifs et paraissent moins fracturés que les roches foliées alors que la localisation des venues d'eau prouve le contraire.

Les coupes géologiques des forages peuvent entraîner des interprétations hydrologiques erronées ; les roches à débit folié ou les roches à fractures fermées ne sont pas nécessairement de bons réservoirs contrairement à des roches massives, dures, mais compétentes qui paraissent peu fissurées.

2.3 Les venues d'eau

En cours de forage, l'altération présente des traces d'humidité peu marquées au niveau de la zone saturée. Dans les forages F et P2 il faut arriver jusqu'à une trentaine de mètres de profondeur pour observer des venues d'eau importantes. Le niveau remonte brusquement de 15 m. Les débits sont produits essentiellement par les horizons fissurés de 29 à 34 mètres.

Dans le P1 qui ne produit qu'un débit faible (0,350 m³/h) les venues d'eau s'observent à 22 - 23 m ; 31 - 33,50 m, et en particulier vers 37,50 m et 41 m.

Dans le P3 quasi stérile : traces d'humidité à 29,50 m, de 30 à 31,50 m, de 33,5 à 38,5 m. Très faible venue d'eau à 38,50 m.

2.4 Le système aquifère

Le système aquifère se compose :

- . d'un niveau supérieur poreux (altération) qui est saturé sur une épaisseur variant de 0 m au P3 à 6 m au P1. Dans les forages productifs (F et P2) l'épaisseur mouillée est de 3 m. On peut penser qu'en période d'étiage le niveau piézométrique peut se localiser dans la roche fissurée.
- . d'un aquifère de fissures présentant des hétérogénéités verticales et latérales : roche verte foliée peu productrice jusqu'à 30 m de profondeur et dont la faible perméabilité permet une mise en charge notable, un ensemble de roches compétentes (grano-diorite, gabbro) qui fournissent la quasi totalité des débits.

Un système de failles limite parfaitement les roches compétentes qui se présentent comme un filon de 10 à 20 m de large orienté N 45-50° E. (fig. 26 et 32).

Les forages F et P2 sont implantés dans le filon principal, le P3 sur une protubérance locale de ce filon, et le P1 évite les grano-diorites et pénètre uniquement les roches vertes.

Entre l'altération et la roche, l'absence de la zone fissurée s.s est due à la lithologie : les roches foliées peu grenues s'altèrent rapidement et donnent des altérites argileuses sans horizon arénacé ni fissuré.

Le système hydraulique se résume à trois niveaux :

- . un niveau supérieur poreux, argileux, saturé sur une faible épaisseur (3 m),
- . un niveau intermédiaire de 12 m d'épaisseur en moyenne, à porosité de fissure mais de faible productivité,
- . un niveau inférieur à porosité de fissure, fournissant l'essentiel des débits. Ce niveau est cloisonné par des fractures importantes.

2.5 Interprétation des essais de pompage

2.51 Durée des essais

La descente des niveaux a duré 40 h du 15.11.78 à 14h30 au 17.11.78 à 6h30. La remontée a été suivie pendant 5 h.

2.52 Piézométrie

La disposition des ouvrages permet de tracer des esquisses piézométriques, en assimilant le système à un milieu poreux.

Cette approximation indique la direction des écoulements et reflète la présence d'un seuil hydraulique très marqué, rectiligne, parallèle à l'alignement F - P2 et isolant P1. Ce seuil se superpose à la limite faillée du filon de grano-diorite.

Avant le début de l'essai, les niveaux n'étaient pas complètement stabilisés, l'écoulement semble avoir une direction moyenne N 230° depuis le P1 vers le P3. Le seuil hydraulique est souligné par une perte de charge de 1,70 m sur une distance de 1 m environ.

La faille passant entre le P1 et la ligne F - P2 est un écran de très faible perméabilité.

Les esquisses tracées en début (to + 15 mn) et en fin de l'essai (to + 2370 mn) se superposent (fig. 27) aux différences de rabattements près ; dès le début du pompage l'anisotropie est marquée et la direction d'anisotropie hydraulique n'évolue pas dans le temps, même en fin de pompage en régime pseudo-permanent. Au repos, on a d'ailleurs le même schéma hydraulique.

En fin de pompage la dénivellation piézométrique atteint 3,23 m au niveau du seuil.

Entre le P3 et la ligne F - P2 l'écoulement doit être perturbé par une faille qui recoupe le filon de grano-diorite. Cette faille peut aussi jouer le rôle de seuil hydraulique de faible perméabilité. La figure 28 montre qu'il peut exister une infinité de cheminements pour les filets d'eau à l'intérieur du filon.

2.53 Graphique des rabattements en fonction du log. des temps (fig.29)

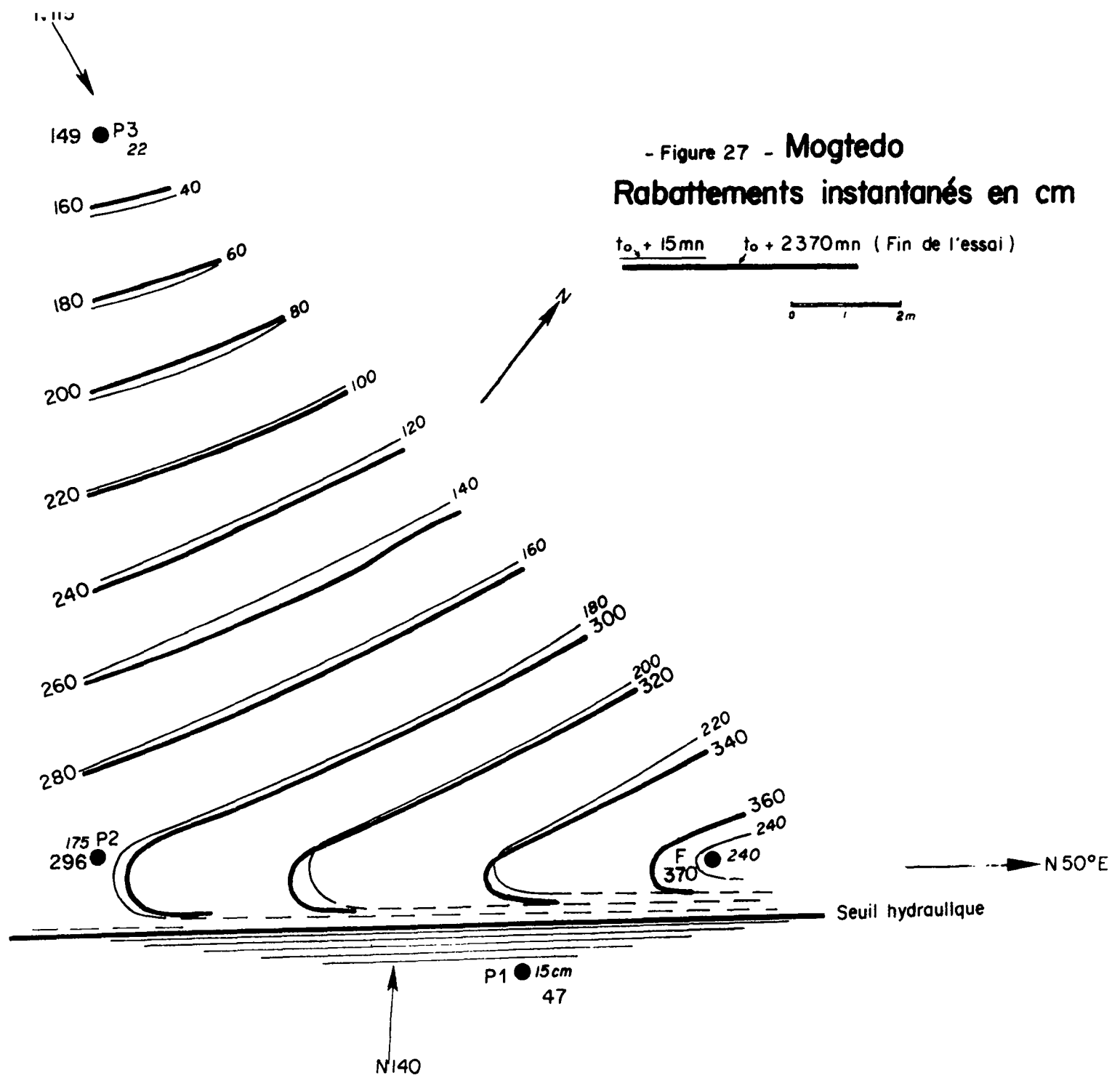
Le débit de pompage (0,470 m³/h) est rigoureusement constant. L'évolution des niveaux dans le forage de pompage et dans le P2 est semblable : les niveaux chutent pendant 40 minutes, puis la descente ralentit progressivement pour aboutir à un régime pseudo-stabilisé au bout de 8 h de pompage. La stabilisation se poursuit jusqu'à la fin de l'essai pendant 32 h. Notons un décrochement des courbes au début de la stabilisation, sans changement de débit, indiquant une perte de charge liée au système aquifère.

Ce changement dans les caractéristiques du milieu se répercute dans les piézomètres. Immédiatement dans le P2 ; avec près de 2 heures de retard pour le P3 et d'une façon peu perceptible dans le P1.

La courbe du P3 est différente : les réactions sont plus tardives et les rabattements moins marqués mais nettement plus élevés que dans le P1 malgré l'éloignement plus grand : l'évolution des potentiels hydrauliques est indépendante de la distance du point d'observation au point d'extraction.

Cette observation est confirmée par l'impossibilité de tracer les droites des rabattements en fonction des distances (s/log x). L'aquifère réagit vraiment comme un milieu fissuré : l'hétérogénéité et l'anisotropie géologiques sont confirmées par l'hétérogénéité et l'anisotropie hydrodynamiques.

Sur un graphique $s/\log \frac{t}{x^2}$ il n'est pas possible de faire coïncider les courbes, et les décalages indiquent que le cheminement de l'eau est plus long que celui de la ligne droite ; le parcours de l'eau s'effectue en empruntant le réseau de fissures (parcours en "baïonnette").



● P3

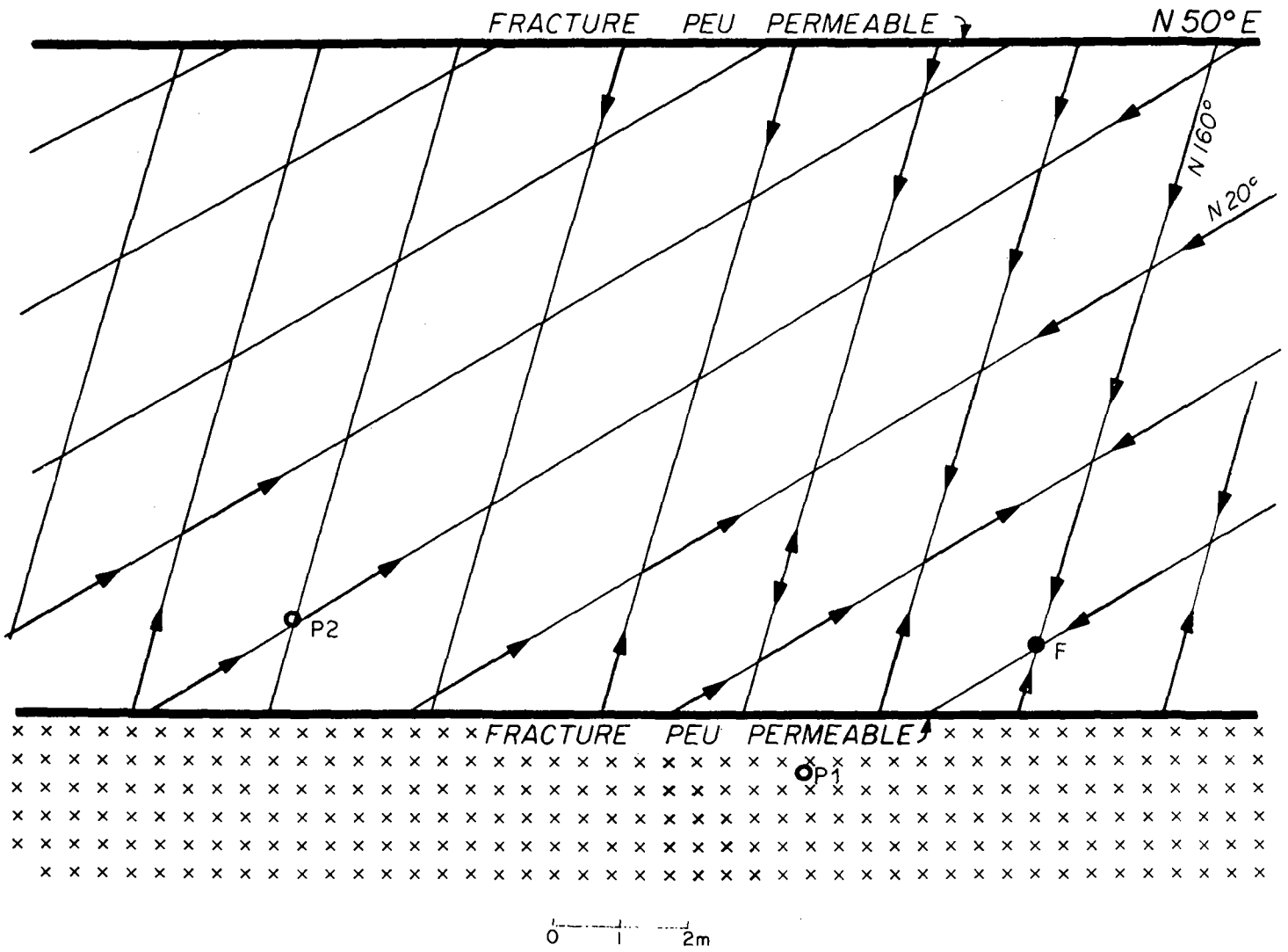


Figure 28

Réseau de fractures ouvertes au sein du filon de grano-diorite
Site de Mogtedo

2.54 Graphique des rabattements résiduels (remontée) en fonction du logarithme du temps (fig. 30)

Les courbes de remontée sont rigoureusement symétriques des courbes de descente des niveaux d'eau.

Les courbes sont en S avec une zone d'inflexion qui ne permet pas l'évaluation des caractéristiques hydrodynamiques.

Tous ces graphiques traduisent assez mal la présence des accidents. En particulier, la stabilisation semble contraire à l'existence du seuil hydraulique.

Cette observation confirme l'anisotropie du milieu : il existe une polarisation des écoulements confinée dans le filon de grano-diorite et peu influençable par les limites peu perméables.

2.55 Graphique log s/log t (fig. 31)

Le graphique montre une évolution vers la stabilisation et ne décèle pas l'influence des limites peu perméables. La stabilisation est l'indice d'une suralimentation relative (débit retardé) imputable à :

- . un léger apport éventuel par la tranche saturée des altérites. Contre cette hypothèse notons que le P3 n'induit pas les altérites,
- . un apport par les micro-fissures de diffusivité différente au sein du filon lui-même,
- . un apport non négligeable à partir des suintements de la masse latérale et sus-jacente des roches foliées.

La courbe log s/log t se superpose à la courbe standard de Theis pendant les 40 premières minutes puis à une courbe de l'abaque Hantush.

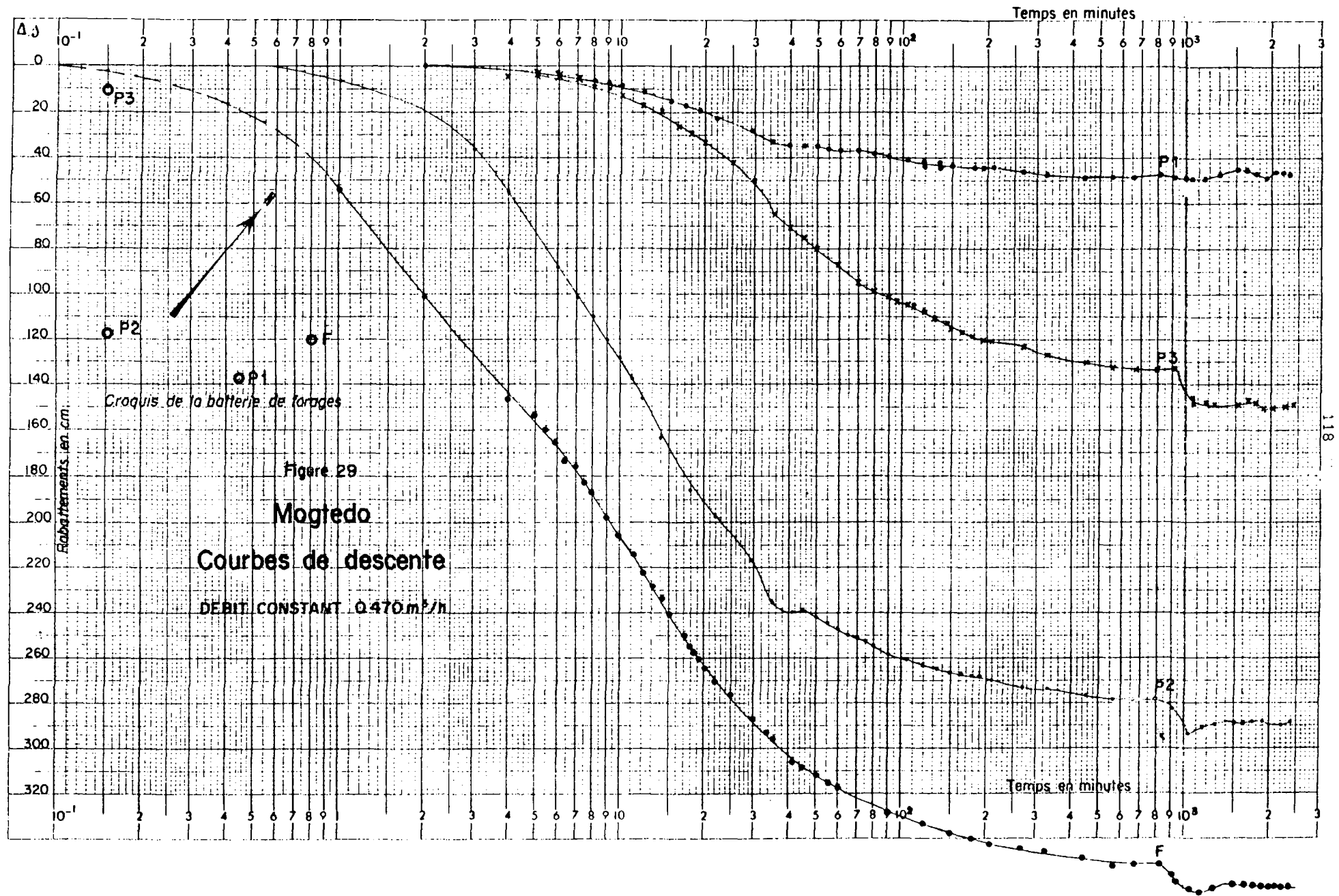
2.56 Détermination des caractéristiques hydrodynamiques

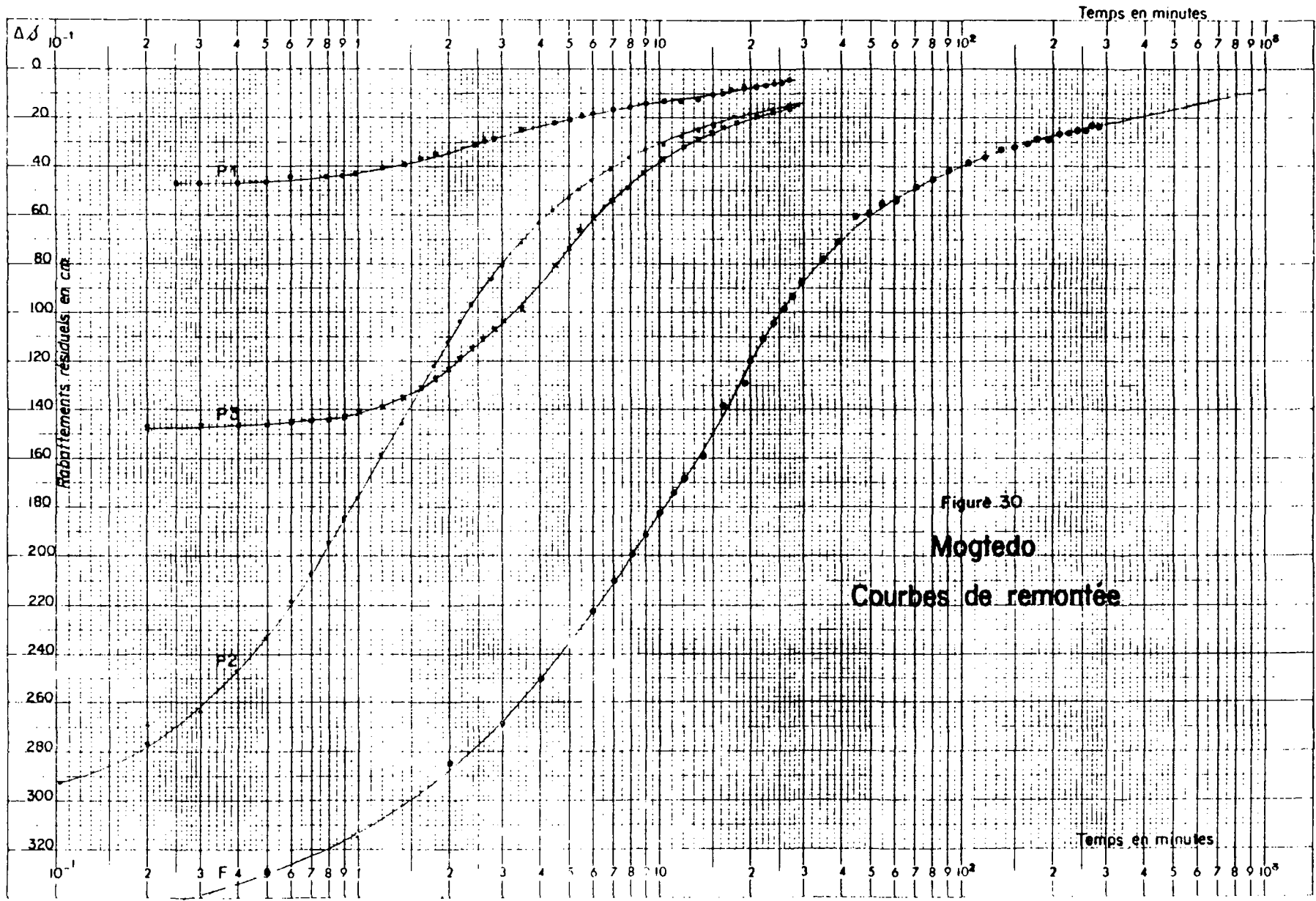
Le modèle hydrodynamique étant un multicouche dont les niveaux n'ont pas été étudiés spécifiquement, il n'est pas possible de calculer des caractéristiques d'autant plus que l'hétérogénéité s'accompagne d'une forte anisotropie caractéristique du milieu fissuré.

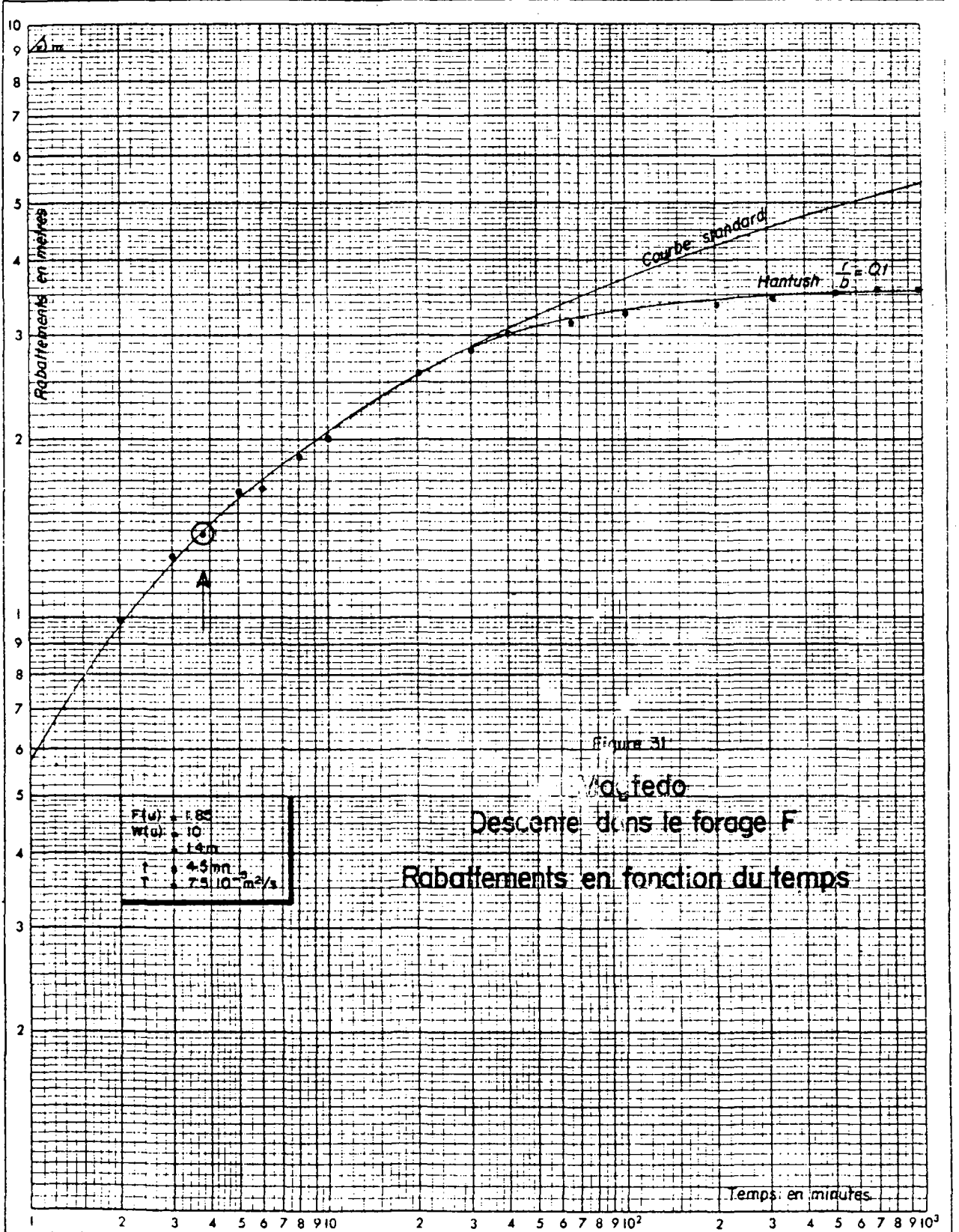
La "Transmissivité" calculée sur les forages F et P2 en début d'essais (descente et remontée) varie de 1,25 à $7,5 \cdot 10^{-5}$ m²/s. Le coefficient d'emmagasinement ne peut être évalué car la distance d'observation n'a plus de signification. Sur le P2 la porosité efficace calculée est $S = 2,64 \cdot 10^{-5}$. La diffusivité hydraulique est faible.

2.57 Remarques sur le débit de l'ouvrage d'exploitation

A la fin de l'opération de forage, le débit de l'ouvrage a été estimé à 2 m³/h par le procédé à l'air lift.







Dans notre essai à 0,470 m³/h la stabilisation a été obtenue avec un rabattement de 3,70 m, faible, mais suffisant pour dénoyer les altérites.

Pour obtenir 2 m³/h il faut envisager un rabattement de l'ordre de 15 mètres (en admettant que le rabattement est proportionnel au débit, ce qui reste à démontrer).

Le niveau dynamique se trouvera alors à - 30 m, au toit des grano-diorites.

Cette baisse des niveaux est trop forte pour un forage de 37 m de profondeur ; il n'est pas certain que le drain puisse libérer ce débit et que la stabilisation soit maintenue. Les venues d'eau principales sont à la limite du dénoyage.

Il faudrait pomper à 2 m³/h pendant une journée au moins pour suivre l'évolution des niveaux que l'on ne peut pas calculer dans ce système aquifère.

Il serait préférable de ne pas rabattre plus de 10 m, c'est-à-dire ne pas pomper à plus de 1,5 m³/h.

2.6 Fonctionnement du système aquifère

L'anisotropie du milieu très marquée mise en évidence par la géophysique (fig. 32), par les coupes de forages (fig. 25), par les esquisses piézométriques (fig. 27 et 28) et par le manque de relation entre l'évolution des niveaux d'eau et les distances par rapport au puits d'exhaure, semble en contradiction avec la stabilisation durable des niveaux en cours de pompage. Le filon de grano-diorite se comporte en bloc comme un axe drainant la grande masse des roches vertes foliées (fig. 33) les failles en compression, peu perméables se confondent avec l'interface qui sépare un milieu de bonne perméabilité (le filon) et un milieu peu perméable (roches vertes) ; failles et roches vertes doivent avoir des perméabilités voisines. L'écoulement polarisé dans les fissures du drain, ne subit pas l'influence des limites.

Le grand pouvoir drainant du filon explique la stabilisation. Les roches vertes, extrêmement découpées par les plans de foliation quasi fermés par la compression ont un rôle capacitif et accessoirement conducteur à la faveur des fissures secondaires ou de filonnets compétents.

Les altérites argileuses, saturées sur une faible épaisseur, ne sont induites par le pompage qu'à travers les roches vertes peu perméables. Leur participation dans le débit doit être faible mais non négligeable au niveau de la réserve utile.

Seuls, les forages implantés dans le filon principal peuvent être productifs. Les nombreux sondages réalisés dans la région sont inexploitablement en raison de la faible productivité des roches métamorphiques, de l'absence d'un aquifère dans l'altération et d'un système drainant.

La lithologie a une grande influence sur la fréquence et l'ouverture des fractures : plus la roche est compétente, plus elle est perméable ; plus elle est "tendre", moins les circulations sont faciles. Les fractures longitudinales sont peu perméables conformément aux observations de surface ; les fractures transversales aux structures (N 20° et N 150 - 170°) sont ouvertes et conductrices.

Fig 32 Mogtedo – Interprétation structurale de la carte des résistivités apparentes

- Axe résistant $N15^\circ$ Orientation de l'axe
- Axe conducteur
- Fracture
- ++++ Grano-diorite
- /// Roches métamorphiques

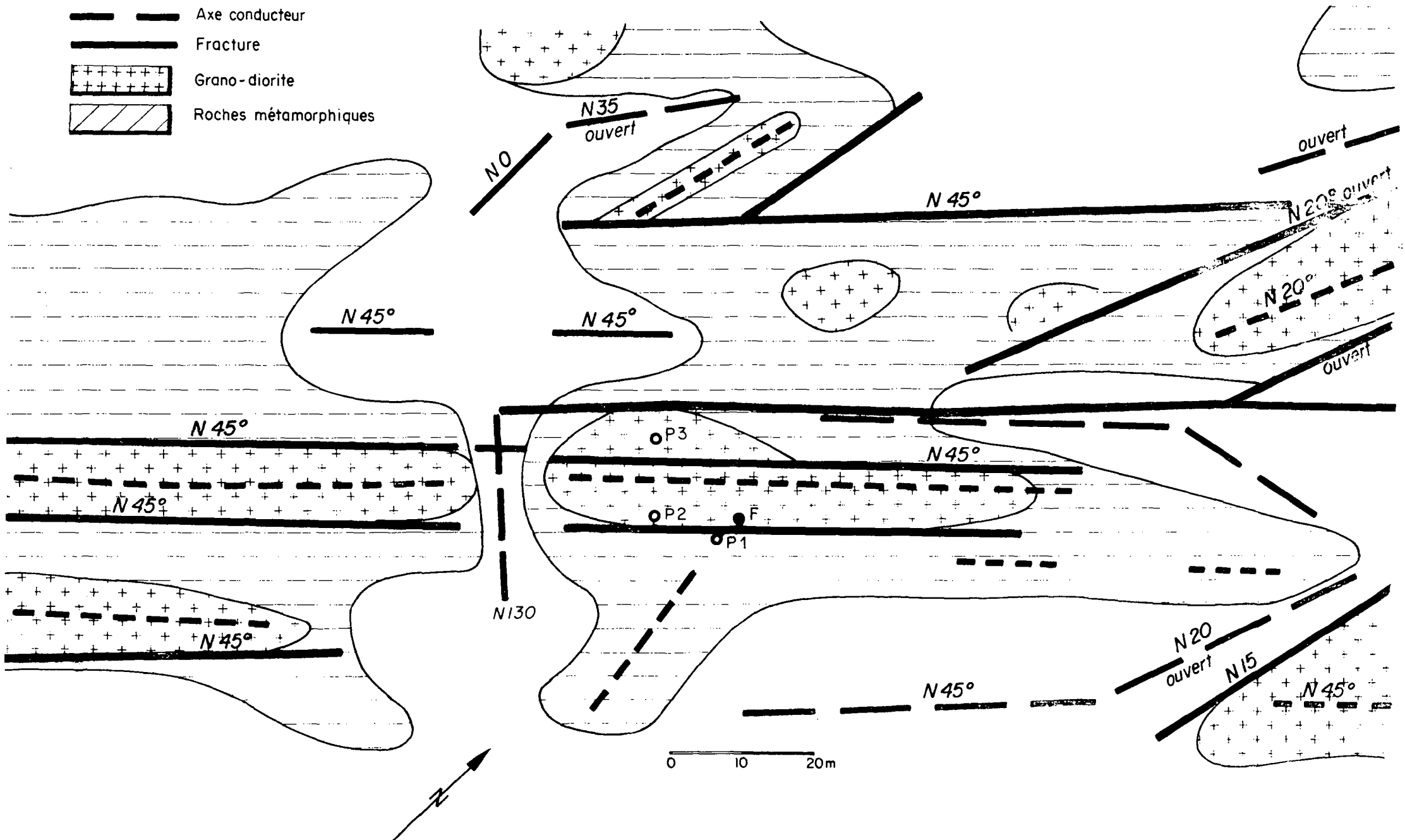
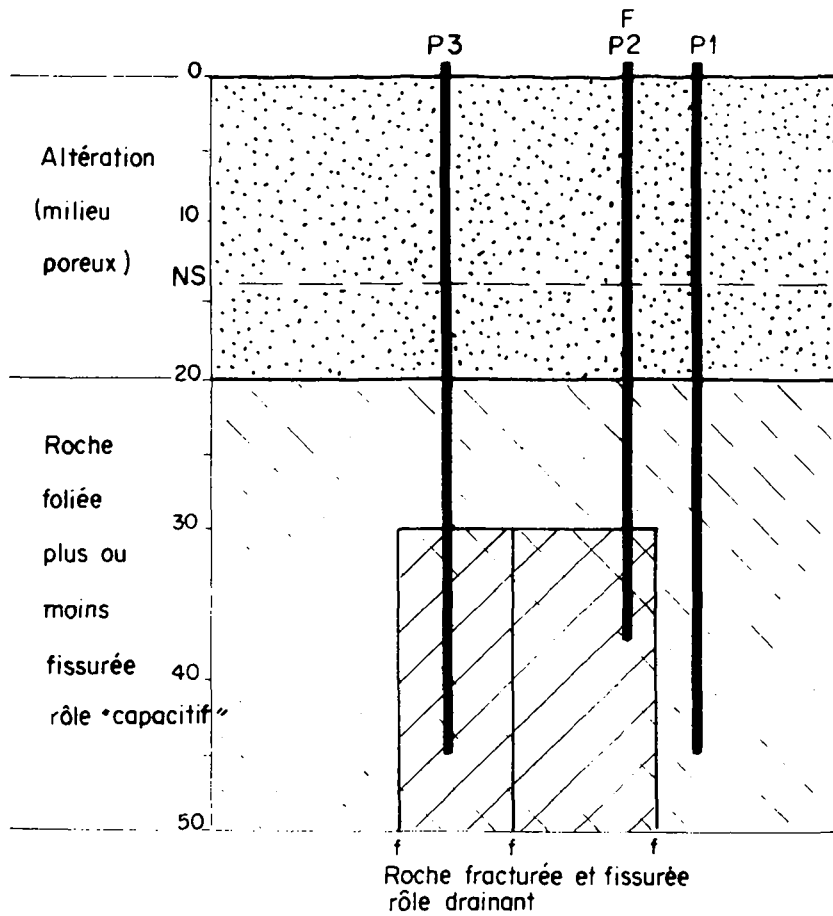


Figure 33 Schéma du système aquifère de Mogtedo



f failles en compression. Limites peu perméables

Les observations tectoniques de surface auraient déconseillé le choix de la fracture N 45-50 effectué par photo-interprétation, car ces fractures en compression sont fermées.

La géophysique aurait déconseillé ce site car les forages sont placés sur la zone la plus résistante.

La "fracture" relevée par photo-interprétation correspond à un alignement de roches compétentes, plus résistantes électriquement que les roches métamorphiques mais fracturées transversalement.

L'intuition, découlant d'une bonne connaissance du terrain, a amené M. BERARD à formuler un diagnostic particulièrement heureux : à 1 m près les forages étaient inexploitable.

Essai de pompage de MOGTEDO - Descente

Date	Heure	temps en mn	Rabattements en mètres				Débit temps en mn	Observations
			F	P1	P2	P3		
15/11 78	14h30	0	N.S = 14,43	N.S = 13 m	N.S = 14,52	N.S = 15,36		
		1	0,54	0	0,6	-		Bidon de 32 l
		2	1,01	0	0,17	-		
		2,5	1,16	-	-	-		
		3	1,29	-	0,36	-		
		3,5	1,38	-	-	-		
		4	1,48	-	0,54	0,005		
		5	1,54	-	0,72	0,02		
		5,5	1,60	-	-	-		
		6	1,66	-	0,88	0,04		
		6,5	1,74	-	-	-		
		7	1,77	0,06	1,02	0,06		
		7,5	1,83	-	-	-	3,32	
		8	1,87	0,07	1,10	0,08		
		9	1,99	0,08	1,21	0,095		
	10	2,06	0,09	1,29	0,12			
	11	2,15	-	1,38	-			
	12	2,23	0,105	1,46	0,17			
	13	2,29	-	-	-			
	14	2,34	-	1,64	0,19			
	15	2,40	0,150	-	0,26	3,37		
	17	2,50	0,175	-	-			
	18	2,58	-	1,86	0,29			
	19	2,60	0,195	-	-			
	20	2,65	-	1,91	0,33			
	22	2,71	0,220	1,99	-			
	24	2,76	-	-	-			
	25	2,79	0,240	-	0,42			
	26	2,80	-	-	-	4,05		
	30	2,89	0,272	2,17	0,50			
33	2,94	-	-	-				
35	2,96	0,332	2,37	0,65				
41	-	0,340	-	0,70	3,58			
42	3,09	-	2,40	-				
45	3,09	0,348	2,36	0,755				
50	3,12	0,351	2,42	0,80	4,02			
55	3,16	0,363	2,45	0,84				
15h30	60	0,373	2,47	0,87	4,00			
65	3,21	-	2,50	-				
70	3,23	0,372	2,51	0,96				
75	3,24	-	2,53	-				
80	3,26	0,387	2,55	0,99	4,05			
16h00	90	0,400	2,59	1,02				
95	3,32	-	2,61	1,06				
120	3,34	0,411	2,64	1,085				
135	3,35	0,420	2,65	1,150				
17h00	150	0,43	2,66	1,165				
165	3,40	-	2,67	1,17				
180	3,40	0,44	2,68	1,19	4,047			
195	3,42	0,44	2,68	1,20				

Mesure collective

Echant. to + 30

Echant. to + 1h
mesure collectiveMesure à 16h20
Echant. to + 2h

Mesure à 17h35

Essai de pompage de MOGTEDO - Descente (suite)

15/11	18h00	210	3,43	0,442	2,70	1,21	4,07	Echant. à 17h30
	78 19h00	270	3,45	0,46	2,73	1,24		
	20h00	330	3,465	0,47	2,64	1,27		
	22h00	450	3,49	0,48	2,76	1,30		
16/11	24h00	570	3,52	0,482	2,79	1,33	4,09	
	2h00	690	3,525	0,472	2,795	1,32		
	4h00	810	3,52	0,473	2,795	1,315		
	6h00	930	3,57	0,483	2,83	1,33		
	8h00	1050	3,62	0,495	2,88	1,46		
	10h00	1170	3,64	0,495	2,91	1,48	4,13	
	12h00	1290	3,62	0,48	2,90	1,49	4,11	
	14h00	1410	3,64	0,46	2,91	1,485		
	16h00	1530	3,61	0,45	2,805	1,48	4,085	
	18h00	1650	3,62	0,46	2,90	1,47		
	20h00	1770	3,65	0,475	2,92	1,48		
	22h00	1890	3,67	0,485	2,94	1,505		
17/11	24h00	2010	3,68	0,475	2,955	1,505	4,13	
	2h00	2130	3,66	0,465	2,935	1,50		
	4h30	2250	3,68	0,47	2,95	1,495		
	6h00	2370	3,70	0,475	2,96	1,49		
	6h30	2400	-	-	-	-		
								Arrêt de la descente
17/11	6h30	0	ND 17,94	-	2,98	1,49	Début de la remontée	
		1	3,15	0,475	2,90	1,48		
		2	2,85	0,475	2,78	1,48		
		3	2,69	0,47	2,63	1,47		
		4	2,50	0,465	2,47	1,47		
		5	2,35	0,46	2,34	1,46		
		6	2,82	0,455	2,19	1,46		
		7	2,10	0,45	2,07	1,45		
		8	2,00	0,445	1,95	1,44		
	6h40	9	1,91	0,44	1,85	1,43		
		10	1,82	0,41	1,76	1,42		
		11	1,74	-	-	-		
		12	1,68	0,40	1,59	1,39		
		14	1,52	0,395	1,44	1,35		
		16	1,39	0,37	1,32	1,31		
		18	1,29	0,355	1,22	1,27		
		6h50	20	1,20	0,34	1,12		1,23
			22	1,115	0,325	1,04		1,19
	24		1,05	0,31	0,97	1,15		
	26		0,99	0,295	0,91	1,11		
	28		0,93	0,285	0,86	1,07		
	7h00		30	0,88	0,28	0,81		1,04
			35	0,79	0,25	0,71		0,95
			40	0,712	0,253	0,63		0,87
			45	0,65	0,22	0,58		0,80
		50	0,60	0,21	0,53	0,73		
		55	0,56	0,20	0,49	0,66		
		60	0,54	0,19	0,46	0,62		
		70	0,485	0,172	0,41	0,54		
		80	0,45	0,158	0,37	0,48		
	8h00	90	0,41	0,15	0,34	0,42		
		105	0,385	0,132	0,31	0,37		

Essai de pompage de MOGTEDO - Remontée (suite)

17/11	8h00	120	0,36	0,123	0,28	0,32		
		135	0,33	0,115	0,25	0,29		
	9h00	150	0,32	0,10	0,24	0,26		
		165	0,30	0,09	0,23	0,235		
		180	0,288	0,08	0,21	0,22		
	10h00	195	0,28	0,075	0,20	0,20		
		210	0,265	0,07	0,19	0,19		
		225	0,26	0,06	0,18	0,18		
		240	0,25	0,055	0,17	0,17		
		255	0,24	0,045	0,16	0,16		
	11h00	270	0,23	0,04	0,16	0,14		Fin des mesures

ANNEXE III

ETUDE GEOPHYSIQUE PAR METHODES ELECTRIQUES DES SITES DE MOGTEDO ET DE ZIGLA KOULPELE (HAUTE VOLTA)

par **M.BRION**

J.C LACHAUD

ETUDE GEOPHYSIQUE PAR METHODES ELECTRIQUES DES SITES
DE MOGTEDO ET DE ZIGLA

1. Introduction
2. Interprétation des courbes de sondages électriques
3. Interprétation des profils et des cartes de résistivité apparente
4. Résultats de la prospection électrique réalisée avec le dispositif carré
5. Conclusions générales

1 - INTRODUCTION

1.1 But de l'étude

J.C. LACHAUD* a effectué une prospection géophysique par méthodes électriques sur deux sites, MOGTEDO et ZIGLA KOULPELE en République de Haute-Volta.

Les travaux de terrain se sont déroulés du 19 au 27 Avril 1978 et ont été exécutés sous les directives de Monsieur ENGALENC qui a choisi les sites et proposé le programme d'étude.

Cette étude devait nous permettre de tester sur deux sites connus par forage, plusieurs méthodes de prospection électrique, sondage type Schlumberger, traîné, rectangle, et le dispositif carré nouvellement expérimenté par nous-mêmes.

L'interprétation des mesures et la rédaction du rapport ont été réalisées par Michèle BRION* et Jean-Claude LACHAUD.

1.2 Renseignements statistiques

1.21 Moyens mis en oeuvre

Matériel : mallettes de prospection électrique par courant continu permettant de réaliser tous les dispositifs avec un maximum de longueur AB (dispositif Schlumberger) ou "a" (dispositif carré) de 1000 m.
Une camionnette bâchée Peugeot 404.

Personnel : 1 géophysicien - 1 chauffeur - 5 manoeuvres.

1.22 Travaux réalisés et problèmes posés

En huit jours de terrain, du 19 au 22 et du 24 au 27 Avril 1978, il a été effectué :

- . 12 sondages type Schlumberger
- . 10 sondages type carré
- . 3 400 m de traîné
- . 4 rectangles de 143, 132, 159, 143 mesures.

1.221 Le site de MOGTEDO est une poche altérée à la croisée de fractures. Deux forages sont implantés à 11 mètres l'un de l'autre directement sur une fracture. L'eau se trouve dans les fractures et le niveau statique remonte légèrement dans les altérites. Le débit des forages est de 1,5 m³/h au FM 22 (P2) et de 2 m³/h au FM 21 (F). Ces forages ont été implantés sans étude géophysique.

Les travaux de terrain sont localisés sur la figure 34. Le détail des mesures est indiqué ci-après :

* M. BRION - J.C. LACHAUD

Méditerranéenne Géoélectrique - 52 Grand Rue Jean Moulin 34 000 Montpellier

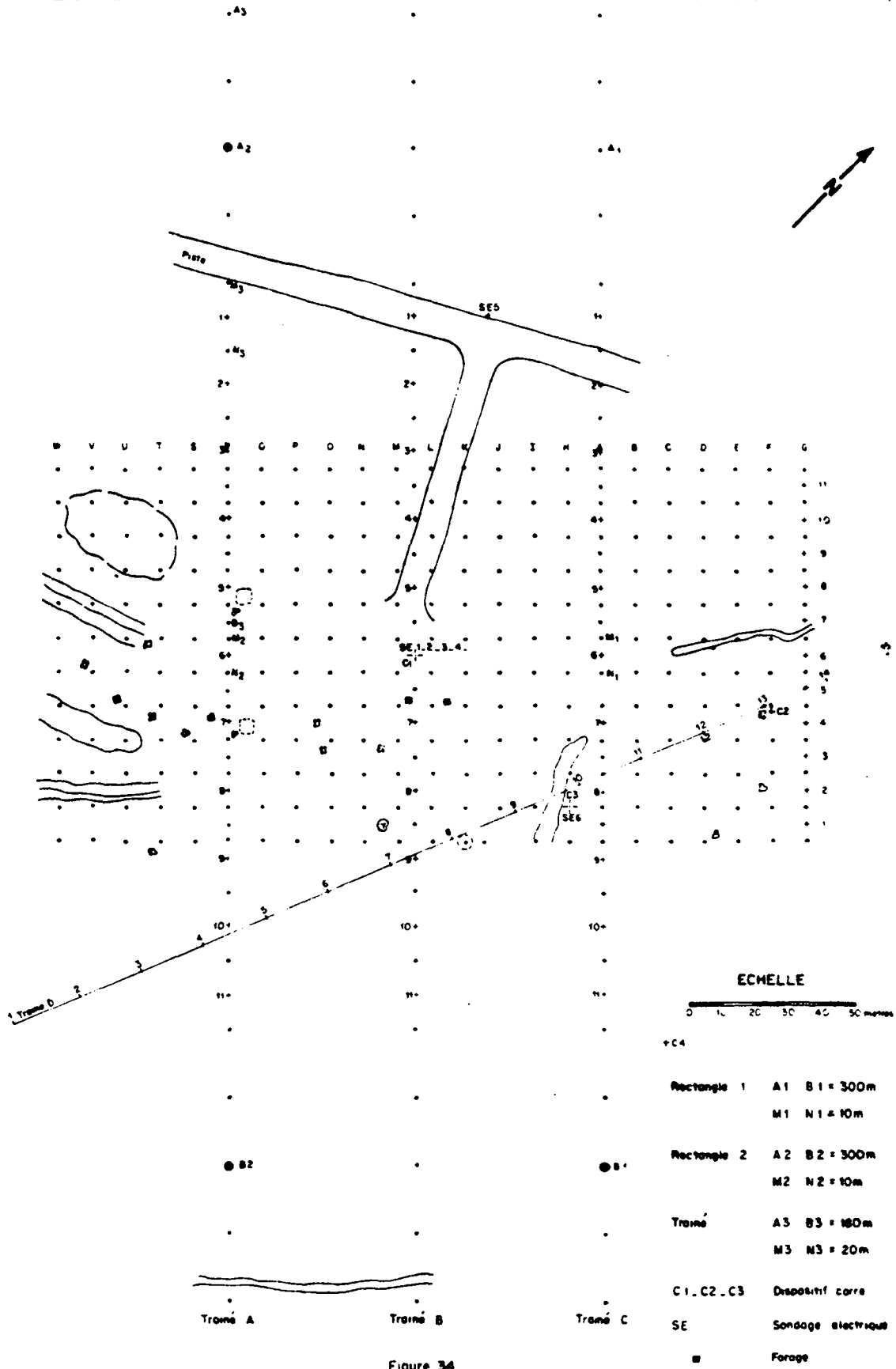


Figure 34

IMPLANTATION DES DISPOSITIFS DE MESURES REALISES A MOGTEDO

a) Sondages électriques Schlumberger (SE)

- . SE1, SE2, SE3, SE4 : sondage pluridirectionnel orienté de 50 en 50 grades - AB = 500 m, 27 mesures par sondage électrique.
- . SE5 : AB = 300 m, 22 mesures.
- . SE6 : AB = 500 m, 27 mesures.

b) Dispositif carré croisé (noté C)

- . C1 : 14 longueurs du côté du carré (de 11 m à 212 m)
- . C2 : 3 longueurs du côté du carré (70 m, 113 m, 770 m)
- . C3 : " " " " " "
- . C4 : " " " " " "

c) Trainés électriques : AB = 180 m, MN = 20 m

- . A orienté à 150 grades, longueur 220 m
- . B " " " "
- . C " " " "
- . D orienté à 25 et 30 grades, longueur 1280 m.

d) Rectangle : AB = 300 m, MN = 10 m - profils tous les 10 m

- . R1 : 143 mesures
- . R2 : 132 mesures

1.222 Le site de ZIGLA correspond à un couloir orienté NNE/SSO d'environ 300 mètres de large, altéré sur schiste et granito-gneiss fracturé entre deux alignements de granito-gneiss peu fracturé.

Une étude géophysique de la COMTEC (1967) par prospection électrique et sismique a permis d'implanter un forage ayant un débit de 5 m³/h (fig. 35 et 36). Notre étude, plus ponctuelle et plus détaillée que la précédente devait nous permettre de tester des méthodes classiques de prospection électrique à proximité du forage (plan de situation des travaux - fig. 37).

a) Sondages électriques Schlumberger (SE)

- . SE1 : AB = 300 m, 25 mesures
- . SE2, SE3 et SE4 : AB = 300 m, 25 mesures
- . SE5 : AB = 200 m, 23 mesures
- . SE6 : AB = 300 m, 25 mesures

b) Dispositif carré croisé (C)

- . C1, C2 et C3 : 2 longueurs du côté du carré : 21 m et 35 m
- . C4 : 3 longueurs du côté du carré, 21 m, 35 m, 56 m
- . C5 et C6 : 3 longueurs du côté du carré : 14 m, 21 m, 35 m

Figure 35

ZIGLA - ETUDE COMTEC 1967

CARTE DE RESISTIVITES APPARENTES

Trainé : A B = 100m

M N = 20m

-  Courbe isorésistivité
-  Zone étudiée
-  Forage

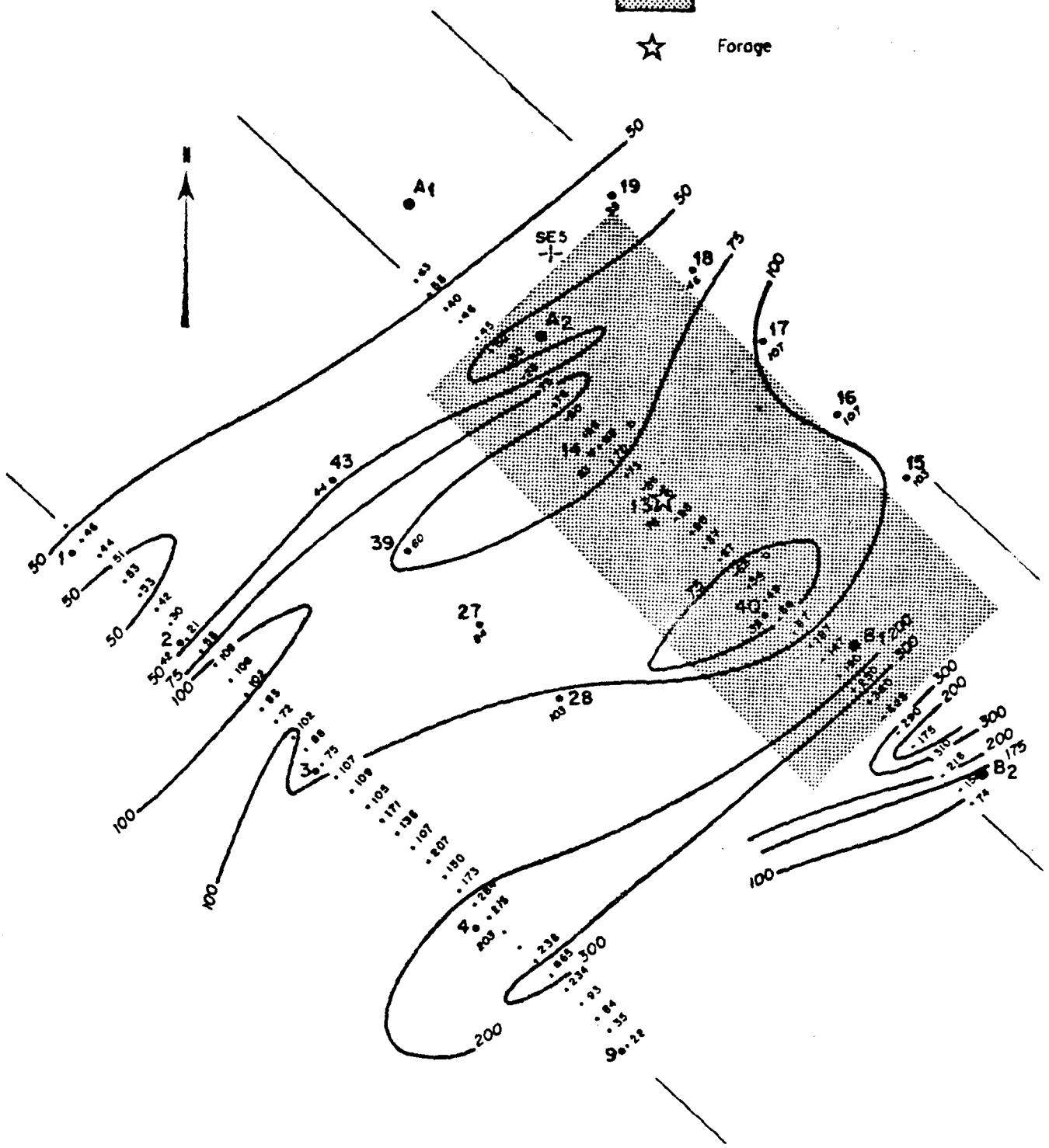


Figure 36

ZIGLA - ETUDE COMTEC 1967

SISMIQUE ET SONDAGES ELECTRIQUES

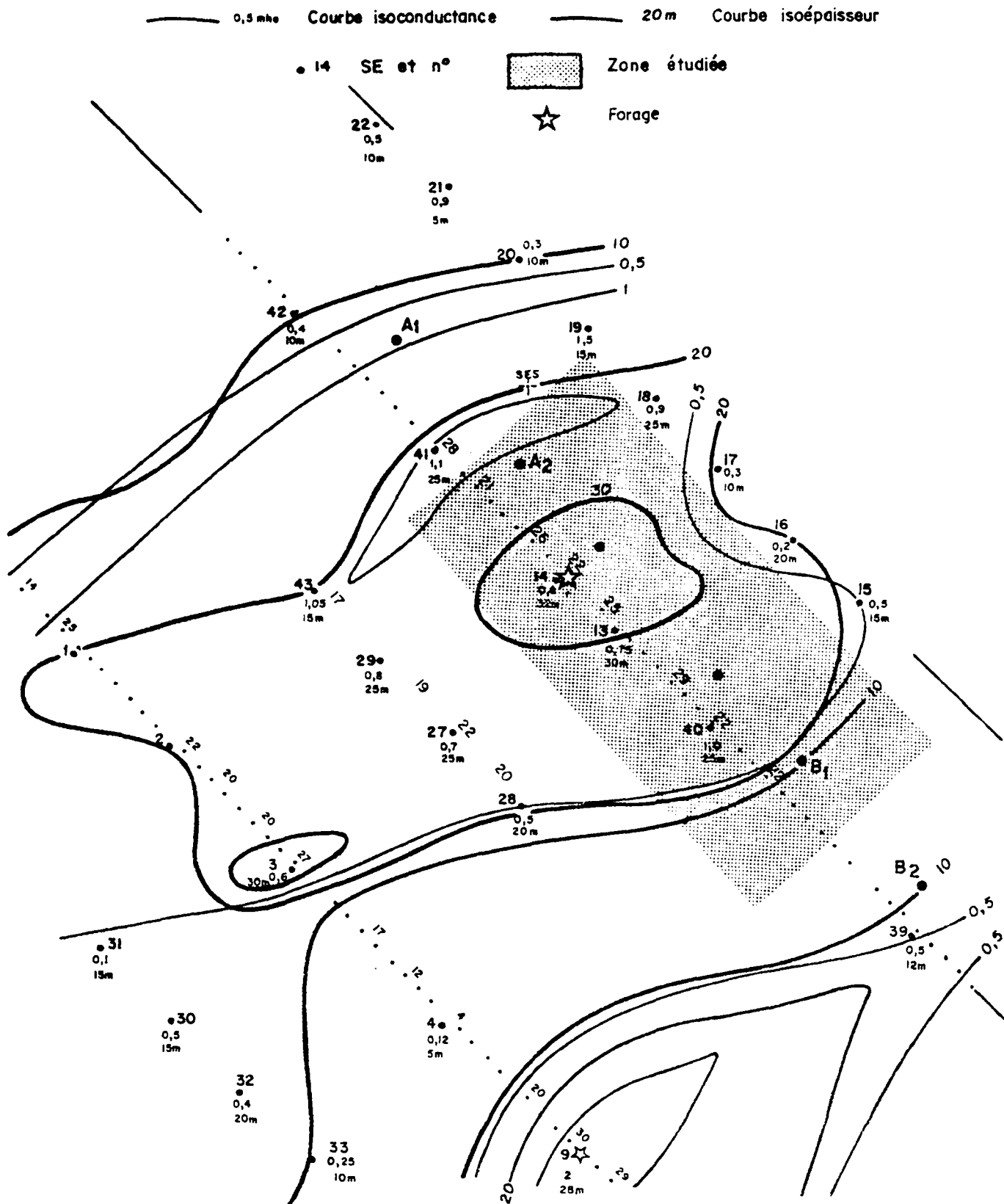


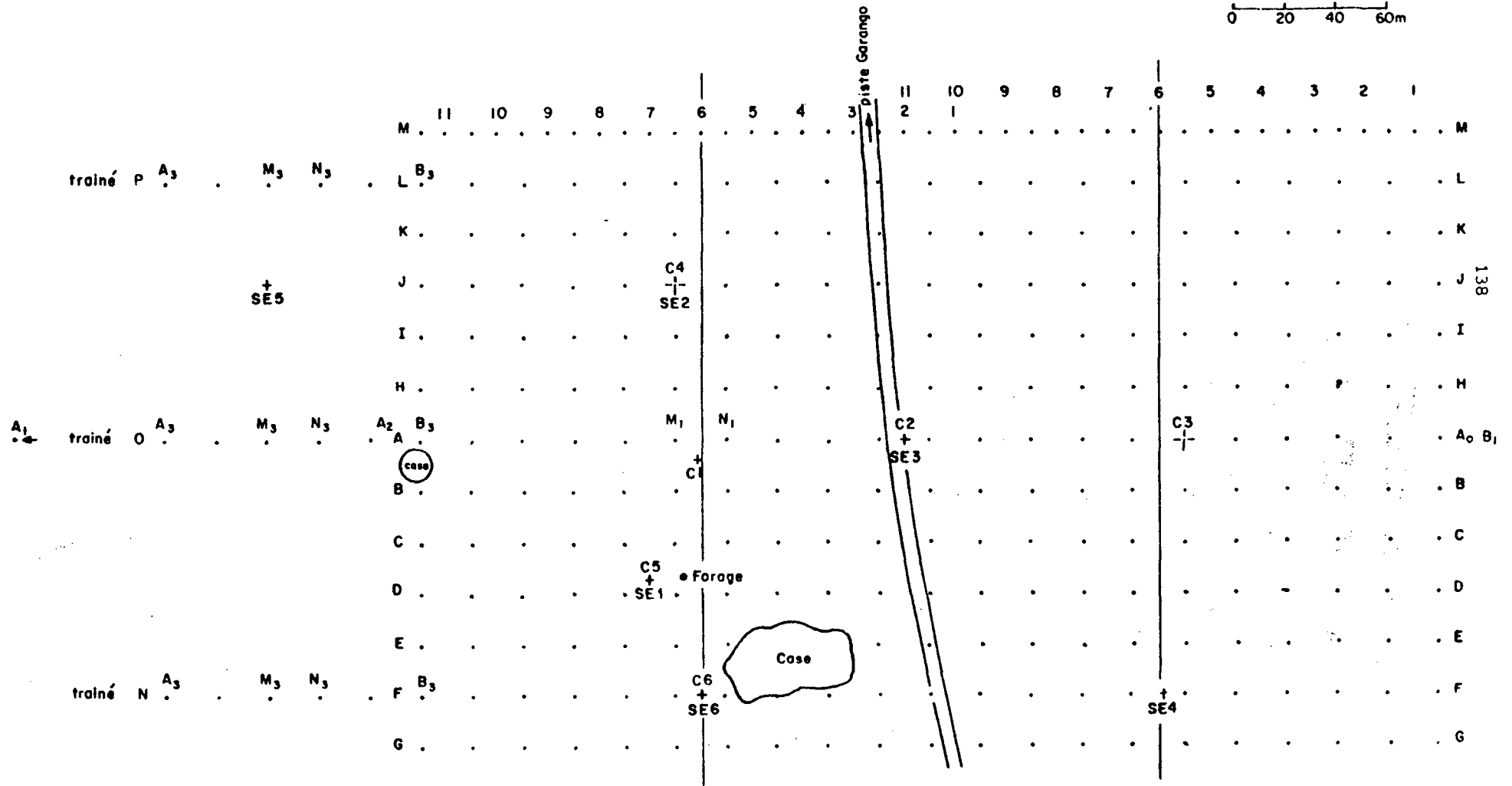
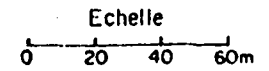
Figure 37

ZIGLA - PLAN DE SITUATION DES TRAVAUX DE GEOPHYSIQUE

SE - Sondage électrique - Schlumberger

C - Sondage électrique - carré croisé

AB - Trainé



c) Trainés électriques : AB = 100 m, MN = 20 m

- . P orienté à 150 grades, longueur 500 m
- . O et N orientés à 150 grades, longueur 480 m

d) Rectangle : AB = 600 m, MN = 20 m - profils tous les 20 m

- . R1 : 150 mesures
- . R2 : 143 mesures

2 - INTERPRETATION DES COURBES DE SONDAGES ELECTRIQUES

2.1 Problèmes de l'interprétation des courbes de sondages électriques obtenues à MOGTEDO et à ZIGLA

Les résultats de l'interprétation des courbes de sondages électriques réalisés à MOGTEDO et à ZIGLA sont regroupés sur les figures 38 à 44 (MOGTEDO) et 45 à 50 (ZIGLA). Ces résultats sont à utiliser avec prudence sur le plan quantitatif. L'interprétation des sondages électriques a rencontré 3 types de difficultés.

2.11 Le lissage des courbes

Pour le dispositif Schlumberger le problème est lié, pour une grande part, à celui de l'embrayage. Des lissages différents pour un modèle d'interprétation choisi, donnent des solutions différentes (fig. 42 - 44). Ce problème dépend de la qualité de l'embrayage qui n'est pas le seul fait de la personne effectuant les mesures mais qui est étroitement lié aux conditions superficielles.

Le problème du lissage est quasi inexistant sur le site de ZIGLA.

2.12 Indétermination de l'interprétation

Ce problème, bien connu des géophysiciens, trouve son origine dans le principe de l'équivalence et le principe de suppression.

Le principe d'équivalence concerne une couche dont la résistivité est soit plus grande, soit plus petite que celles des deux terrains sus et sous-jacents. On montre :

- qu'un terrain résistant compris entre 2 terrains plus conducteurs ne se manifeste que par sa résistance transversale RT :

$$RT = e \rho \begin{cases} RT \neq \Omega m^2 \\ e \neq m \\ \rho \neq \Omega m \end{cases}$$

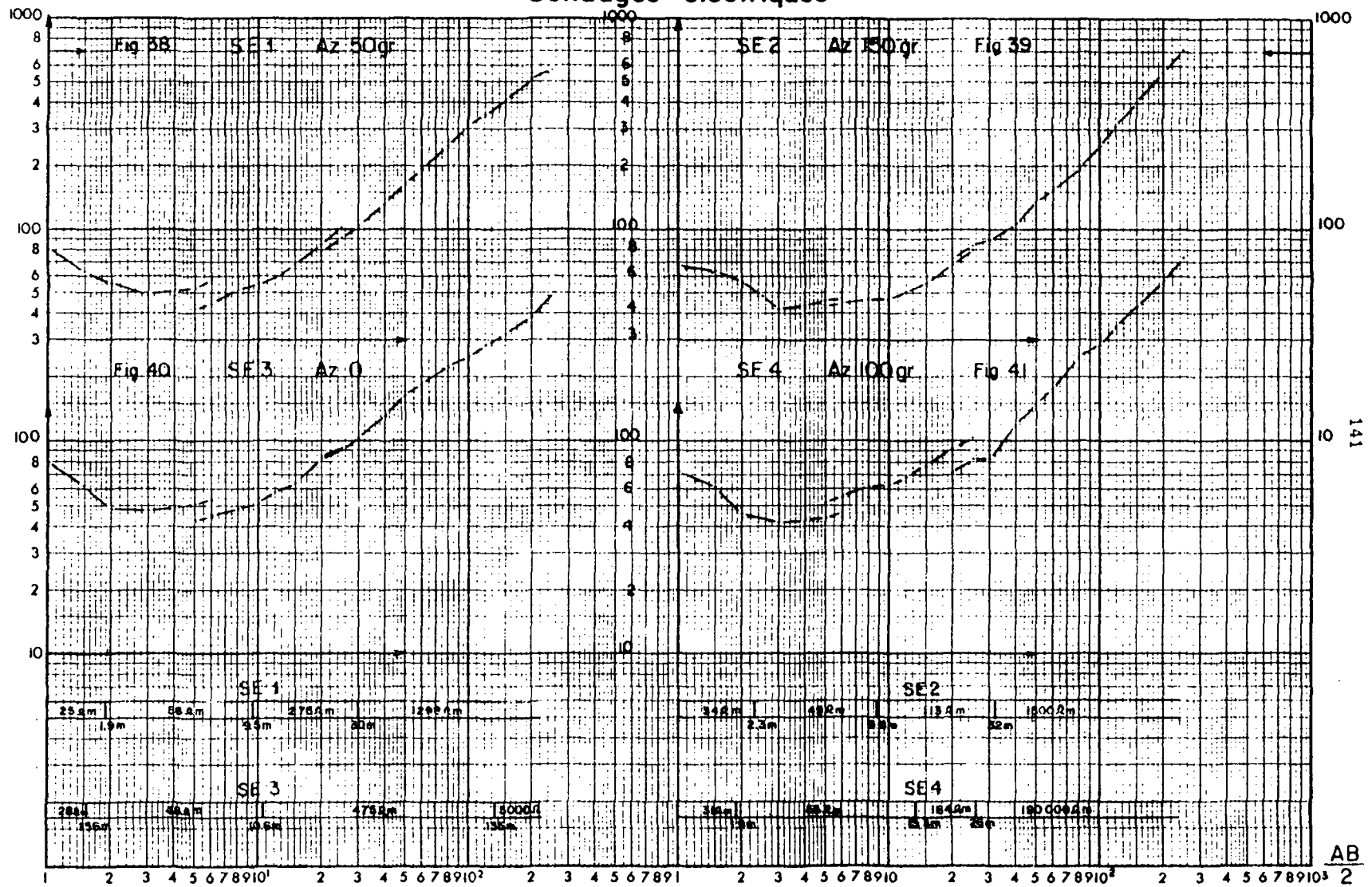
- qu'un terrain conducteur compris entre deux terrains résistants ne se manifeste que par sa conductance longitudinale C

$$C = e/\rho \begin{cases} C \neq mho \\ e \neq m \\ \rho \neq \Omega m \end{cases}$$

Il sera donc difficile de distinguer deux terrains résistants de résistivité et d'épaisseur différentes si leur résistance transversale est la même. De la même façon, deux terrains conducteurs ne pourront être différenciés si leur conductance est la même.

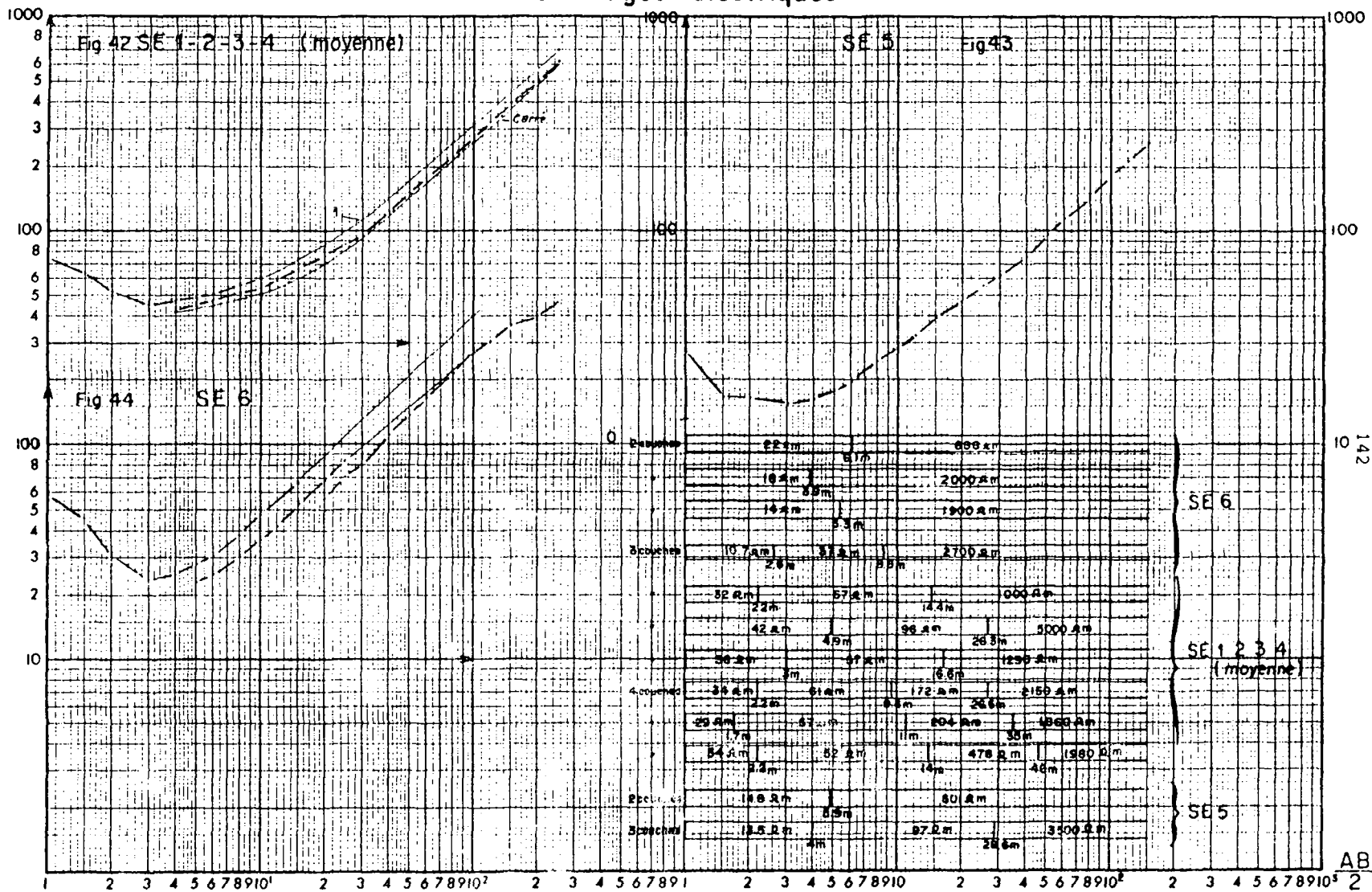
Mogtedo

Sondages électriques



Mogtedo

Sondages électriques



Le principe de suppression concerne les couches dont la résistivité est intermédiaire entre les résistivités des 2 terrains encaissants. Lorsque de tels terrains n'ont pas une épaisseur suffisante, ils n'ont aucune influence sensible sur les valeurs de résistivité apparente.

Ces 2 principes expliquent les difficultés de l'interprétation des sondages électriques et soulignent la nécessité d'utiliser d'autres méthodes géophysiques ou les résultats d'investigations géologiques.

Le seul moyen de tirer profit d'une campagne de prospection électrique est d'étalonner quelques sondages électriques sur des sites où la coupe géologique est connue. Le géophysicien a également la possibilité de proposer plusieurs modèles d'interprétation (modèle à 3 ou 4 couches, par exemple). C'est au géologue ou à l'hydrogéologue de faire son choix en fonction de ses connaissances personnelles (voir figures 42, 43, 44 et 46, par exemple).

2.13 Différence entre le modèle d'interprétation choisi (milieu stratifié horizontalement, homogène et isotrope) et le modèle réel (milieu anisotrope et hétérogène).

On aurait tort, au départ, de vouloir trop attendre de l'exploitation quantitative des courbes de sondages électriques. Le fait que le milieu prospecté ne peut pas être assimilé à un milieu homogène isotrope pose le problème de savoir quelle direction il faut donner au S.E. pour déterminer, avec la plus grande précision possible, les différents paramètres caractérisant le milieu.

L'interprétation qui a été tentée sur les courbes de S.E. implantés à MOGTEDO et ZIGLA a permis d'aborder ce problème. Les paramètres à évaluer sont les suivants :

- . épaisseur et résistivité de la formation superficielle (argile, latérite...),
- . épaisseur et résistivité de la zone fissurée,
- . résistivité de la roche saine.

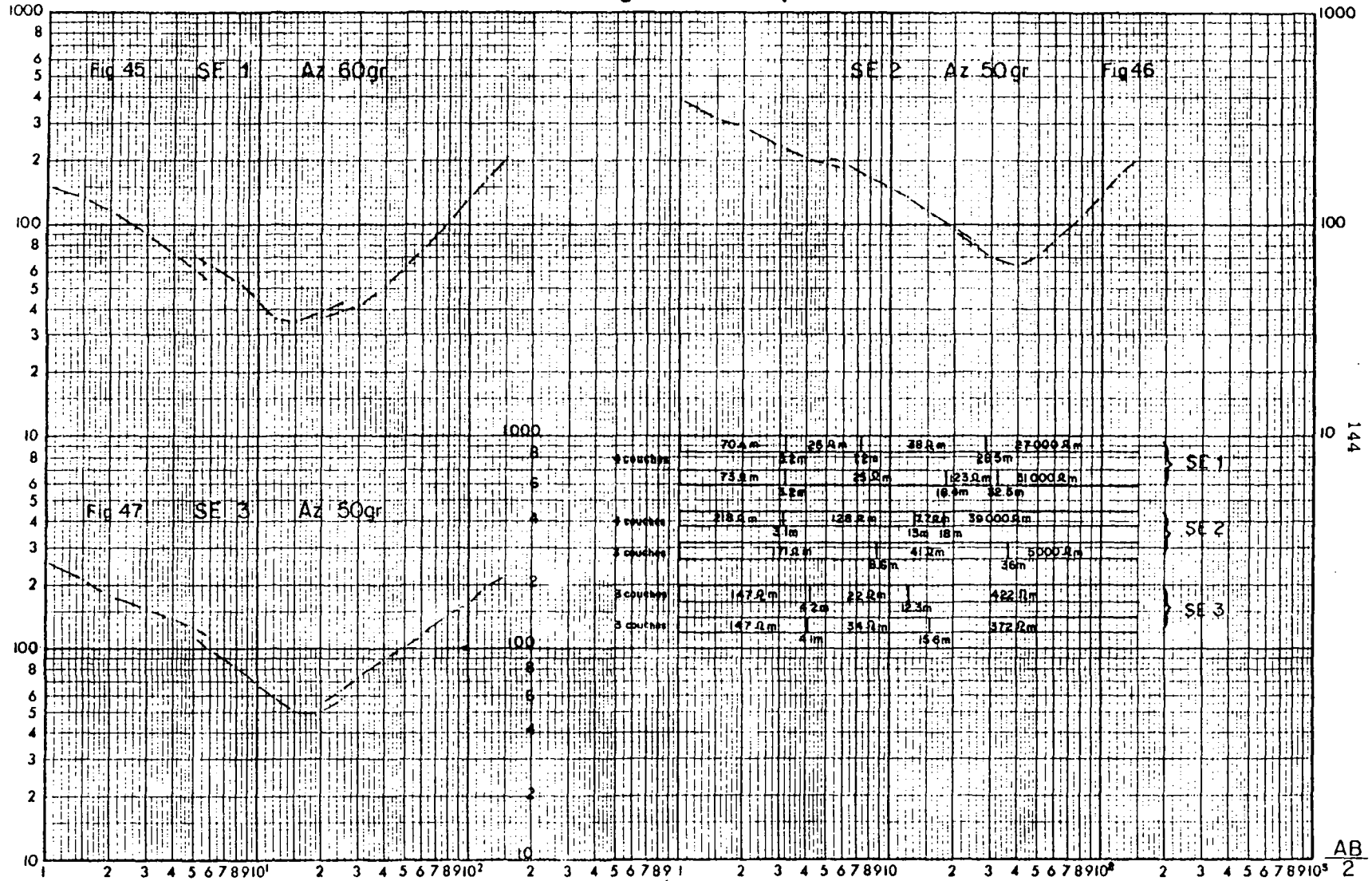
Les 2 forages réalisés sur le site de MOGTEDO n'ont pas atteint la roche saine. Il est difficile de définir la précision de l'interprétation ou d'affirmer qu'un S.E. implanté parallèlement à la direction de la fissuration donnera de meilleurs résultats que s'il l'avait été dans la direction perpendiculaire (ou vice versa).

Pour ce qui est de la formation superficielle, le SE1 de MOGTEDO donne à 10 % près l'épaisseur des argiles. La précision est meilleure pour le SE3 (~ 5 %). Ces deux sondages sont à ± 20 grades, dans la direction de la fissuration. Les deux autres sondages SE2 et SE4, dont l'angle avec la direction de fissuration est respectivement de 120-130 grad. et 70-80 grad., donnent la profondeur du toit de la zone fissurée à environ 30 % près.

Sur le site de ZIGLA, le SE1 implanté dans la direction de la fissuration donne avec une très bonne précision l'épaisseur des latérites (18 m au lieu de 18,4 m) ainsi que celle de la roche saine (32,5 m au lieu de 36 m, soit 13 % d'erreur).

Zigla

Sondages électriques

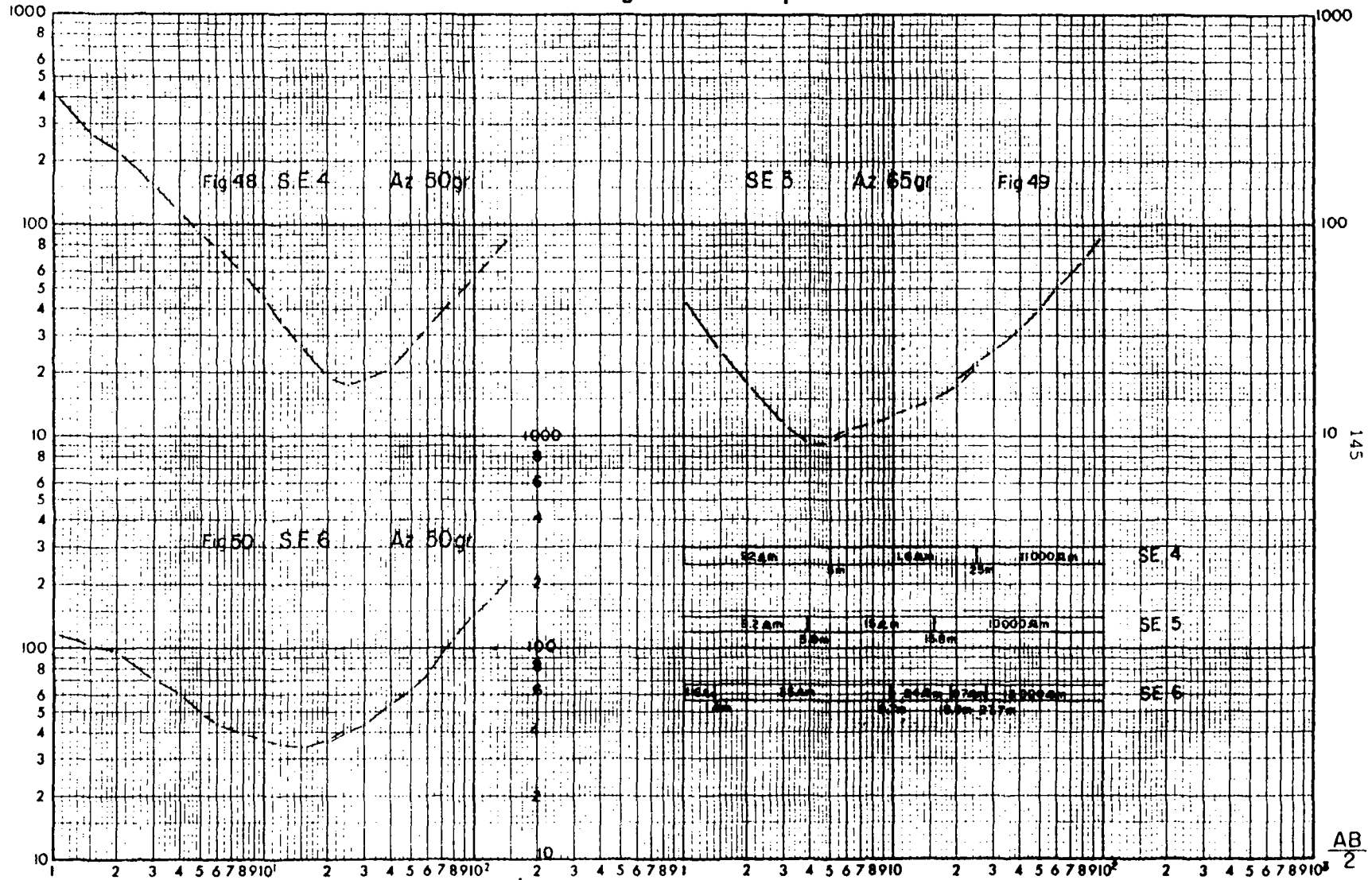


144

AB

Zigla

Sondages électriques



Au vu des résultats précédents, un S.E. parallèle à la direction de la fissuration donne une meilleure précision quant à la profondeur du toit de la zone fissurée et de celle du toit de la roche saine.

Attention, cette conclusion ne concerne que le type de courbes de sondages électriques "en fond de bateau", avec deux terrains résistants dans la tranche montante de la courbe.

Il apparaît urgent de se pencher sur le problème de l'orientation à donner au sondage électrique et de confirmer (ou d'infirmer) les observations précédentes. Une étude sur modèle réduit permettrait, sinon de le résoudre totalement, du moins d'avancer dans la recherche des solutions.

2.2 Conclusions

La qualité de l'interprétation quantitative des courbes de S.E. dépend de la précision des mesures et de la qualité de l'embrayage (dispositif Schlumberger). Elle nécessite la présence de quelques forages permettant un étalonnage et suppose une étroite collaboration entre géologues et géophysiciens. Pour le type de courbes étudiées ici (courbes en fond de bateau), le sondage électrique implanté parallèlement à la direction de fissuration semble donner une meilleure précision que le sondage électrique implanté perpendiculairement.

3 - INTERPRETATION DES CARTES ET DES PROFILS DE RESISTIVITES APPARENTES

3.1 Mise en oeuvre

Les profils et cartes de résistivités visent à l'exploration horizontale à l'opposé du sondage électrique dont le but est l'investigation verticale.

Deux méthodes ont été utilisées à MOGTEDO et à ZIGLA :

- . la méthode du traîné simple,
- . la méthode du rectangle.

Sur le site de MOGTEDO, quatre traînés simples notés A, B, C et D ainsi que deux rectangles notés R1 et R2 ont été implantés. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

	longueur AB	longueur MN	longueur du profil	Azimut de AB	Pas de mesure
traîné A	180 m	20 m	220 m	150 g	20 m
traîné B	"	"	"	"	"
traîné C	"	"	"	"	"
traîné D	180 m	20 m	1280 m	25 g	20 m

Les traînés A, B, C ont été réalisés perpendiculairement à la direction supposée de la fracturation.

Le traîné D avait été demandé suivant la direction d'un bas-fond (N25-N30g) pour déceler des fractures et des compartiments altérés.

	longueur AB	longueur MN	Pas de mesure	distance entre profils	Azimut de AB
Rectangles R1 et R2	300 m	10 m	10 m	10 m	150 g

Sur le site de ZIGLA, 3 traînés (O,N,P) et 2 rectangles (R1 et R2) ont été implantés ; leurs caractéristiques sont les suivantes :

	longueur AB	longueur MN	longueur du profil	Azimut de AB	Pas de mesure
traînés O,N,P	100 m	20 m	500 m	150 g	20 m

	longueur AB	longueur MN	Pas de mesure	Distance entre profils	Azimut de AB
rectangles R1 et R2	600 m	20 m	20 m	20 m	150 g

3.2 Présentation des résultats

3.21 Site de MOGTEDO

Les valeurs de résistivités apparentes observées aux traînés A, B et C oscillent entre 100 Ω m et 250 Ω m. Ces 3 traînés sont caractérisés par l'absence d'anomalie digne d'intérêt. Si nous les comparons aux profils R (rectangle R2) M-L (rectangles R1 et R2) et A (rectangle R1) de la figure 51, nous constatons que les variations de résistivité se font dans le même sens, mais que les anomalies issues de la méthode du rectangle sont beaucoup plus importantes. Cette différence trouve son origine dans les caractéristiques géométriques de chacun des 2 dispositifs. Pour le rectangle, la longueur MN et le pas de mesure sont égaux à 10 m. Pour les traînés, nous avons utilisé une longueur MN et un pas de mesure de 20 m. La méthode du rectangle donne ici une cartographie plus fine des anomalies.

Les résultats des 3 profils A, B et C regroupés sur la figure 52 sont présentés sous forme de carte de résistivité apparente. Etant donné le petit nombre de points, l'exploitation d'un tel document ne paraît guère envisageable.

Les valeurs du traîné D, dont l'orientation est différente de celle des trois autres, ont été portées sur la figure 53. Ce profil met en évidence quelques anomalies. Il aurait été nécessaire d'effectuer d'autres profils pour étudier leur répartition spatiale.

Figure 51

MOGTEDO - TRAINES A_B_C

COMPARAISON AVEC LES PROFILS R_ML_A DU RECTANGLE

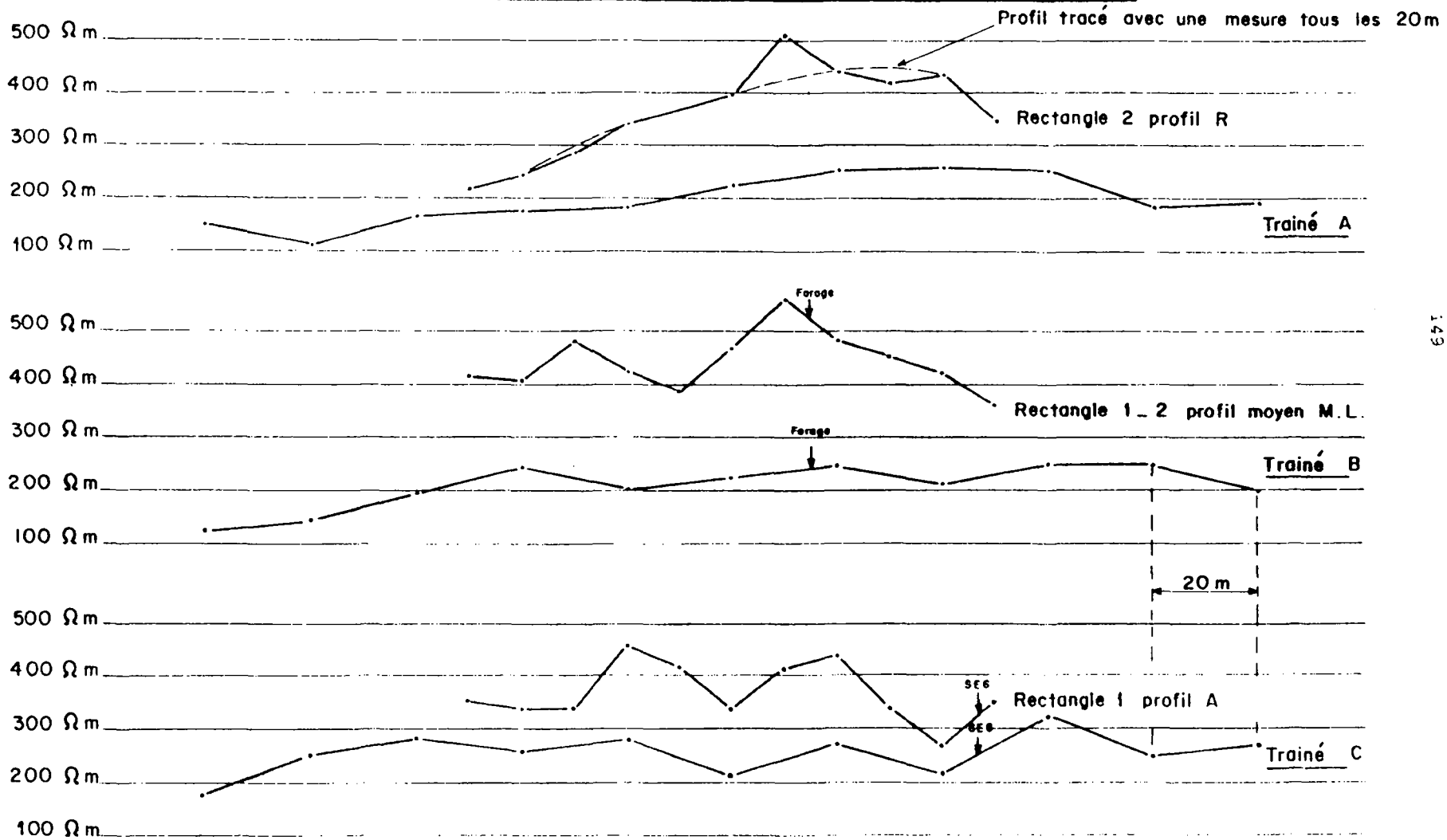


Figure 52

CARTE DE RESISTIVITES APPARENTES ISSUES DES TRAINES

A_B_C ET D - MOGTEDO

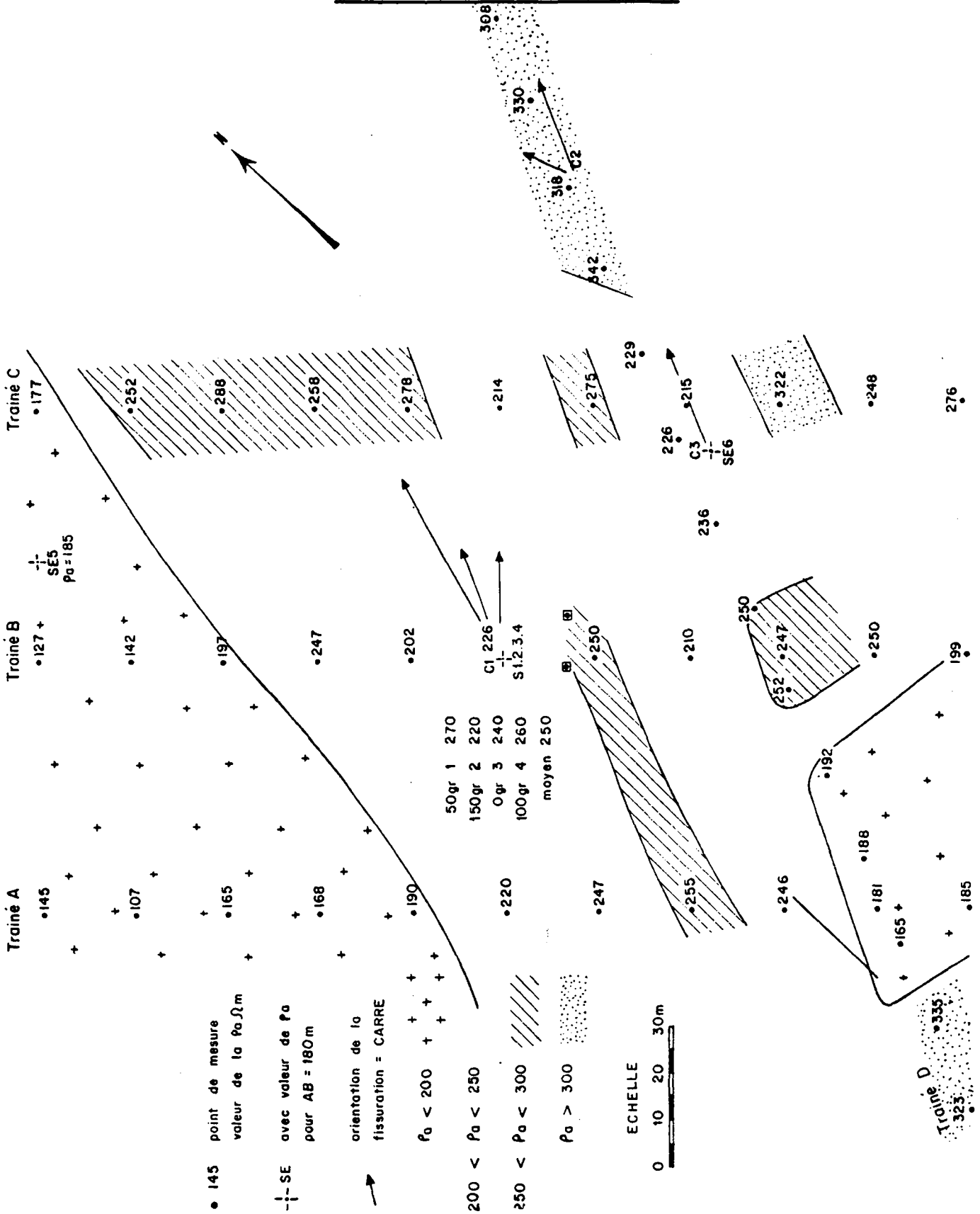
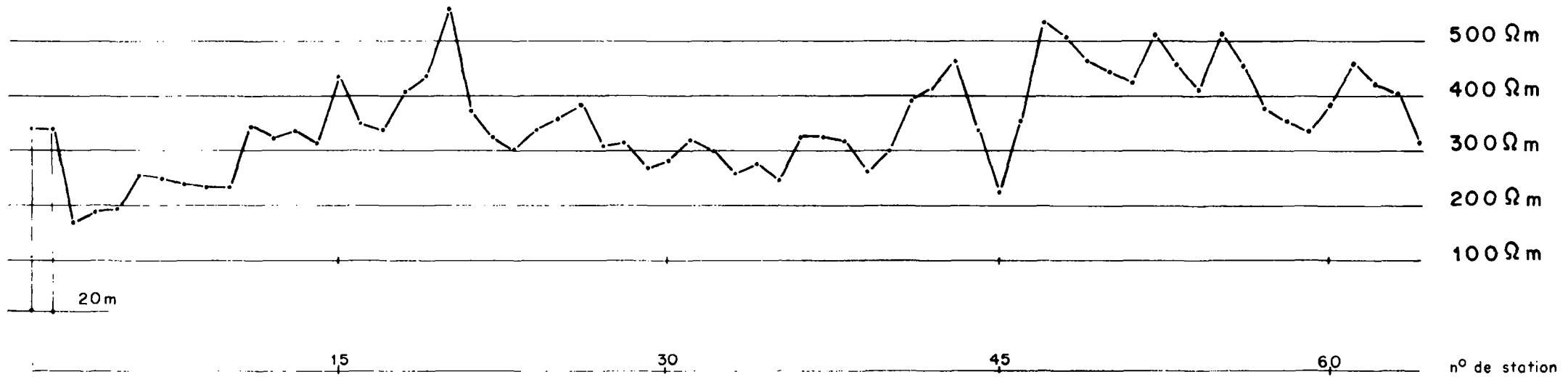


Figure 53
MOGTEDO - TRAIINE D



Sur la figure 54, sont reportées les valeurs de résistivités apparentes obtenues par la méthode du rectangle. Sur ce site, les valeurs de ρ_A mesurées à la frontière des 2 rectangles (profils M et L) sont pratiquement identiques. Nous avons pu, de ce fait, tracer une carte regroupant les résultats des 2 rectangles. Un premier tracé des lignes d'isorésistivité peut être fait (figure 55) avec 3 groupes de valeurs : $300 < \rho_A < 400 < \rho_A < 500 \Omega m$. Une deuxième carte, à échelle plus grande a été tracée en prenant une équidistance de $50 \Omega m$: les anomalies sont plus nettes (figure 56) (Interprétation Annexe II fig. 32).

La plupart des anomalies s'orientent suivant la direction N40 à N50 gr. qui est celle observée par photo aérienne. Quelques anomalies s'alignent suivant le Nord.

Les 2 forages productifs FM 21 (F) et FM 22 (P2) réalisés sur le site de MOGTEDO sont localisés au droit d'une anomalie résistante ($\rho_A > 500 \Omega m$). Cet exemple démontre bien que l'existence des zones conductrices n'est pas une condition nécessaire et suffisante pour le choix d'un emplacement de forage.

Nous reviendrons sur ces observations plus loin.

3.22 Site de ZIGLA

Sur la figure 57, sont portés les résultats des traînés N,O,P ainsi que les profils A,F,L issus de la méthode du rectangle. La longueur MN et le pas de mesure sont identiques pour les 2 méthodes (MN = 20 m, pas de mesure = 20 m). Seule la longueur de ligne AB est différente (AB = 100 m pour les traînés simples, AB = 600 m pour les rectangles).

Sur ce site les profils sont de forme identique mais décalés en résistivité.

La figure 58 regroupe, sous forme de carte, les résultats des 3 traînés O,N,P ainsi que ceux d'un traîné réalisé par la COMTEC. Les courbes d'isorésistivité sont tracées pour les valeurs de 35, 50, 75, 100, 150, 200 et $400 \Omega m$. Nous avons porté également sur ce document les résultats du dispositif carré. Chaque vecteur indique la direction du plan d'anisotropie ; sa longueur est proportionnelle au coefficient d'anisotropie (voir chapitre 4).

Comme pour le site de MOGTEDO, le petit nombre de profils ne permet pas d'obtenir une carte très détaillée. On décèle la présence d'anomalies s'alignant suivant une orientation N40 gr. Une direction voisine de N100 gr. semble se dessiner dans la partie Est de la carte. Cette direction a été également observée avec le dispositif carré au point C3. Un profil intermédiaire aurait été nécessaire pour confirmer la présence de cette direction.

Sur les figures 51 et 57 des échelles différentes ont été employées : une échelle arithmétique pour la figure 51 (MOGTEDO), une échelle logarithmique pour la figure 57 (ZIGLA). Dans la littérature traitant de profilage de résistivité apparente, nous avons rencontré les 2 modes de présentation. Il semble qu'il n'y ait pas de préférence pour l'une ou l'autre des 2 échelles. Notre choix s'est porté sur l'échelle donnant la meilleure représentation des anomalies (voir figure 59, par exemple).

Figure 54

MOGTEDO - VALEUR DES PA DES RECTANGLES 1 ET 2



					R2												R1						
W	V	U	T	S	R	Q	P	O	N	M	L	K	J	I	H	A	B	C	D	E	F	G	
158	159	191	183	204	217	246	257	471	458	401 439	391 387	370	303	297	322	351	342	236	330	363	402	429	11
206	202	186	194	221	246	287	328	379	348	320	467 452	461	380	341	377	339	304	275	344	328	338	356	10
354	278	230	311	292	286	323	359	308	413	479 510	482 467	357	333	399	345	344	378	419	313	406	484	547	9
350	343	405	336	321	339	361	412	397	375	418 443	367 371	459	499	445	419	456	462	446	313	533	524	493	8
345	368	375	398	376	365	358	310	605	364	335 350	385 391	406	460	437	477	419	416	455	467	396	424	433	7
393	401	370	331	381	392	372	398	352	439	499 524	SE1 420 C1 418	405	365	409	326	341	330	337	379	369	337	384	6
580	503	504	490	500	509	494	489	334	548	525 541	577 579	556	491	495	448	415	398	350	322	365	367	351	5
389	403	418	437	232	432	455	445	397	421	423 453	529 526	508	457	401	475	438	391	412	400	354	+C2 394	393	4
549	548	483	505	477	416	361	339	374	321	432 485	442 445	369	345	335	275	337	388	342	357	448	435	466	3
293	324	359	346	367	429	408	371	364	493	449 503	365 355	324	293	282	294	274	327	379	453	517	543	488	2
324	299	293	312	362	339	391	443	384	364	352 369	369 352	350	329	303	+C3 SE6 275	341	356	411	415	359	332	400	1

153

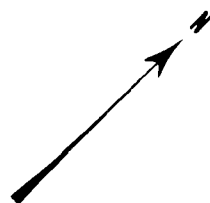


Figure 55

MOGTEDO _ CARTE D'ISORESISTIVITES APPARENTES

EQUIDISTANCE = 100 Ω/m

METHODE DU RECTANGLE

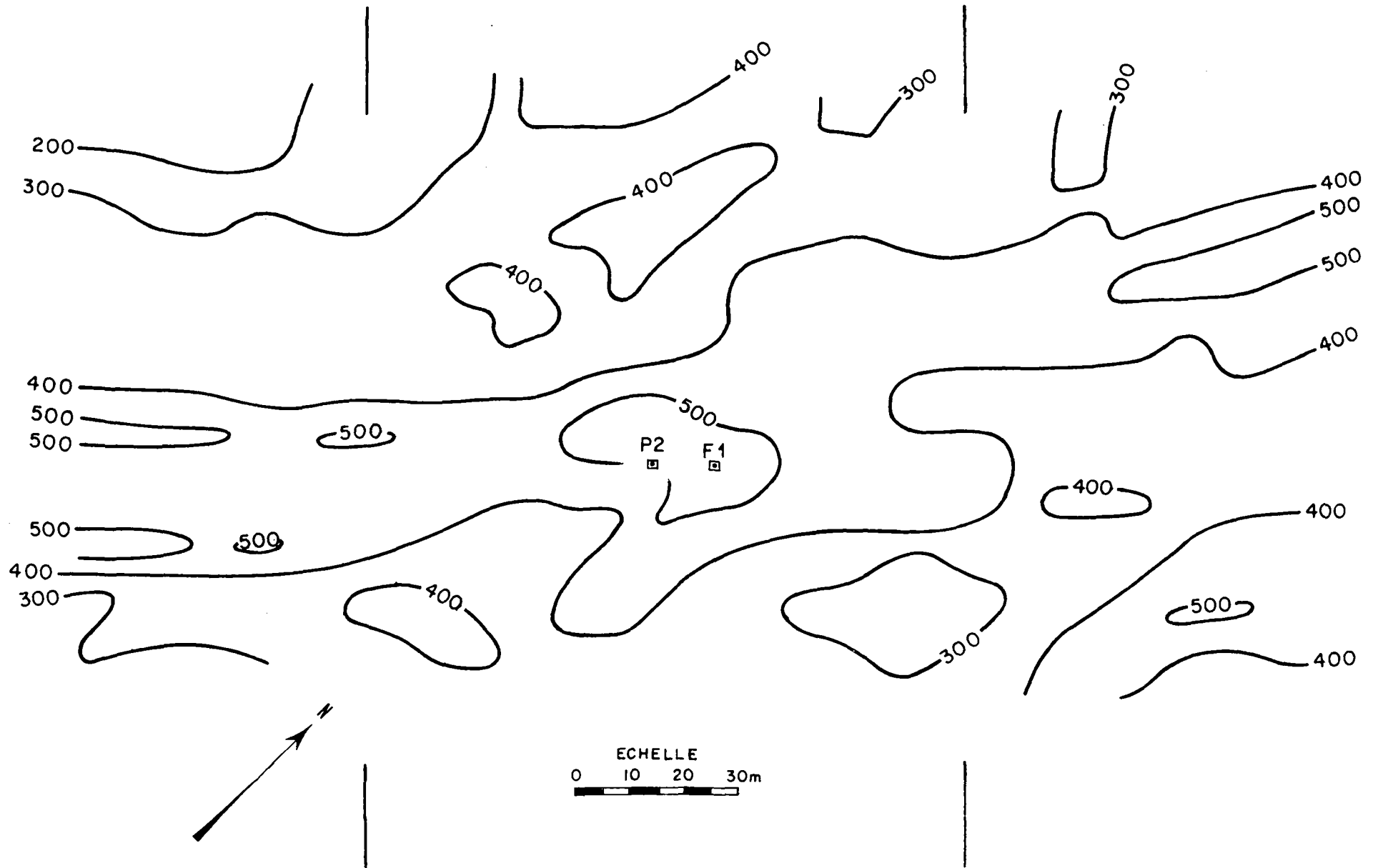


Figure 56

MOGTEDO - CARTE DETAILLEE DES ISORESISTIVITES APPARENTES

EQUIDISTANCE = 50 Ω/m METHODE DU RECTANGLE

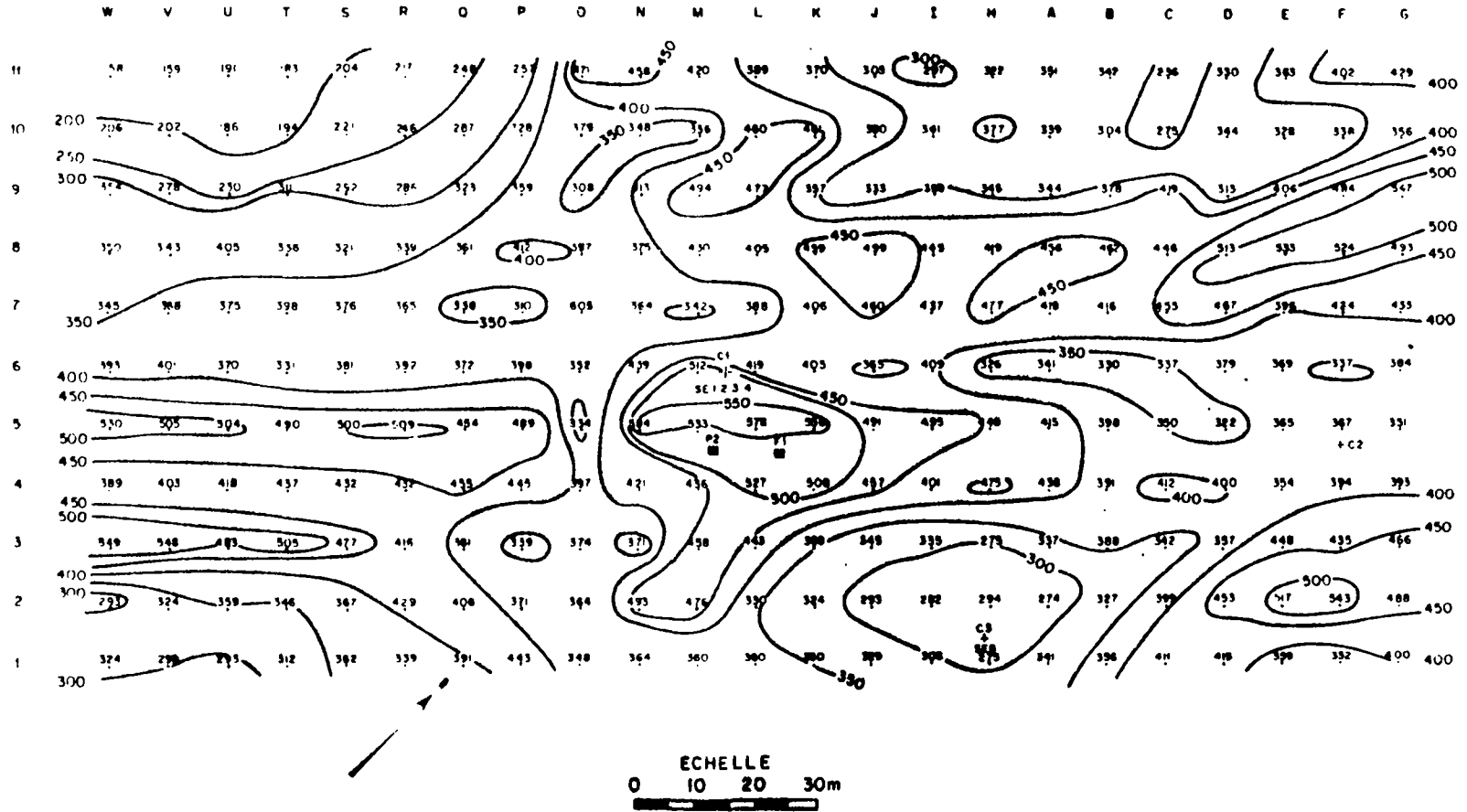


Figure 57

ZIGLA - TRAINES ELECTRIQUES N_O_P COMPARAISONS AVEC LES PROFILS A_F_L

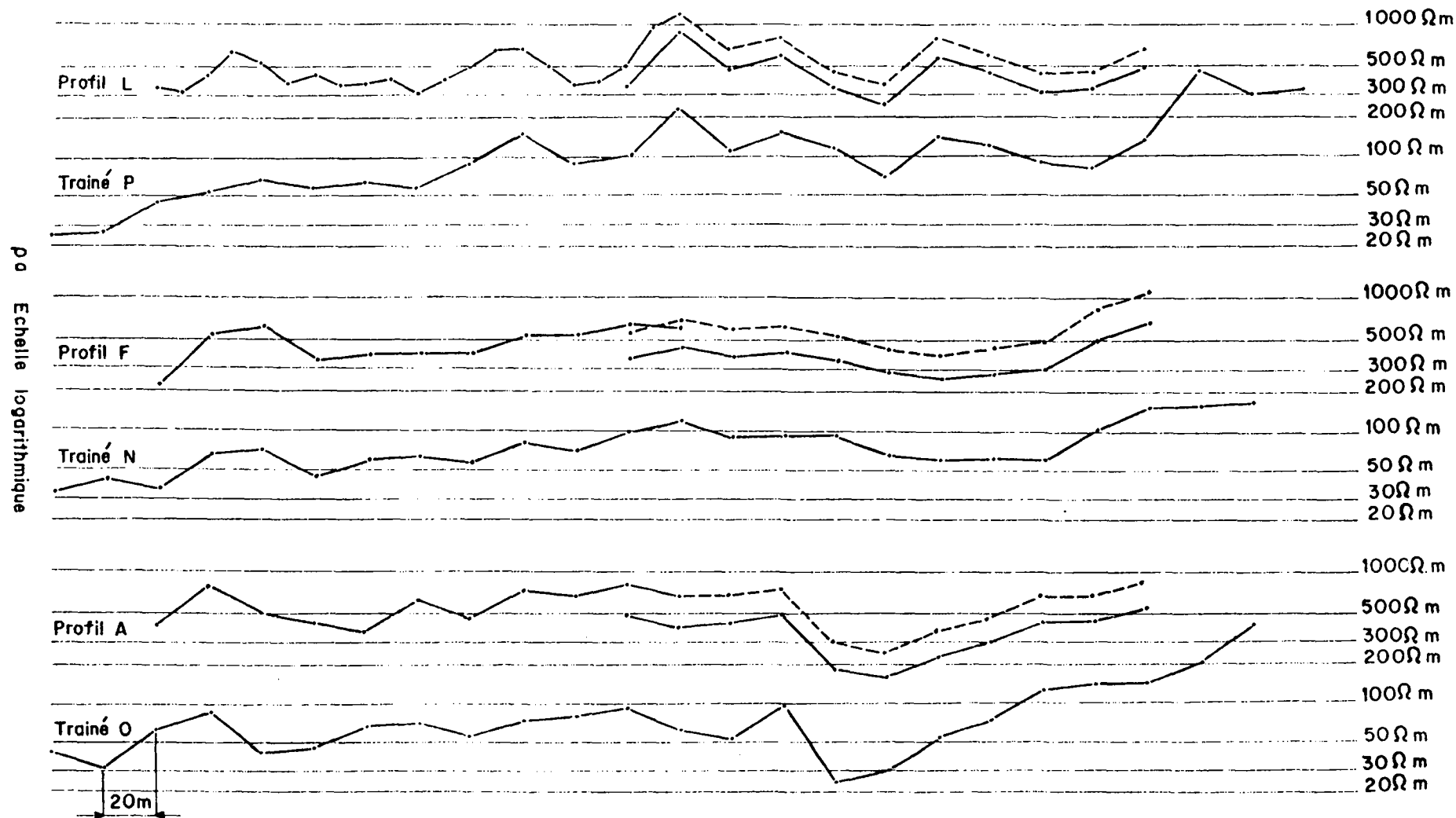


Figure 58

Zigla - Carte des résistivités apparentes (trainés N-O-P et COMTEC)

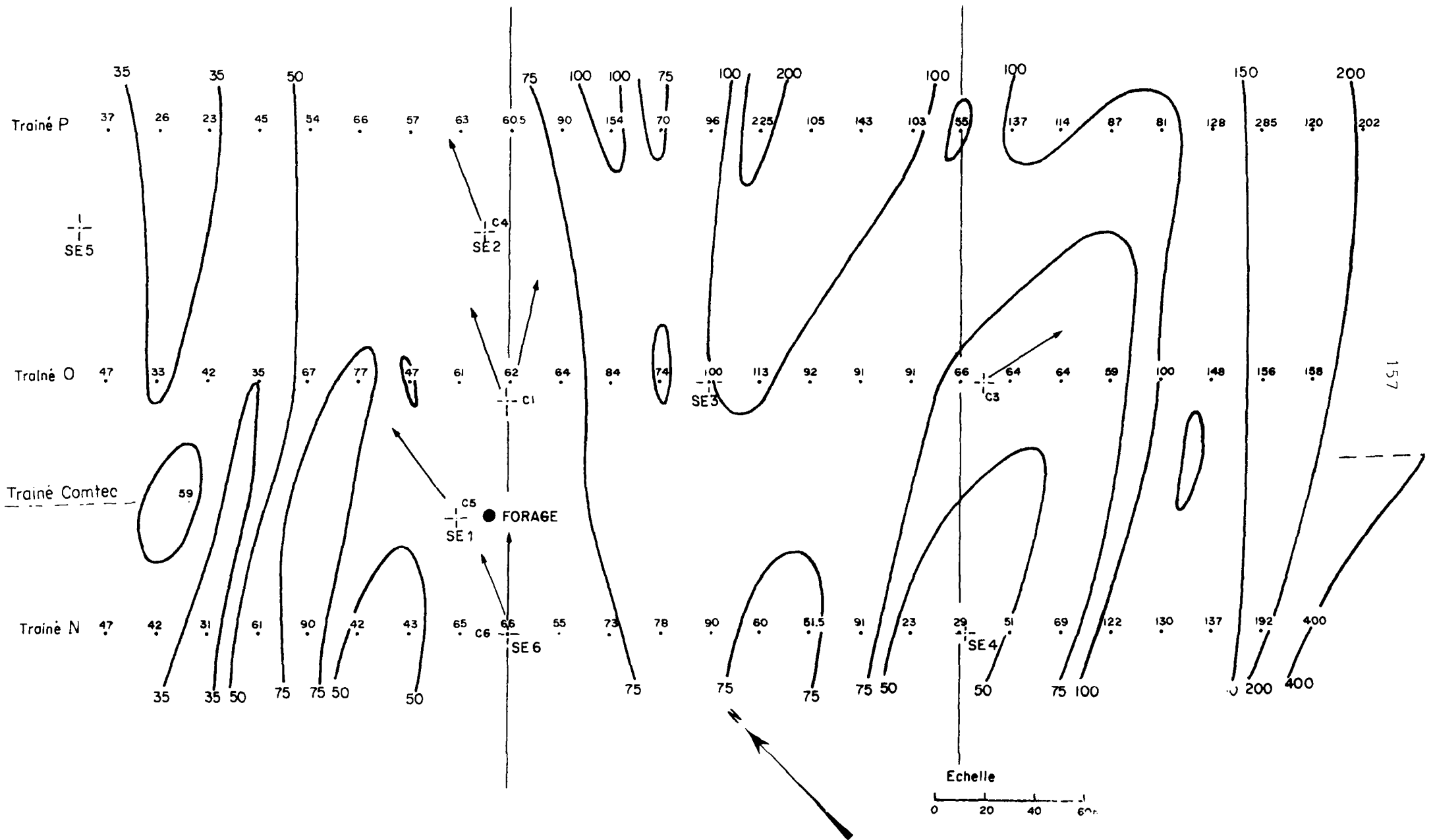
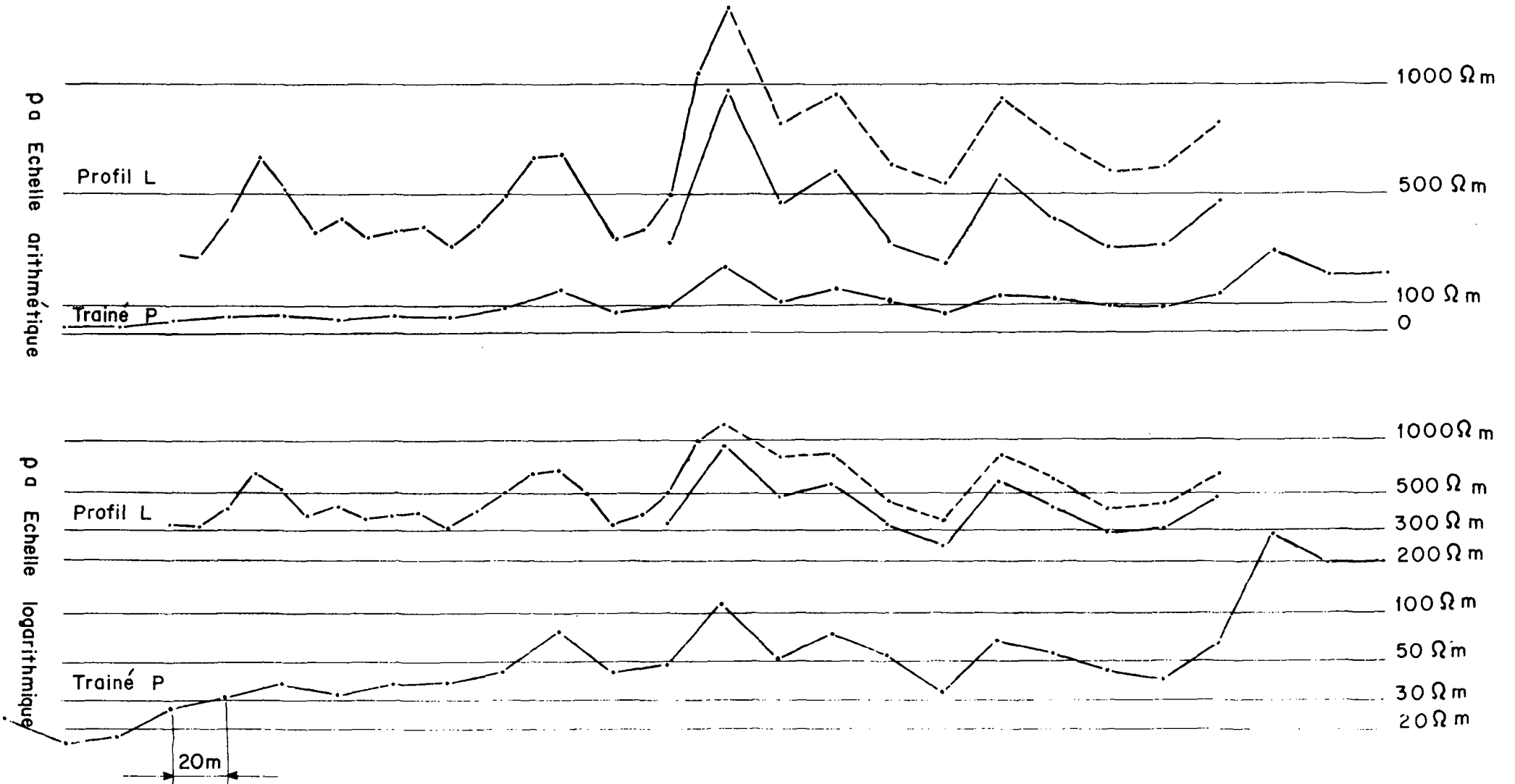


Figure 59

ZIGLA - COMPARAISONS DES PROFILS TRACES AUX ECHELLES

ARITHMETIQUE ET LOGARITHMIQUE



Les résultats de la méthode du rectangle sont portés sur la figure 60. On y trouve des zones anormales d'orientation N50 gr. Les valeurs de ρ_A varient entre 200 Ωm et 1500 Ωm . On notera la présence en bordure de la zone étudiée de forts gradients de résistivité d'orientation N50 gr. associés à deux accidents majeurs.

Le forage dont le débit est de 5 m³/h est localisé sur l'anomalie 400 Ωm (Interprétation hydrogéologique, fig. 9 du texte).

A ce stade de notre étude, tirons des conclusions concernant la méthode du profilage de résistivité (méthode du traîné simple et méthode du rectangle).

Cette méthode permet de cartographier des anomalies dont la direction s'aligne suivant des directions décelées par photos aériennes.

La cartographie de ces anomalies est d'autant plus détaillée et précise que le pas de mesure et la longueur MN sont petits.

Les 3 forages implantés sur les sites de MOGTEDO et de ZIGLA sont tous situés sur des zones résistantes (MOGTEDO) à moyennement résistantes (ZIGLA). Cette observation est importante. Les paragraphes suivants sont consacrés à l'analyse plus détaillée du paramètre "résistivité apparente".

3.3 Que faut-il attendre des profils et des cartes de résistivités apparentes ?

3.3.1 Influence de la variation d'une des caractéristiques géoélectriques de la zone fissurée sur la valeur de la résistivité apparente mesurée pour une longueur de ligne AB/2.

Sur la figure 61 sont reportées quelques courbes théoriques de sondage électrique correspondant au modèle suivant :

- . Couche 1 : $\rho = 50 \Omega\text{m}$; $e = 10 \text{ m}$. Cette formation peut être assimilée à une tranche d'altération homogène.
- . Couche 2 : cette couche schématise une zone fissurée. Nous avons considéré les 2 cas suivants :
 - la zone fissurée a une épaisseur constante ($e = 30 \text{ m}$) et une résistivité variant entre 125 Ωm et 1000 Ωm (figure 61 a).
 - la zone fissurée a une résistivité constante ($\rho = 250 \Omega\text{m}$) et une épaisseur variant entre 10 m et 100 m (figure 61 b).
- . Couche 3 : formation de résistivité infinie schématisant la présence d'un substratum cristallin sain.

ZIGLA - Carte des résistivités apparentes obtenues avec les rectangles R1 + R2

Figure 60

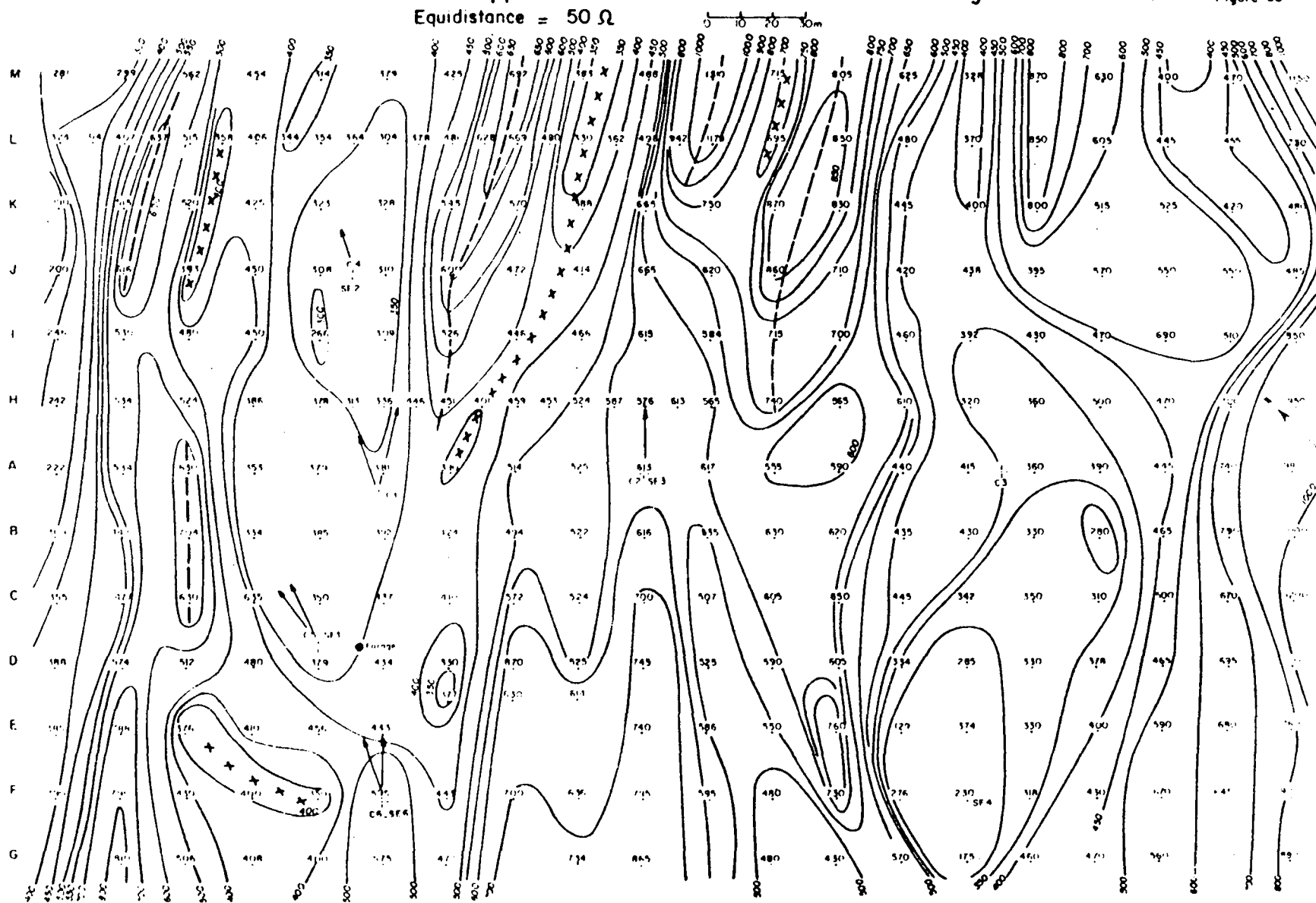
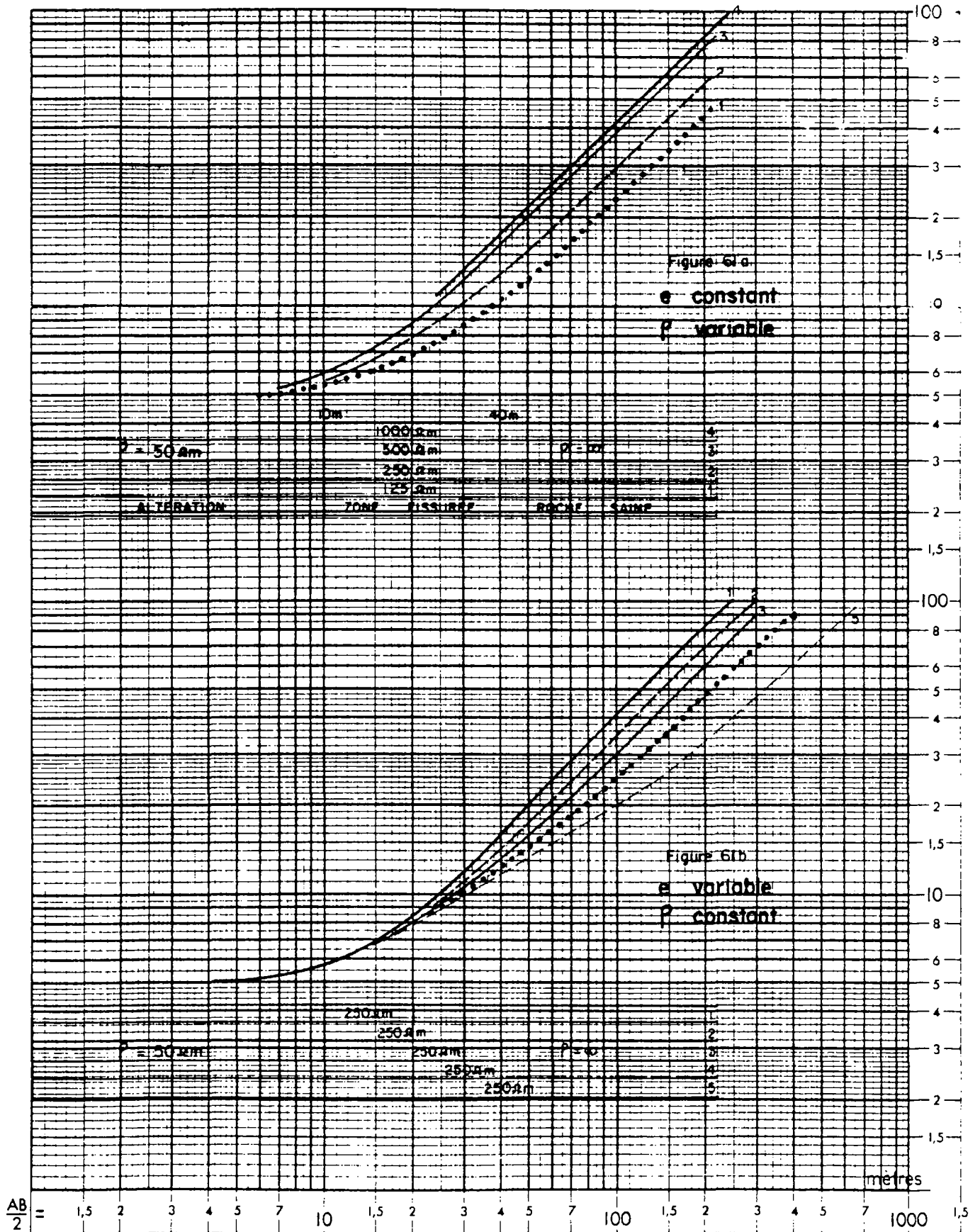


Figure 61

Influence de la variation des caractéristiques géoélectriques de la zone fissurée, sur les valeurs de résistivité apparente



- a) Dans le premier cas, pour $AB/2 = 100$ m, la variation de la résistivité d'une zone fissurée de $1000 \Omega\text{m}$ à $125 \Omega\text{m}$ entraîne une diminution de la résistivité apparente d'environ 50 %. Le passage d'une résistivité de $1000 \Omega\text{m}$ à une résistivité de $250 \Omega\text{m}$ n'enregistre qu'une variation de 25 %.
- b) Dans le deuxième cas, pour une même longueur de ligne, le passage d'une zone fissurée de 10 m d'épaisseur à une zone fissurée de 30 m d'épaisseur entraîne une diminution de la résistivité apparente de 25 % environ. Il faut que la zone fissurée ait une épaisseur de 100 m (soit 10 fois celle du 1er modèle) pour enregistrer une variation de 50 % de la valeur de ρA .

Donc, les variations de résistivité apparente sont peu marquées au niveau de la zone fissurée.

3.32 Influence d'un recouvrement superficiel conducteur non homogène sur la valeur de la résistivité apparente. (figures 62 a et 62 b).

Nous avons considéré 2 cas :

- a) Cas d'une formation superficielle de résistivité variable (fig. 62 a) ($\rho_1 = 12,5 \Omega\text{m}, 25 \Omega\text{m}, 50 \Omega\text{m}$ et $100 \Omega\text{m}$). La zone fissurée a une résistivité égale à $250 \Omega\text{m}$ et une épaisseur de 30 m. L'ensemble repose sur un substratum sain infiniment résistant.

Avec $AB/2 = 100$ m, nous constatons (fig. 62 a) qu'une variation de $\rho_1 = 50 \Omega\text{m}$ à $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$ entraîne une augmentation de 50 % de la valeur de résistivité apparente. On obtient la même variation lorsque ρ_1 passe de $50 \Omega\text{m}$ à $25 \Omega\text{m}$. Avec $\rho_1 = 12,5 \Omega\text{m}$ la valeur de ρA diminue de 70 % environ.

- b) Cas d'une formation superficielle d'épaisseur variable (fig. 62 b) ($e_1 = 3$ m, 6 m, 10 m, 15 m, 30 m). Les caractéristiques géoélectriques de la zone fissurée et du substratum sont identiques à celles du cas précédent. Le passage du modèle 1 ($e_1 = 3$ m) au modèle 5 ($e_1 = 30$ m) provoque une diminution d'environ 70 % de la résistivité apparente. Si l'on s'arrête au modèle 4 ($e_1 = 15$ m) la diminution est environ de 50 %.

Profils de résistivité avec deux longueurs de ligne différentes

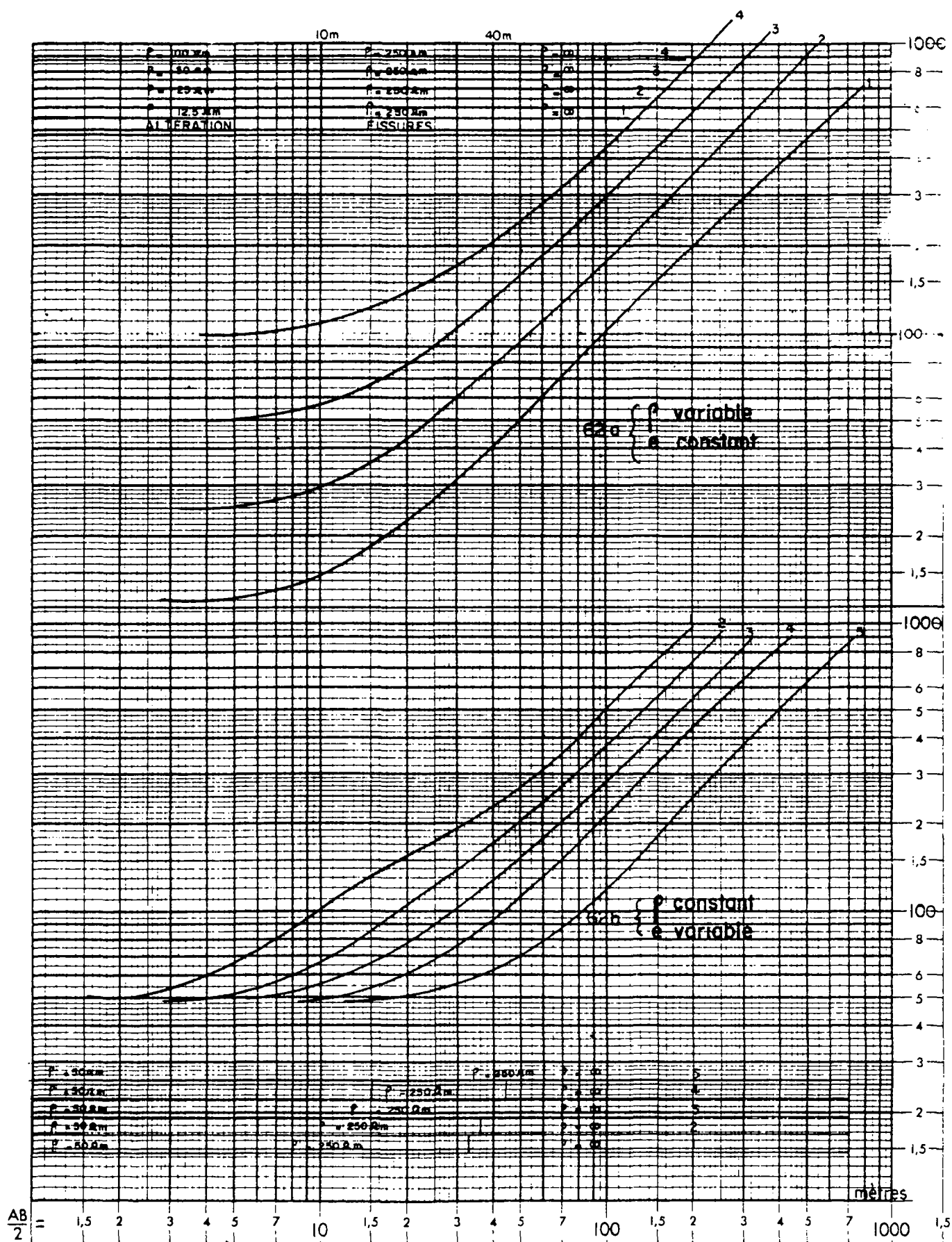
Sur les figures 63 et 64 sont portés des profils de résistivité apparente dont les valeurs sont tirées de courbes de sondage électrique théoriques étudiées ci-dessus ($AB/2 = 100$ m, $AB/2 = 5$ m).

- a) Le premier cas considéré (figure 63) est celui d'une zone fissurée ($\rho = 250 \Omega\text{m}$, $e = 30$ m) recouverte d'une formation conductrice présentant une variation latérale de résistivité. La courbe ρA_2 a été tracée en prenant $AB/2 = 100$ m. Celle-ci enregistre une variation importante de la résistivité apparente. S'agit-il de passages de zones conductrices à des zones résistantes au sein du substratum ?

La courbe ρA_1 tracée avec $AB/2 = 5$ m montre que la formation superficielle n'est pas homogène.

Figure 62

Influence d'une formation superficielle non homogène sur les valeurs de ρ_a



MN=

Figure 63

Influence d'une formation superficielle non homogène (résistivité variable)

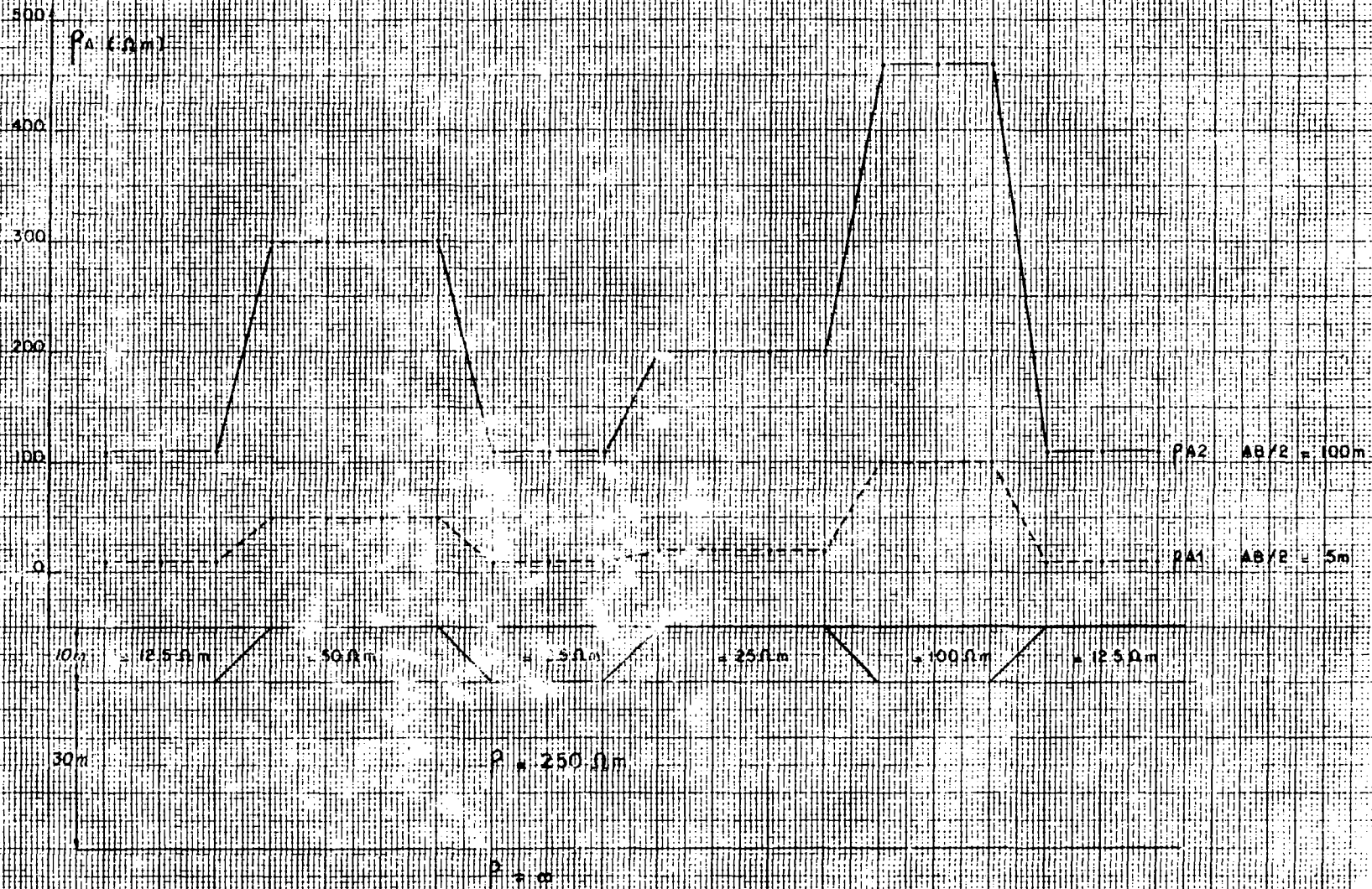
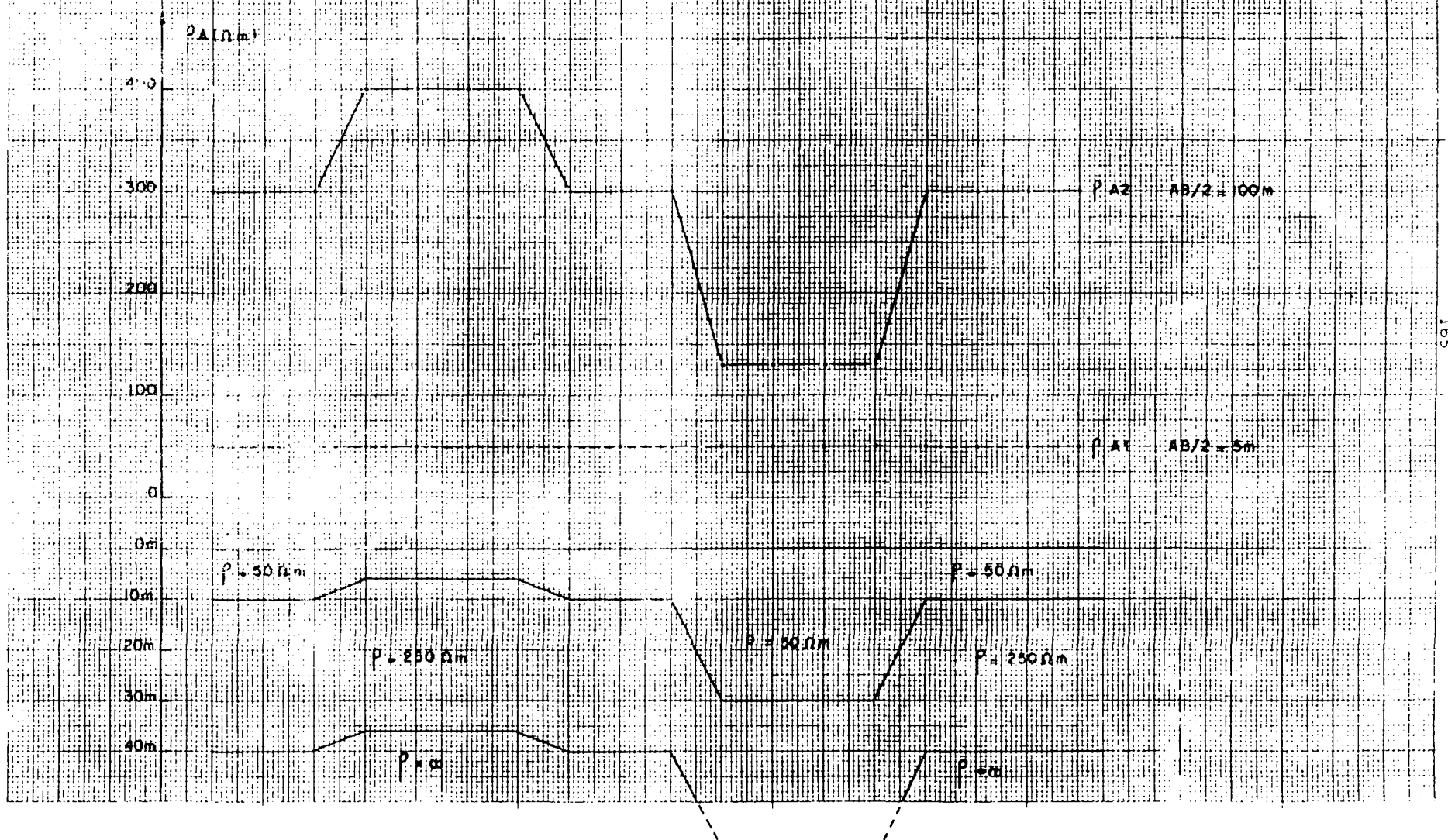


Figure 64

Influence d'une formation superficielle non homogène (épaisseur variable)



Cette courbe enregistre parfaitement ses variations de résistivité. On constate que les courbes $\rho A1$ et $\rho A2$ sont de forme identique. Donc, les variations de résistivité apparente signalées sur le profil $\rho A2$ ne sont pas à attribuer à l'horizon profond mais trouvent leur origine dans la formation superficielle.

- b) Le deuxième cas considéré (figure 64) est celui d'une zone fissurée d'épaisseur et de résistivité constantes ($e = 30$ m, $\rho = 250$ Ω m) recouverte d'une formation conductrice ($\rho = 50$ Ω m) d'épaisseur variable.

La courbe $\rho A2$ enregistre une forte variation de résistivité apparente. L'observation de la courbe $\rho A1$ montre, qu'à l'inverse du cas précédent, aucun indice de la non homogénéité de la formation superficielle n'apparaît pour les petites longueurs de ligne d'envoi de courant.

Comment interpréter les valeurs de résistivité apparente $\rho A1$ et $\rho A2$?

Un profilage électrique à 2 longueurs de ligne ($AB/2 = 10$ m, $AB/2 = 100$ m) a été simulé sur un modèle théorique dont les caractéristiques géoélectriques sont données par la figure 65. Il s'agit d'une formation constituée de 2 terrains.

Le premier terrain est conducteur et présente une variation latérale de résistivité ($\rho_1 = 10$ Ω m, 50 Ω m et 5 Ω m) son épaisseur reste constante ($e_1 = 10$ m).

Le deuxième terrain est résistant et présente aussi une variation latérale de résistivité ($\rho_2 = 100$ Ω m, $\rho_2 = 500$ Ω m).

Sur la figure 65 sont portés 4 profils :

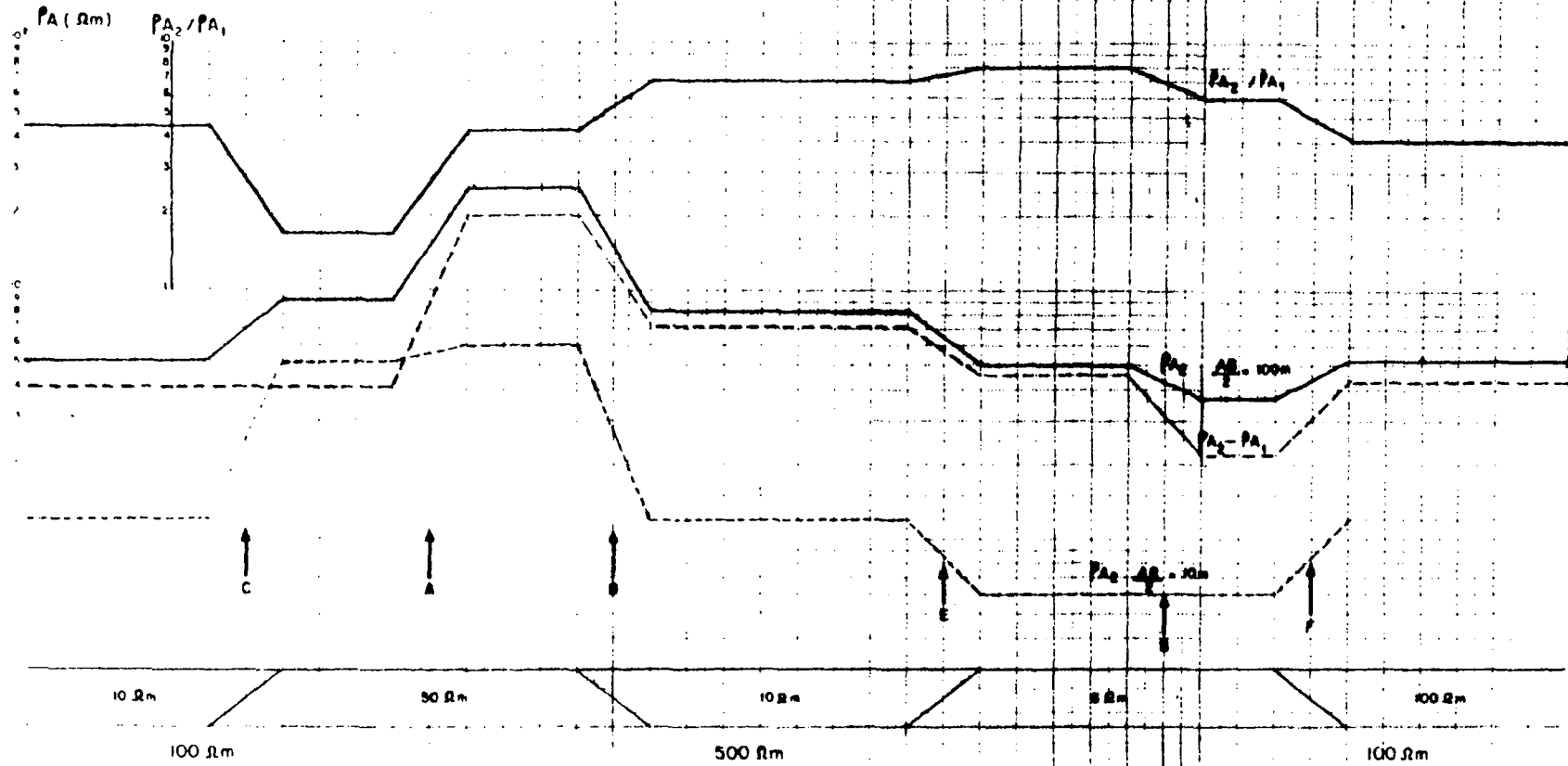
- 1) Le profil $\rho A1$ ($AB/2 = 10$ m) enregistre de fortes anomalies associées à la non homogénéité du premier terrain.
- 2) Le profil $\rho A2$ ($AB/2 = 100$ m) enregistre également de fortes anomalies associées à la non homogénéité du premier terrain mais aussi à celle du substratum.

Sur cet exemple, peut-on, ou non, délimiter des parties conductrices ($\rho_2 = 100$ Ω m) et résistantes ($\rho_2 = 500$ Ω m) du substratum ?

La comparaison des profils $\rho A1$ et $\rho A2$ nous permet d'affirmer que les variations de résistivité apparente mises en évidence aux points A et B ne sont pas dues à une variation latérale de résistivité du premier terrain. En effet, aucune anomalie n'est visible en ces points sur le profil $\rho A1$.

Les autres accidents notés, C, D, E et F se retrouvent à la fois sur le profil $\rho A1$ et le profil $\rho A2$. Ils peuvent être, par conséquent, attribués à la non homogénéité du premier terrain.

Figure 65
 "Profilage" électrique - Exemple d'utilisation de deux longueurs de ligne



- 3) Sur le profil $\rho A2 - \rho A1$, (obtenu en effectuant la différence des valeurs de résistivité apparente), l'accident C a disparu.

Le premier accident visible est identique à celui signalé sur le profil $\rho A2$ et inexistant sur le profil $\rho A1$. On retrouve sur ce profil, les anomalies D,E,F d'origine superficielle. Le deuxième accident important est noté B. Son absence sur le profil $\rho A1$ nous autorise à lui accorder un intérêt.

La comparaison des profils $\rho A2$, $\rho A1$ et $\rho A2 - \rho A1$ nous a permis d'opérer une distinction parmi les anomalies signalées sur le profil $\rho A2$.

Le premier groupe d'anomalies C,D,E et F, visibles à la fois sur les profils $\rho A1$ et $\rho A2$, sont d'origine superficielle et peuvent être attribuées à une variation de résistivité du premier terrain.

Le deuxième groupe d'anomalies A et B apparaissent très nettement sur les profils $\rho A2$ et $\rho A2 - \rho A1$. Il reste maintenant à interpréter ces 2 anomalies.

- 4) Sur le profil $\rho A2 / \rho A1$, on peut remarquer que l'accident A est associé à une augmentation de ce rapport et que l'accident B est marqué par une diminution.

L'augmentation du rapport $\rho A2 / \rho A1$, associée sur cet exemple à une augmentation de $\rho A2$ peut être expliquée soit par une augmentation de la résistivité $\rho 2$ du substratum soit par une diminution de l'épaisseur du premier terrain.

La diminution du rapport $\rho A2 / \rho A1$, associée sur cet exemple à une diminution de $\rho A2$ peut être expliquée soit par une diminution de la résistivité $\rho 2$ du substratum, soit par une augmentation de l'épaisseur du premier terrain.

Le raisonnement effectué ci-dessus suppose que l'on prenne l'hypothèse d'une formation à 2 terrains.

L'étude de la figure 65 réalisée à partir d'un modèle théorique simple montre que le rôle du profilage électrique à 2 longueurs de ligne d'envoi de courant se limite à éliminer un certain nombre d'anomalies que signalent les profils $\rho A2$ et $\rho A1$ et auxquelles on peut attribuer une origine superficielle. Les anomalies restantes sont cependant d'interprétation délicate puisque rien ne permet d'affirmer qu'elles sont profondes. Seuls quelques sondages électriques répartis de part et d'autre de ces anomalies permettront de lever l'indétermination.

3.4 Conclusions

Les mesures réalisées à MOGTEDO et à ZIGLA précisent les limites d'application de la méthode du profilage électrique à la recherche d'eau dans les fractures d'un massif cristallin.

Le rôle des cartes de résistivité apparente se limite à confirmer l'existence d'une direction de fracturation, décelée par photo-aérienne et suivant laquelle s'alignent des anomalies dont il est difficile d'en préciser la nature.

L'utilisation de 2 longueurs de ligne $AB/2$ peut, dans certains cas, attirer l'attention sur l'influence prédominante des formations superficielles : une carte de ρ_A réalisée avec une petite longueur de ligne $AB/2$ permet de situer les anomalies superficielles. Celles-ci se retrouveront sur la carte réalisée avec une grande longueur de ligne. La comparaison des 2 documents permet d'éliminer ces zones et de signaler une anomalie profonde. L'exemple de la figure 64 montre que l'utilisation de 2 longueurs de ligne ne résout pas entièrement le problème. Une variation d'épaisseur de la formation superficielle ne crée aucune anomalie des valeurs de ρ_{A1} , mais est à l'origine de fortes anomalies sur le profil ρ_{A2} .

L'interprétation des cartes de résistivité apparente réclame donc la plus grande prudence. La réalisation de 2 documents ρ_{A1} et ρ_{A2} ne dispense en aucun cas d'implanter quelques sondages électriques pour contrôler la nature des anomalies jugées intéressantes.

4 - RESULTATS DE LA PROSPECTION ELECTRIQUE REALISEE AVEC LE DISPOSITIF CARRE

4.1 Rappel : Principe et mise en oeuvre d'un sondage électrique pluridirectionnel

Réaliser un sondage électrique pluridirectionnel consiste à effectuer en une même station plusieurs sondages électriques (généralement 4) dans des directions différentes et à porter sur un diagramme la valeur de la résistivité apparente obtenue pour chaque direction et pour une même longueur de ligne d'envoi de courant. Cette méthode est déjà couramment employée en milieux karstiques. Parmi les différentes géométries d'électrodes pouvant être utilisées, le dispositif Schlumberger et le dispositif carré sont le plus abondamment décrits dans la littérature. Sur les sites de MOGTEDO et ZIGLA, le dispositif carré a été préféré au dispositif Schlumberger pour trois raisons principales :

- 1) Le problème de l'embrayage, évoqué au chapitre 1, ne se pose pas.
- 2) On a moins de câble à dérouler pour une profondeur d'investigation identique.
- 3) Le coefficient d'allongement des diagrammes obtenus avec le dispositif carré est supérieur à celui obtenu avec le dispositif Schlumberger. Cette propriété permet une détermination beaucoup plus précise des directions des axes principaux des diagrammes (c'est-à-dire le petit axe et le grand axe) surtout dans les zones où une formation superficielle isotrope a tendance à masquer l'anisotropie des formations sous-jacentes.

Le dispositif carré est décrit à la figure 66. Les quatre électrodes A, B, M, N (A et B étant des électrodes de courant, M et N étant des électrodes de potentiel) sont disposées en carré. Le dispositif est défini par la longueur du côté "a" qui est progressivement augmentée si on désire réaliser un sondage électrique. Dans l'étude des milieux anisotropes, nous effectuons un sondage carré croisé. Le procédé est le suivant (fig. 66a) :

- 1) mesure de $\rho_{\alpha 1}$.
- 2) mesure de $\rho_{\beta 1}$ obtenue en permutant les électrodes B et N.
- 3) l'ensemble du dispositif subit une rotation de 45° .
- 4) mesure de $\rho_{\alpha 2}$.
- 5) mesure de $\rho_{\beta 2}$ obtenue en permutant les électrodes B et N.

Les valeurs de $\rho_{\alpha 1}$, $\rho_{\beta 1}$, $\rho_{\alpha 2}$, $\rho_{\beta 2}$ sont portées sur un axe dont la direction est celle de la ligne AB pour laquelle la mesure a été effectuée. La figure 66b est un exemple de diagramme réalisé sur le terrain.

Figure 66 LE DISPOSITIF CARRÉ
Mise en œuvre — Principe



Figure 66a

Mise en œuvre du dispositif carré

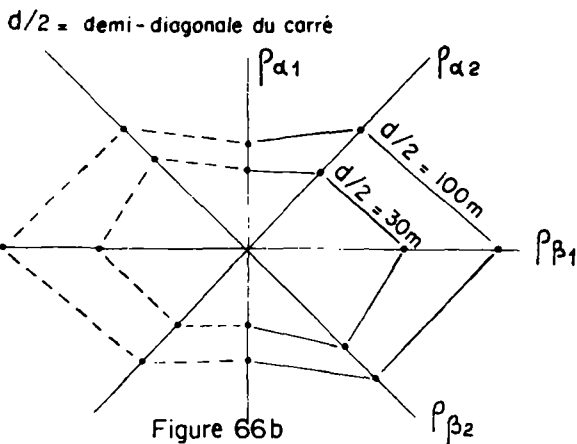


Figure 66b

Exemple de Diagramme obtenu sur le terrain

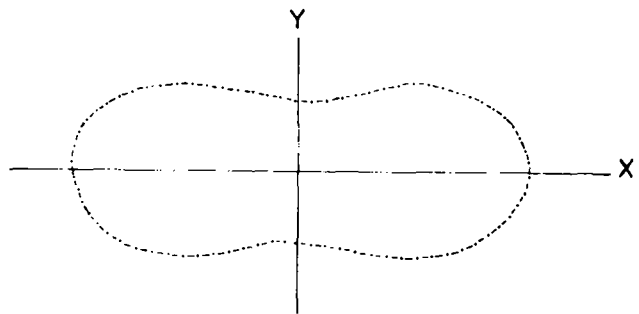


Figure 66c

Exemple de diagramme théorique
(cas de figure 66e)

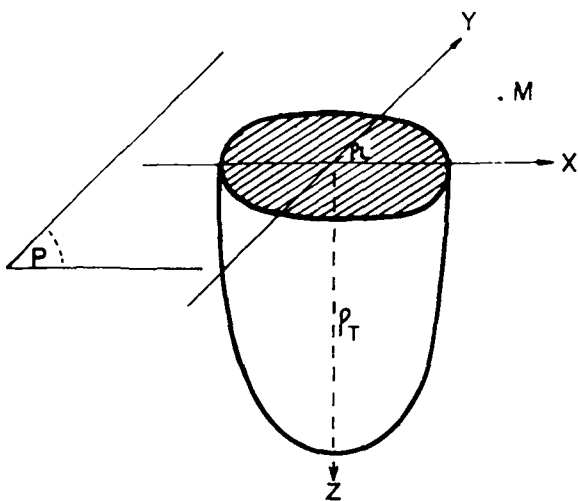


Figure 66d

Cas où l'axe portant la résistivité transversale est vertical
(P = Plan de schistosité, de fissuration.....)

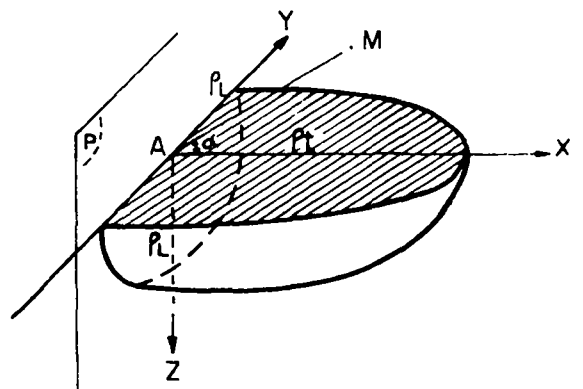


Figure 66e

Cas où l'axe portant la résistivité transversale est horizontal
(P = Plan de schistosité, de fissuration.....)

4.2 Interprétation des résultats

Tous les diagrammes obtenus à ZIGLA et MOGTEDO présentent une variation de la résistivité apparente lorsque le dispositif subit une rotation. Le premier modèle d'interprétation venant à l'esprit est, par conséquent, un modèle anisotrope.

4.21 Rappel sur l'anisotropie électrique

On attribue l'anisotropie observée en prospection électrique à l'anisotropie propre des roches qu'elle soit liée à la présence de minéraux déposés en lits (argiles, micas...) ou bien qu'elle soit apparue après leur formation à la faveur de phénomènes géologiques (schistosité par exemple). Des études réalisées en milieux karstiques ont montré que la fissuration était également à l'origine d'une anisotropie électrique. L'allure générale des diagrammes obtenus à ZIGLA et MOGTEDO d'une part, et le fait que les directions d'anisotropie observées correspondent à des directions de fissuration reconnues sur le terrain d'autre part, montre qu'il est désormais possible d'ajouter à la liste des formations pouvant être assimilées à des milieux anisotropes, les milieux cristallins fissurés. Ce résultat est, sans aucun doute, le plus important de cette campagne de mesure. Il nous autorise à exploiter tous les résultats acquis antérieurement concernant les milieux anisotropes notamment ceux obtenus en milieux karstiques.

En prospection électrique, on a l'habitude de considérer des milieux présentant une anisotropie de révolution, c'est-à-dire tels que la résistivité vraie soit maximum dans une direction et minimum dans toutes les directions du plan perpendiculaire à la précédente. Pour les roches présentant des plans de litage (ou des plans de schistosité ou de fissuration) la résistivité maximum est perpendiculaire à ces plans et est appelée "résistivité transversale". La résistivité minimum est parallèle à ces plans et est appelée "résistivité longitudinale". Les figures 66d et 66e donnent l'ellipsoïde des résistivités vraies. L'axe portant la résistivité transversale peut être vertical (fig. 66d) ou horizontal (fig. 66e). Dans la suite de l'exposé, nous ne considérerons que le cas de la figure 66e ce qui revient à se limiter au cas de formations présentant un plan de litage (ou de schistosité ou de fissuration) vertical. Ce choix n'est pas arbitraire. On montre, en effet, que pour des mesures réalisées à la surface d'un milieu anisotrope homogène dont l'axe portant la résistivité transversale est vertical (fig. 66d), tout se passe comme si nous étions en présence d'un milieu isotrope.

Quel que soit le dispositif d'électrodes utilisé, les diagrammes de résistivité sont des cercles, ce qui n'est pas le cas des diagrammes que nous avons obtenus à ZIGLA et à MOGTEDO.

A partir de la résistivité transversale " ρ_t " et de la résistivité longitudinale " ρ_L ", on peut définir deux paramètres caractérisant un milieu anisotrope:

- . le coefficient d'anisotropie $\lambda = \sqrt{\rho_t / \rho_L}$
- . la résistivité moyenne $\rho_m = \sqrt{\rho_t \rho_L}$

Le calcul permet d'aborder la distribution du potentiel à la surface d'un demi-espace homogène anisotrope (axe portant la résistivité transversale horizontal). On montre alors que le potentiel V crée par une source de courant ponctuelle I en un point M de la surface du sol situé à une distance $r = \sqrt{X^2 + Y^2}$ se met sous la forme :

$$V = \frac{I \rho_m}{2\pi} \frac{1}{\{\lambda^2 X^2 + Y^2\}^{1/2}}$$

Une fois connue cette relation, il est aisé d'écrire la relation donnant la valeur de la résistivité pour n'importe quel dispositif d'électrodes et de tracer le diagramme théorique correspondant. La figure 66c montre le diagramme théorique obtenu avec le dispositif carré à la surface d'un milieu anisotrope homogène. On constate que ce diagramme est tout à fait semblable à ceux obtenus sur le terrain. On notera que la direction du plan de fissuration est indiqué par l'axe Y du diagramme, c'est-à-dire l'axe suivant lequel la résistivité est minimum. Cette direction est appelée "direction d'anisotropie".

4.22 Résultats des mesures effectuées à ZIGLA et MOGTEDO

L'ensemble des diagrammes de résistivité apparente obtenus à ZIGLA et à MOGTEDO sont portés sur les figures 67 (MOGTEDO) et 68 (ZIGLA).

Tous ces diagrammes mettent en évidence une forte anisotropie du milieu prospecté.

L'interprétation des données a pour but essentiel de déterminer la direction d'anisotropie et de voir à quoi elle correspond sur le terrain. Nous verrons cependant que le coefficient d'anisotropie est également d'un grand intérêt. Nous pouvons procéder de deux façons.

La direction d'anisotropie est lue directement sur le diagramme : c'est celle du petit axe. Le diagramme permet également d'évaluer le coefficient d'allongement égal au rapport résistivité maximum/résistivité minimum. Pour le dispositif carré, ce rapport n'est pas égal au coefficient d'anisotropie. Il lui est cependant proportionnel. Cette première interprétation peut être menée sur le terrain au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

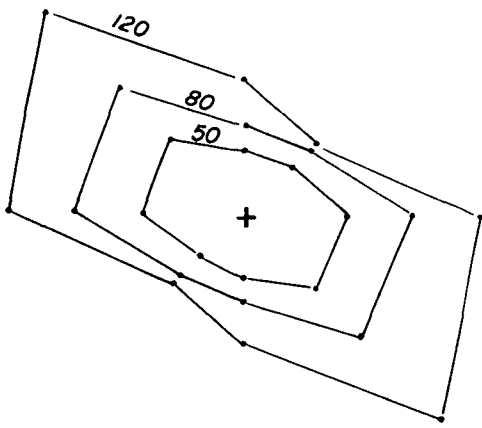
Nous pouvons également procéder à un calcul simple qui consiste à assimiler le milieu prospecté à un milieu homogène anisotrope et à évaluer à partir de quatre valeurs de résistivités $\rho_{\alpha 1}$, $\rho_{\beta 1}$, $\rho_{\alpha 2}$ et $\rho_{\beta 2}$ mesurées sur le terrain les 3 paramètres définissant un tel milieu :

- . le coefficient d'anisotropie : λ
- . la direction d'anisotropie : θ
- . la résistivité moyenne : ρ_m

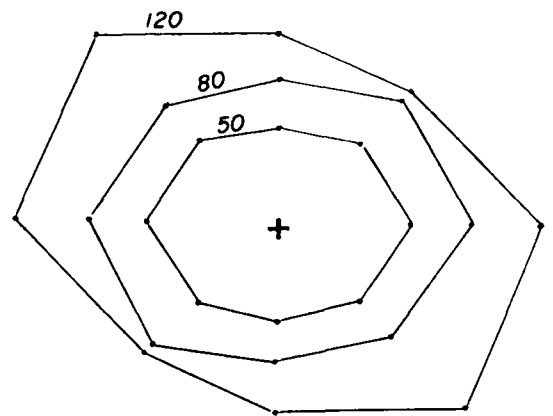
MOGTEDO

Diagramme des ρ_A obtenues avec le dispositif carré

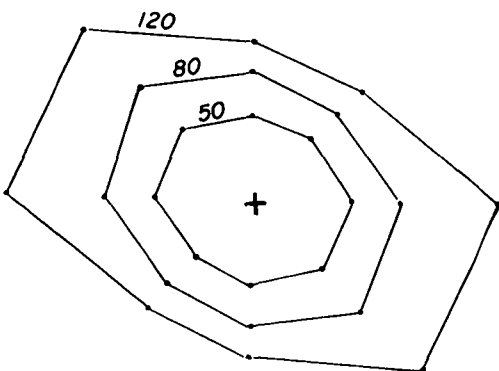
C1



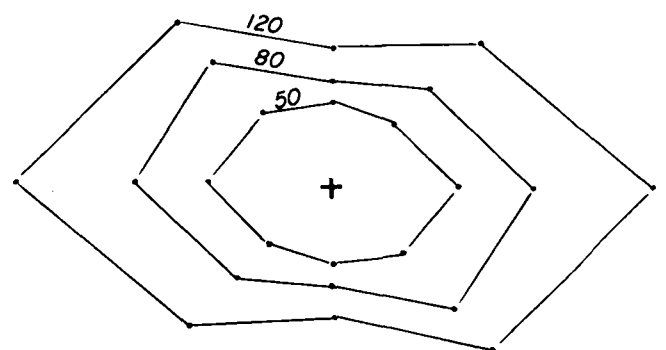
C2



C3



C4

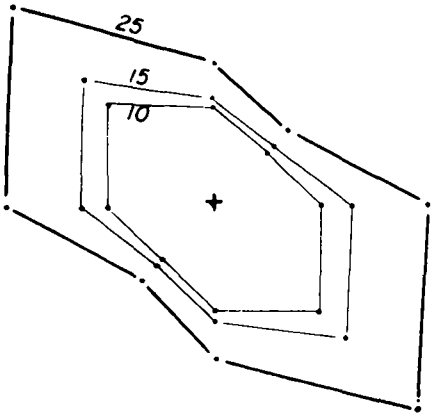


100 Ω m

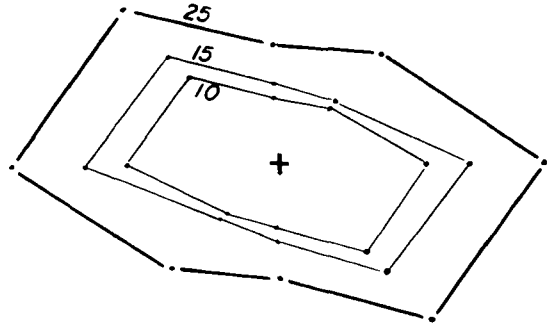
Longueur $d/2 = 50$ m

Diagramme des ρ_A obtenues avec le dispositif carré

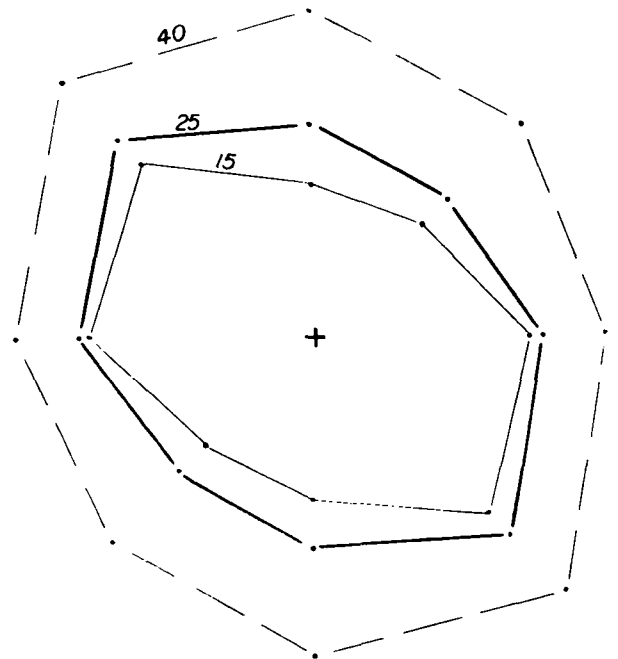
C6



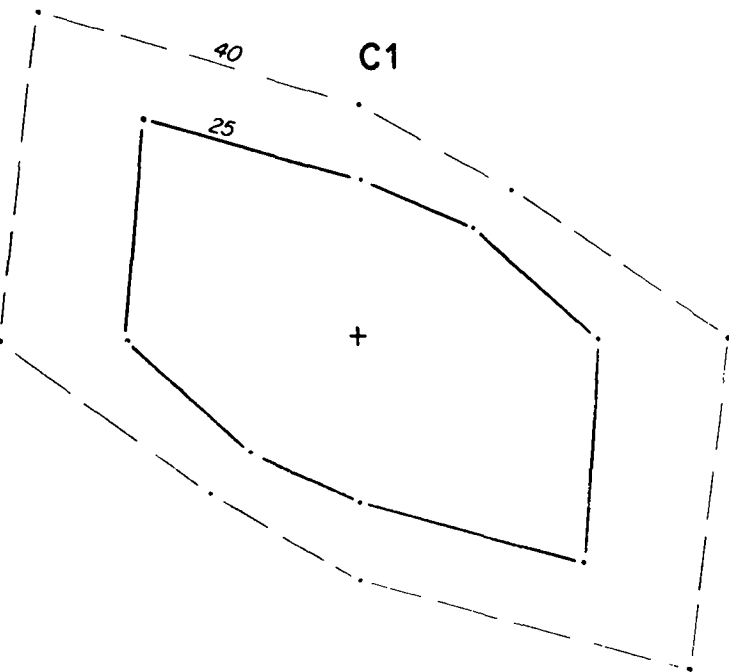
C5



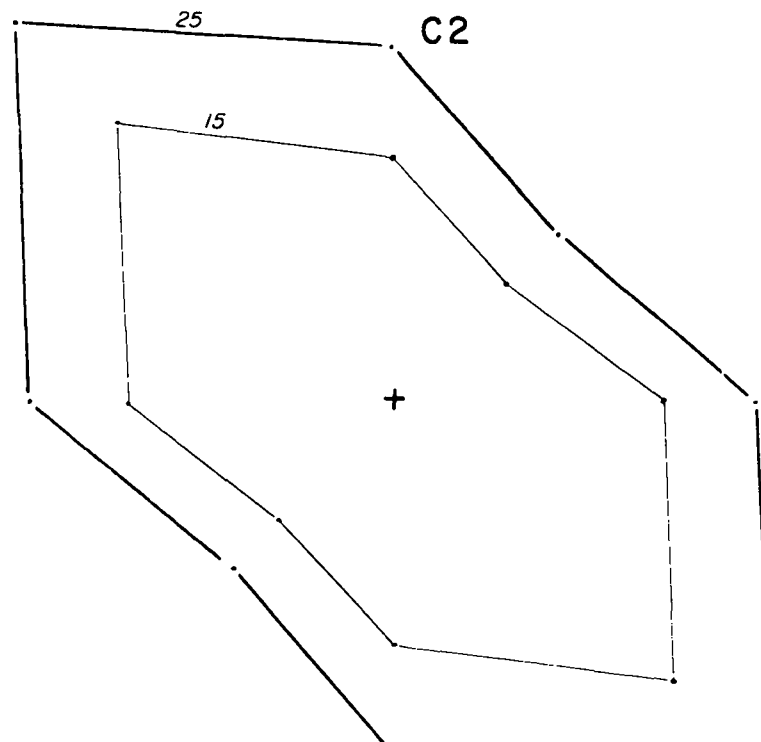
C4



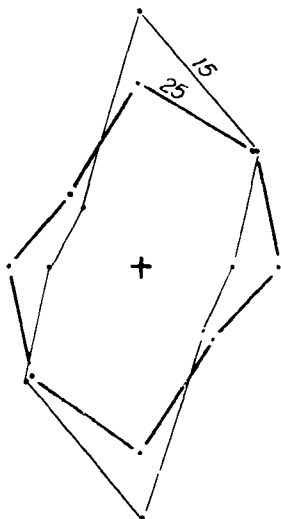
C1



C2



C3



10.0m

Pour l'ensemble du calcul, se référer à l'article d'HABBERJAM (1975) : "Apparent resistivity, anisotropy and strike measurements - Geophysical prospecting, vol 23 - p. 211-247".

Les 3 paramètres sont déterminés pour chacune des longueurs de ligne d'en-voi de courant. Le milieu prospecté n'étant pas homogène, ce sont respec-tivement des valeurs de coefficient d'anisotropie apparent (λa), de direc-tion d'anisotropie apparente (θa) et de résistivité moyenne apparente (ρma). Il faut noter ici que le calcul théorique n'a pas permis jusqu'à ce jour d'aborder l'étude de formations anisotropes horizontales (formations constituées de couches horizontales anisotropes à plan d'anisotropie ver-tical). C'est la raison pour laquelle nous sommes obligés de nous limiter à une interprétation qualitative.

Les résultats des mesures effectuées à MOGTEDO et à ZIGLA sont regroupés dans les tableaux I (MOGTEDO) et II (ZIGLA). Les 3 premières colonnes donnent des résultats directement issus des diagrammes (colonne 1 : di-rection d'anisotropie apparente θa ; colonne 2 : coefficient d'allongement apparent ϵa ; colonne 3 : moyenne des résistivités $\rho a1, \rho a2, \rho \beta, \rho \beta2$). Les trois autres colonnes sont les résultats issus du calcul (colonne 1 : direction d'anisotropie apparente ; colonne 2 : coefficient d'anisotropie apparent ; colonne 3 : résistivité moyenne apparente).

4.221 Résultats de MOGTEDO

Le dispositif carré a été implanté en 4 sites. Pour le carré C1, situé au même endroit que le sondage électrique Schlumberger SE1, les longueurs de la diagonale "d" du côté ont varié entre 16 m et 300 m. Pour les carrés C2, C3 et C4, nous avons utilisé seulement 3 longueurs de la diagonale (100 m, 160 m, 240 m) (Remarque : sur la figure 36, ce sont les valeurs de la demi-diagonale qui sont portées sur chaque diagramme). Les orien-tations pour lesquelles $\rho a1, \rho a2, \rho \beta1, \rho \beta2$ ont été mesurées sont respec-tivement 0 gr, 50 gr, 100 gr, 150 gr (par rapport au Nord magnétique).

Les résultats du tableau I appellent plusieurs remarques :

Tableau I - MOGTEDO

Paramètres lus sur diagrammes				Paramètres calculés			
d/2	θ/N	ϵ	ρ	θ/N	λ	ρ_m	
C1	8		1,21	58	107	1,06	60
	10		1,11	64	74	1,04	66
	12		1,08	72	52	1,04	74
	15		1,29	85	34	1,09	88
	20	30	1,30	105	41	1,08	110
	25	30	1,28	125	27	1,10	131
	30	30	1,65	153	29	1,19	169
	40	30	1,71	185	22	1,23	206
	50		1,63	223	26	1,21	247
	60		1,73	261	25	1,24	292
	80	25	1,97	345	25	1,30	396
	100		2,42	421	30	1,36	495
	150	25	3,55	614	37	1,45	747
	C2	50	0	1,34	306	1	1,09
80		180	1,25	440	191	1,10	468
120		30	1,42	600	25	1,15	645
C3	50	25	1,20	244	28	1,07	253
	80	25	1,30	367	35	1,09	383
	120	25	1,60	529	25	1,20	581
C4	50	5	1,57	261	9	1,15	280
	80	5	1,96	406	12	1,23	451
	120	5	2,41	587	4	1,29	670

θ/N : direction d'anisotropie en grades par rapport au Nord N.

ϵ : coefficient d'allongement

ρ : $\frac{1}{4} (\rho_{a1} + \rho_{\beta 1} + \rho_{a2} + \rho_{\beta 2})$

λ : coefficient d'anisotropie

ρ_m : résistivité moyenne

d/2 : demi diagonale du carré

a) Etude des directions d'anisotropie

Les directions d'anisotropie apparentes calculées sont assez proches de celles que l'on peut lire sur les diagrammes.

Les directions d'anisotropie apparentes obtenues à MOGTEDO se répartissent en 2 familles d'importance inégale. Ce sont par ordre décroissant d'importance :

- . N20 - N35 (en grades/Nord)
- . N190 - N10 (" ")

Ces 2 familles de direction ont été observées par J.C. GRILLOT sur le terrain. Elles correspondent à des directions de fissuration.

Pour le carré C1 (fig. 69) les longueurs de diagonale varient entre 16 m et 300 m, représentant un total de 13 longueurs de ligne. C'est donc un véritable sondage électrique pluridirectionnel que nous avons implanté sur ce site.

Il est intéressant de constater, qu'exception faite des courtes longueurs de ligne ($d/2 = 8$ m, $d/2 = 10$ m, $d/2 = 12$ m) pour lesquelles on assiste à une variation brusque de la direction d'anisotropie apparente (θ passe de 107 gr à 52 gr), les autres longueurs de ligne donnent des directions d'anisotropie assez stables oscillant entre N20 et N30 gr. On peut donc parler pour ce site d'une relative homogénéité quant à la direction de la fissuration. On retrouve cette homogénéité sur les sites C3 et C4 où la même direction d'anisotropie a été obtenue pour les 3 longueurs de ligne (N30 pour le carré C3, N10 pour le C4).

Pour le site C2, les 2 familles de direction citées plus haut ont été observées. La famille N25 gr semble apparaître en profondeur. Il aurait été nécessaire d'effectuer quelques mesures supplémentaires pour confirmer cette observation.

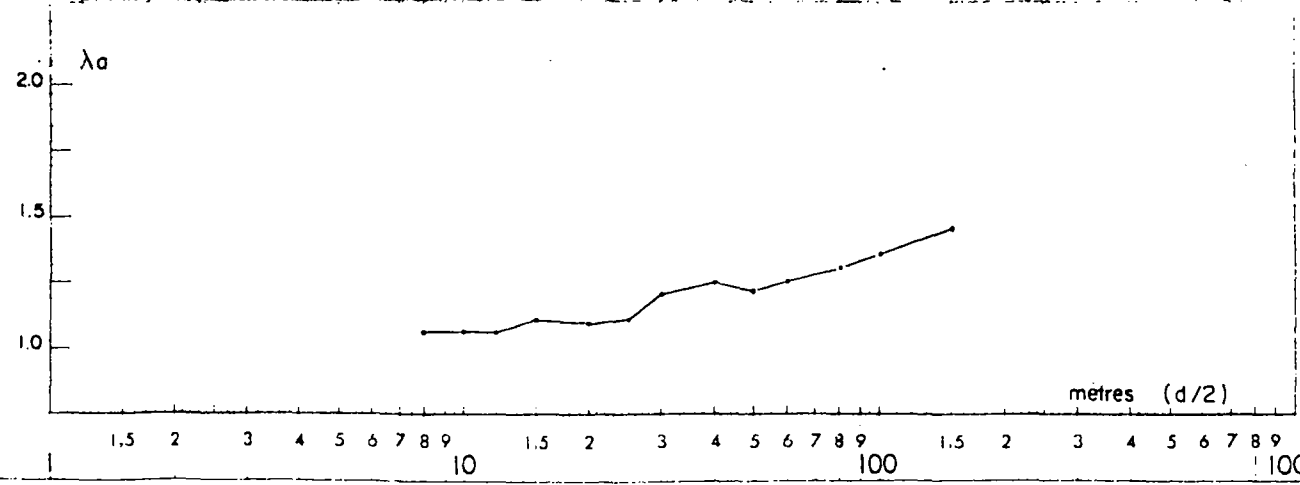
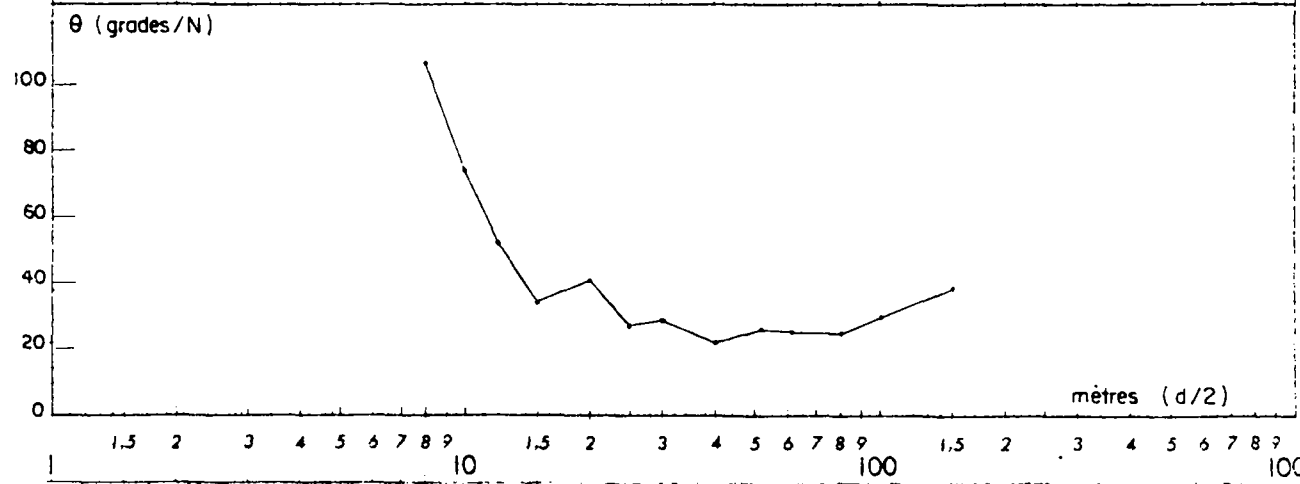
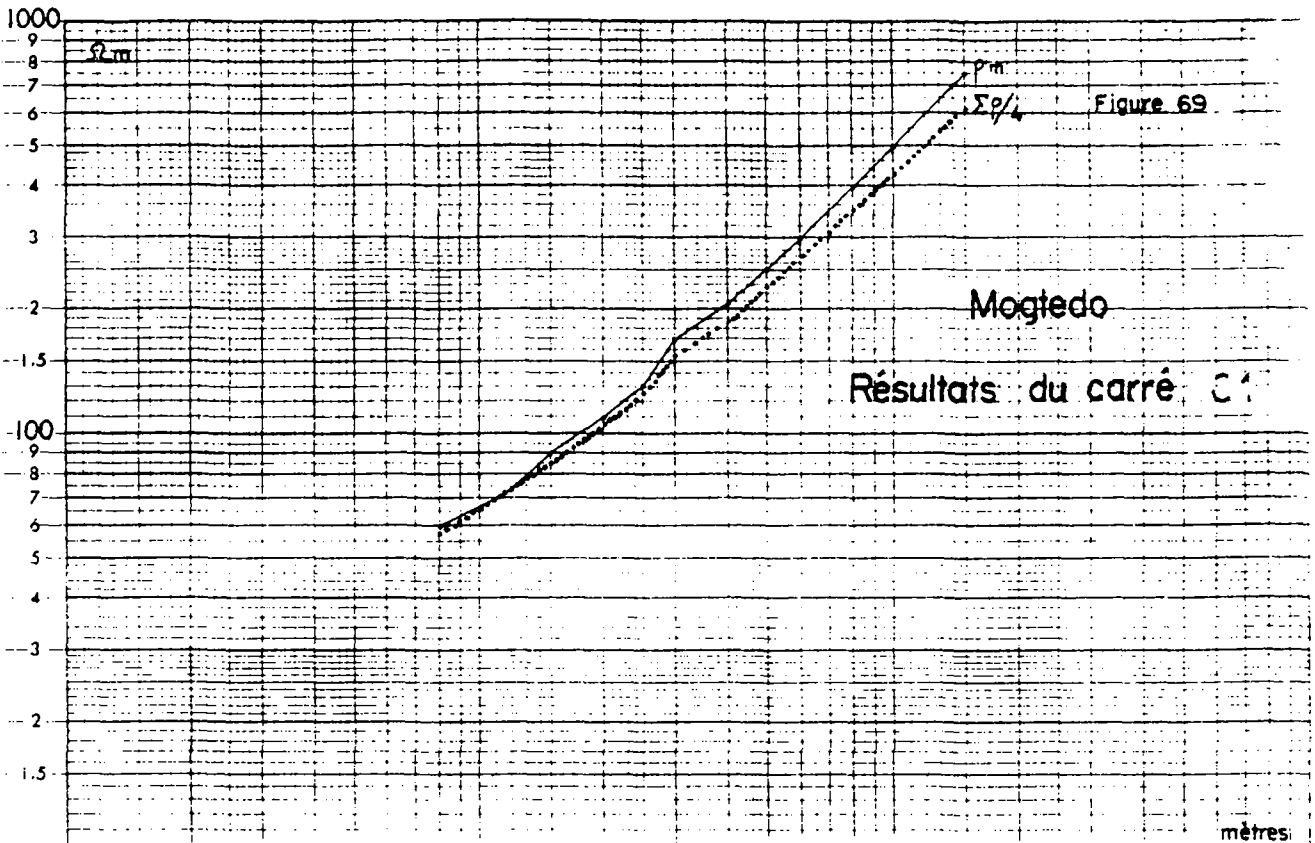
b) Etude des coefficients d'anisotropie

Les coefficients d'anisotropie apparents obtenus par le calcul varient entre 1,04 et 1,45. Les 4 sites où ont été implantés le dispositif carré sont caractérisés par le fait qu'on assiste à une augmentation progressive de ce coefficient avec la longueur de ligne d'envoi de courant. Cette observation traduit le fait qu'on passe d'un milieu pratiquement isotrope en surface (latérites, formation superficielle..) à un milieu fissuré en profondeur. La courbe λ_a tracée pour le C1 (figure 69) illustre bien cette propriété. La comparaison de la courbe θ_a et de la courbe λ_a permet de définir le site C1 par 2 caractéristiques.

Le milieu intéressé par la distribution de courant présente une direction de fissuration (N 30g). On fait exclusion ici des premiers mètres.

L'intensité de la fissuration subit une augmentation progressive avec la profondeur.

Ces 2 caractéristiques se retrouvent aux points C3 et C4.



Le coefficient d'anisotropie apparent calculé pour une longueur de la demi-diagonale donnée peut être utilisé pour comparer des sites entre eux.

Pour $d/2 = 50$ m, le site C1 a donné la plus grande valeur du coefficient d'anisotropie apparent ($\lambda_a = 1,21$). Viennent ensuite le site C4 ($\lambda_a = 1,15$) le site C2 ($\lambda_a = 1,09$), le site C3 ($\lambda_a = 1,07$).

Pour $d/2 = 80$ m, on retrouve à peu près le même ordre :

- . pour le site C1 $\lambda_a = 1,30$
- . pour le site C4 $\lambda_a = 1,23$
- . pour le site C2 $\lambda_a = 1,10$
- . pour le site C3 $\lambda_a = 1,09$

REMARQUE

Paramètres pouvant entraîner une augmentation ou une diminution du coefficient d'anisotropie apparent :

Dans un milieu homogène anisotrope, 4 paramètres au moins peuvent entraîner une variation du coefficient d'anisotropie mesuré à la surface du sol :

- . la présence d'un recouvrement isotrope entraîne une diminution de λ ; plus l'épaisseur de celui-ci est grande, plus la diminution de λ est importante.
- . l'inclinaison du plan d'anisotropie par rapport au plan de fissuration pour le cas que nous étudions entraîne également une diminution de λ .
- . Lorsque l'intensité de la fissuration diminue (c'est-à-dire le nombre de fissures par élément de longueur), le coefficient d'anisotropie diminue.
- . Lorsque l'anisotropie électrique est due à l'alternance de couches conductrices et résistantes (ce type d'anisotropie est appelé "macro-anisotropie"), le coefficient d'anisotropie est d'autant plus fort que le contraste de résistivité entre chaque couche est élevé. (Le milieu fissuré peut être schématisé comme un milieu macro-anisotrope dont les fissures seraient les couches conductrices. La nature du remplissage interviendrait alors dans le coefficient d'anisotropie).

Sur les sites C1 et C3, la même famille de direction de fissuration a été observée. Les études de terrain ne font pas état pour cette direction d'une inclinaison. La diminution du coefficient d'anisotropie apparent λ_a constatée lorsque l'on passe du point C1 au point C3 peut être attribuée à 2 causes :

- . soit l'épaisseur du recouvrement isotrope superficiel est supérieur au point C3,
- . soit l'intensité de la fissuration (nous regroupons sous ce terme à la fois le nombre de fissures par élément de longueur, et le contraste de résistivité entre couches conductrices et couches résistantes) est inférieure au point C3.

L'interprétation des sondages électriques Schlumberger SE1 et SE6 implantés respectivement aux points C1 et C3 montrent que la première hypothèse n'est pas vérifiée. L'augmentation du coefficient d'anisotropie λ_a au point C1 serait donc à attribuer à une augmentation de l'intensité de la fissuration. Devant l'importance de ce résultat, il nous paraît indispensable de contrôler par forage la relation pouvant exister entre le coefficient λ_a et la valeur hydrogéologique d'un site. Dans l'immédiat, on peut noter que le point C1 est implanté au droit d'un forage productif. Si un tel résultat devait se confirmer, le sondage électrique pluridirectionnel permettrait avec le paramètre λ de localiser des zones intéressantes sur le plan hydrogéologique, conformément à l'idée que nous avons déjà émise lors de notre étude en milieux karstiques.

Le dispositif carré apparaît comme une méthode permettant de délimiter un certain nombre de "cibles" pour des études hydrogéologiques.

c) Etude sur la résistivité moyenne (ρ_m)

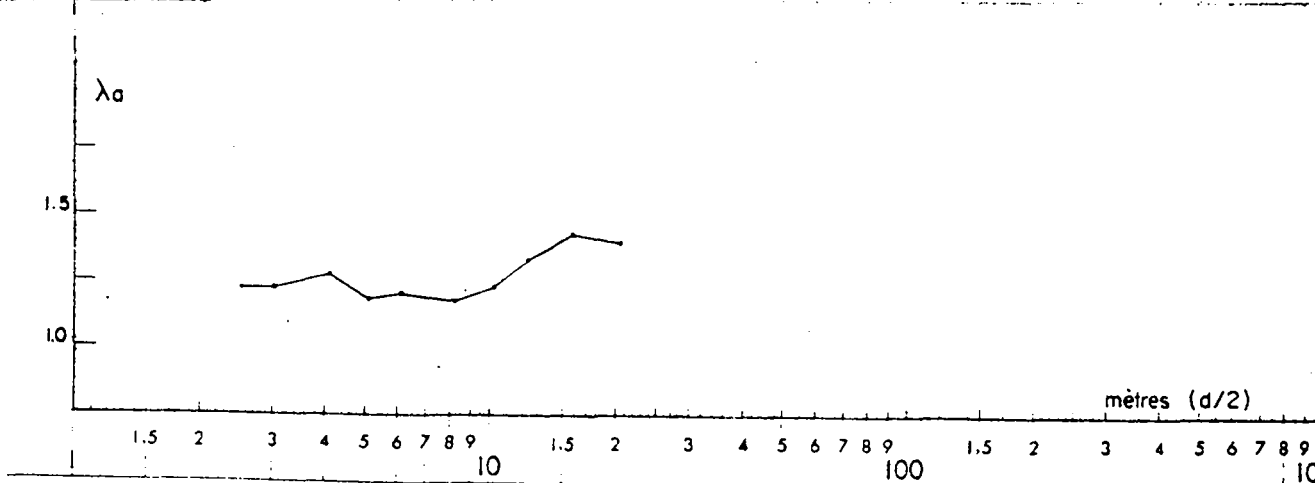
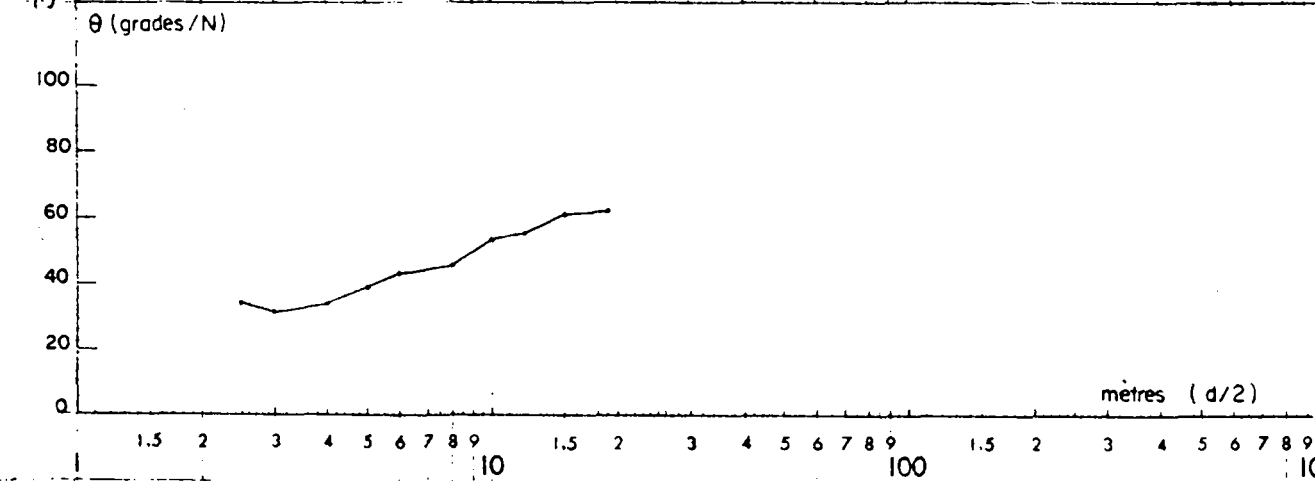
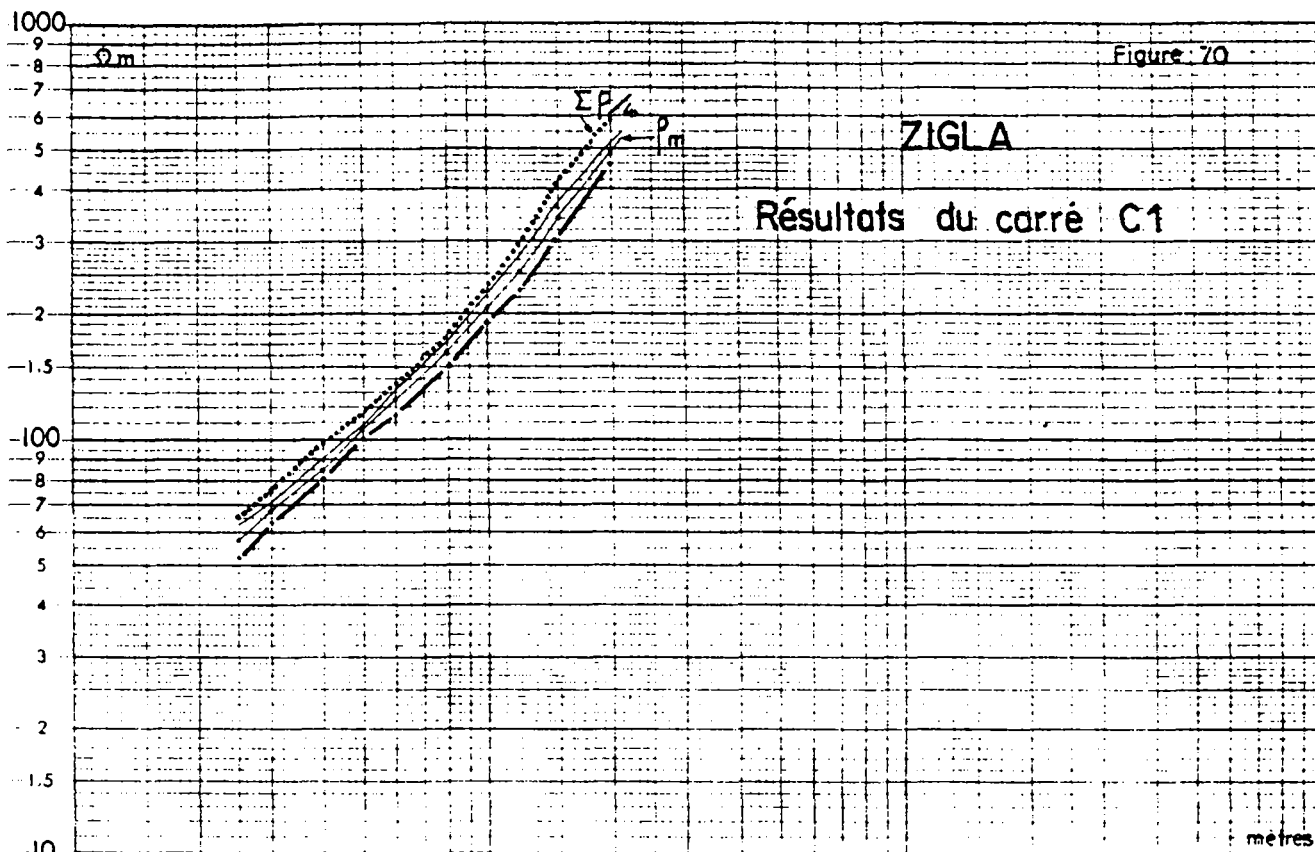
La résistivité moyenne est le troisième paramètre issu du calcul. Son avantage réside dans le fait qu'il tient compte de l'anisotropie du milieu prospecté. Comme le souligne HABBERJAM (1975), cette quantité est indépendante du pendage des plans d'anisotropie (ou plans de fissuration). Les valeurs de ρ_{ma} portées sur la courbe de la figure 69 ou dans le tableau I montrent que ce paramètre reflète l'évolution de la résistivité avec la profondeur au même titre que le paramètre ρ (moyenne des résistivités $\rho_{\alpha 1}$, $\rho_{\alpha 2}$, $\rho_{\beta 1}$, $\rho_{\beta 2}$). Les limites d'utilisation de documents réalisés à partir de ρ_{ma} restent par conséquent les mêmes que celles évoquées au chapitre III concernant les cartes de résistivité apparente (rectangle ou traîné).

En conclusion, les résultats apportés par le dispositif carré sur le site de MOGTEDO, peuvent se résumer de la façon suivante :

- . ce site est caractérisé par la présence de 2 familles de fissuration. Ce sont par ordre décroissant d'importance N20-N35 gr et N10 - N190 gr.
- . les différents points où ont été implantés le dispositif carré sont tous marqués par une augmentation de la fissuration avec la profondeur.
- . si l'on compare les résultats des carrés C1, C2, C3 et C4, les points C1 et C4 semblent constituer des sites prioritaires pour des études hydrogéologiques.

4.222 Résultats de ZIGLA

Le dispositif carré a été implanté en 6 sites. Pour le point C1, les longueurs de diagonale du carré ont varié entre 50 m et 400 m. Pour les carrés C2, C3, C4, C5 et C6, deux ou trois longueurs de ligne comprises entre 20 et 80 m ont été utilisées. Les résultats sont regroupés dans le tableau II et par courbes ρ_{ma} , λ_a et θ_a (figure 70) pour le carré C1.



a) Etude des directions d'anisotropie

On observe une similitude entre les directions d'anisotropie lues sur les diagrammes et celles calculées.

Il existe 3 grandes familles de directions d'anisotropie (tableau II). Ce sont par ordre décroissant d'importance :

- . N35-N62 gr
- . N115-130 gr et N15-N20 gr.

La courbe θ_a obtenue au point C1 montre que la première famille N35-N62 semble se subdiviser en 2 sous-familles : N30gr et N60gr. La direction N60 n'apparaît qu'en profondeur. On retrouve cette propriété au point C4 (tableau II). L'observation précédente tend à différencier les sites de MOGTEDO et ZIGLA. A MOGTEDO, nous avons conclu à une homogénéité pour ce qui était de la direction d'anisotropie. A ZIGLA, au contraire, la présence de 2 directions d'anisotropie au point C1 et au point C4 nous amène à parler d'hétérogénéité. Comme à MOGTEDO, les directions d'anisotropie obtenues avec le dispositif carré ont été observées sur le terrain (GRILLOT).

b) Etude des coefficients d'anisotropie

Les coefficients d'anisotropie obtenus par le calcul varient entre 1,06 et 1,46. A l'inverse de MOGTEDO, certains sites sont caractérisés par une diminution du coefficient d'anisotropie apparent avec la profondeur. C'est le cas des points C3, C4, C5. Il aurait été cependant nécessaire d'augmenter les longueurs de ligne d'envoi de courant pour confirmer cette observation. Cette diminution de λ_a avec la profondeur pourrait être attribuée à la présence d'une formation moins fissurée, voire même à l'apparition d'un substratum de plus en plus sain.

La comparaison des coefficients d'anisotropie apparents obtenus pour $d/2 = 25$ m permet de différencier deux groupes de sites :

premier groupe	{	C6 : $\lambda_a = 1,36$	deuxième groupe	{	C3 : $\lambda_a = 1,17$
	{	C5 : $\lambda_a = 1,29$		{	C4 : $\lambda_a = 1,07$
	{	C2 : $\lambda_a = 1,27$			
	{	C1 : $\lambda_a = 1,26$			

Pour tenter d'interpréter la diminution du coefficient d'anisotropie apparent que nous pouvons constater quand on passe des sites du premier groupe à ceux du deuxième, nous nous sommes reportés aux courbes de sondages électriques Schlumberger implantés aux mêmes endroits (le SE6 au C6, le SE1 au C5, le SE3 au C2, le SE2 au C4) (figure 71).

Le sondage SE2 se différencie des sondages SE1, SE6 et SE3 pour 2 raisons :

- . une épaisseur de la tranche d'altération supérieure
- . une zone fissurée moins importante au point de ne pas apparaître sur la courbe de sondage électrique (Principe de suppression).

Figure 71

Comparaison des courbes de sondages électriques SE6-SE1-SE3 et SE2

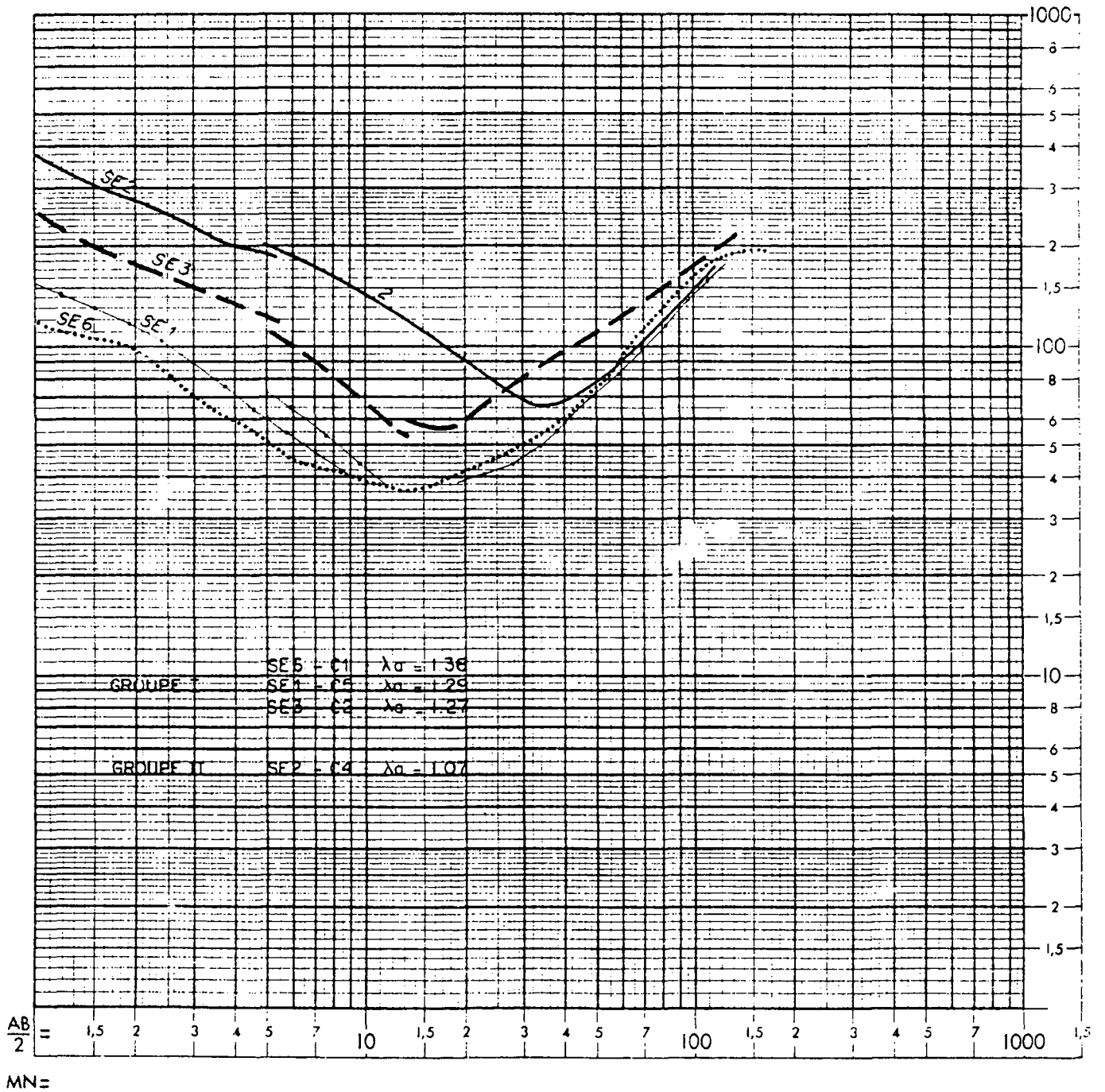


Tableau II - ZIGLA

Paramètres lus sur diagrammes				Paramètres calculés			
	d/2	θ/N	ϵ	ρ	θ/N	λ	ρ_m
C1	25	23	1,7	57	34	1,26	63
	30			67	31	1,26	75
	40	28	2,2	85	34	1,29	97
	50			104	39	1,21	115
	60			123	43	1,22	136
	80			160	45	1,20	176
	100			205	53	1,24	230
	120			281	55	1,36	294
	150	65	2,55	341	61	1,46	416
	200	65	2,55	486	62	1,42	586
C2	15	50	2,3	71	46	1,29	81
	25	50	2,3	98	49	1,27	111
C3	15	112	2,4	35	116	1,42	46
	25	133	1,6	37	130	1,17	42
C4	15	27	1,5	52	33	1,17	57
	25	27	1,5	61	43	1,12	64
	40	50	1,2	84	62	1,07	87
C5	10	22	2,1	27	17	1,33	32
	15	22	2,1	34	10	1,37	40
	25	10	2,2	50	14	1,29	57
C6	10	50	2,2	27	48	1,21	32
	15	50	2,2	34	43	1,28	38
	25	30	2,1	49	39	1,36	58

θ/N : direction d'anisotropie en grades par rapport au Nord.

ϵ : coefficient d'allongement

ρ : $\frac{1}{4} (\rho_{\alpha 1} + \rho_{\beta 1} + \rho_{\alpha 2} + \rho_{\beta 2})$

λ : coefficient d'anisotropie

ρ_m : résistivité moyenne

d/2 : demi-diagonale du carré

La pente de cette courbe est en effet de 45° à l'inverse de celles des courbes SE1 et SE6 qui enregistrent une amorce de palier pour des longueurs de ligne AB/2 comprises entre 15 et 30 m. Ces 2 faits concourent à diminuer le coefficient d'anisotropie apparent. La deuxième nous incite à accorder au site C4 une priorité moins importante pour ce qui est des éventuelles ressources en eau dans la partie fissurée du massif.

En résumé, les résultats apportés par le dispositif carré sur le site de ZIGLA sont les suivants :

- . ce site est caractérisé par la présence de 3 familles de directions de fissuration. Ce sont, par ordre décroissant d'importance :

N35-N62 gr
N115-N150 gr et N15-N20 gr.

- . certains sites sont caractérisés par une diminution des coefficients d'anisotropie obtenus pour des longueurs de ligne d/2 croissantes (C3, C4, C5). Celle-ci peut être associée à une diminution de l'intensité de la fissuration avec la profondeur et au passage progressif d'un substratum de plus en plus sain. Il aurait été cependant nécessaire d'effectuer des mesures supplémentaires pour confirmer cette observation.
- . si l'on compare les résultats des différents sites prospectés, les points C6, C2, C1 et C5 semblent constituer des sites prioritaires pour des études hydrogéologiques.

4.3 Conclusions sur la prospection avec le dispositif carré

Au vu des résultats de MOGTEDO et ZIGLA, il se confirme que le dispositif carré apporte avec les paramètres θ_a et λ_a des renseignements indispensables à la bonne connaissance des ressources hydrogéologiques d'un massif cristallin fissuré. Ce dispositif permet :

- . grâce à θ_a , de déterminer la direction de fissuration du massif cristallin,
- . grâce à λ_a , de délimiter des zones plus intensément fissurées.

Limites d'utilisation de la méthode :

Celles-ci sont liées en grande partie, au fait que les paramètres θ et λ déterminés par le calcul pour une certaine longueur de ligne d'envoi de courant sont des paramètres apparents. Cette propriété se traduit sur le terrain par l'absolue nécessité d'effectuer des mesures pour plusieurs longueurs de ligne. La réalisation d'un véritable sondage électrique pluridirectionnel en au moins un point de la zone prospectée est conseillée.

La deuxième difficulté de la méthode est l'absence de programme d'interprétation des courbes ρ_{ma} , λ_a et θ_a . Ce point nous oblige à nous contenter d'une interprétation grossière des résultats.

Dans la comparaison des coefficients d'anisotropie λ_a obtenus en différents sites, nous avons vu que plusieurs causes peuvent entraîner une diminution de ce paramètre. Les exemples de ZIGLA et MOGTEDO montrent que l'utilisation conjointe du dispositif carré croisé et d'un sondage électrique classique permet de lever quelques indéterminations.

Utilisation pratique du dispositif carré

- . Quelques sites de dispositif carré croisé régulièrement répartis sur la zone prospectée avec au moins un sondage électrique pluridirectionnel complet.
- . Sur des zones supposées intéressantes, quelques sondages électriques classiques pour compléter l'interprétation.

A titre d'exemple, rappelons que 5 sites du dispositif carré croisé à 3 longueurs de ligne, 1 site de dispositif à 10 longueurs de ligne et 6 sondages électriques Schlumberger nécessitent 2 jours de travail.

La correspondance entre direction d'anisotropie et direction de fissuration, nous amène à préconiser l'usage du dispositif carré dans les deux cas suivants :

- a) dans les zones où l'observation de surface et la photo-interprétation sont impossibles (altération - sable - culture - urbanisation) le dispositif carré est une des rares méthodes pour connaître la direction de la fissuration et son évolution avec la profondeur.
- b) Si on désire réaliser une carte de résistivité apparente (rectangle ou traînés), les profils de mesures doivent être perpendiculaires aux structures géologiques et aux fractures principales. Quelques mesures réalisées avec le dispositif carré en quelques sites régulièrement répartis sur la zone, devraient permettre de définir la direction structurale, de vérifier si elle reste constante sur toute la zone étudiée et de choisir en conséquence la direction du dispositif. Sur les figures 56 (MOGTEDO) et 60 (ZIGLA), les directions d'anisotropie fournies par le dispositif carré croisé en plusieurs sites donnent les directions des anomalies décelées sur la carte de résistivité apparente. L'intérêt du dispositif carré apparaît ici au stade de la mise en place d'une campagne de prospection électrique, en particulier dans les secteurs où les structures sous-jacentes sont masquées.

La similitude, entre les directions d'anisotropie calculées et celles lues sur les diagrammes au fur et à mesure de l'avancement des travaux, présente un intérêt pratique. Le géophysicien peut donner ce paramètre à l'hydrogéologue de façon immédiate. Il peut être également amené à adapter, voire même à modifier son programme de mesure (orientation de la ligne AB pour une carte de rectangle, par exemple).

5 - CONCLUSIONS GENERALES

Les conclusions auxquelles nous aboutissons au terme de cette étude sont essentiellement d'ordre méthodologique.

5.1 Récapitulatif

Que peut apporter le sondage électrique, le profilage de résistivité apparente et le sondage électrique pluridirectionnel (dispositif carré) dans l'investigation des ressources hydrogéologiques de massifs cristallins fissurés ?

5.11 Sondage électrique

L'expérience de MOGTEDO et de ZIGLA a montré qu'on ne pouvait espérer une grande précision dans l'interprétation quantitative des courbes de sondages électriques. Les difficultés sont essentiellement de deux types :

- a) Les caractéristiques géoélectriques de la formation prospectée aboutissent à des courbes de sondages électriques d'interprétation délicate : l'épaisseur et la résistivité de la zone fissurée sont telles que celle-ci affecte peu ou pas du tout la forme des courbes de sondage électrique. Cette propriété est une illustration du principe de suppression. On ne peut espérer s'affranchir de cette difficulté qu'en disposant d'un nombre suffisant de forages permettant d'étalonner les mesures. Dans le cadre d'une étude régionale, l'utilisation conjointe de sondages électriques et de forages peut être envisagée. Selon certains auteurs, l'utilisation simultanée de la méthode de sondage électrique par courant continu et de la méthode de sondage magnétotellurique ou électromagnétique permet de réduire les limites des effets de suppression et d'équivalence. Cette mise en oeuvre de deux méthodes ne dispense pas cependant de s'étalonner sur quelques forages. Malheureusement, à l'échelle d'un village, cela nous paraît plus difficile.
- b) Le modèle d'interprétation choisi ne correspond pas exactement au modèle réel. En effet, le milieu prospecté est caractérisé à la fois par son hétérogénéité et la présence de fractures qui sont à l'origine de l'anisotropie électrique que nous avons observée dans ces régions. Le modèle d'interprétation choisi est un modèle stratifié homogène et isotrope. On aurait donc tort, au départ, d'attendre une interprétation très précise. Tout au plus peut on espérer augmenter la précision en implantant au mieux le dispositif, en choisissant correctement son orientation. Pour le type de courbe de sondage électrique obtenu à MOGTEDO et ZIGLA, il semble qu'il faille implanter le dispositif parallèlement à la direction de la fracturation. Nous pensons, cependant, qu'il serait utile de se pencher sur ce problème (par une simulation sur modèle réduit, par exemple).

5.12 Profils et cartes de résistivités apparentes

Lorsque la zone prospectée présente une couverture non homogène (épaisseur et résistivité variables), les cartes et profils de résistivité apparente se sont révélés d'interprétation délicate. Ces documents seuls ne permettent pas de localiser des zones favorables à l'implantation d'un forage. D'autres méthodes sont nécessaires pour contrôler la nature des anomalies signalées. Sur de tels sites, un des rares renseignements fournis par cette technique est la confirmation d'une direction de fracturation. L'utilisation de deux longueurs de ligne d'envoi de courant (la plus courte permettant de cartographier les anomalies d'origine superficielle) résoud dans certains cas le problème. La comparaison des deux documents permet d'estimer si une anomalie est située en profondeur. Cette propriété n'est malheureusement pas générale (voir chapitre 3) ; de plus, elle alourdit considérablement la mise en oeuvre.

5.13 Dispositif carré croisé

L'expérimentation du dispositif carré croisé effectuée à MOGTEDO et à ZIGLA laisse entrevoir un espoir pour le géophysicien de pouvoir contribuer à l'amélioration des connaissances des ressources aquifères d'un massif cristallin fracturé. L'intérêt de cette technique est double :

- . Elle permet de déterminer rapidement une direction de fissuration affectant le massif cristallin. Celle-ci est donnée par la direction du petit axe des diagrammes de résistivité apparente. Dans les zones où un recouvrement empêche toute observation géologique ou rend ininterprétable les photos aériennes, le dispositif carré croisé sera une des rares méthodes proposées à l'hydrogéologue pour accéder à l'étude des directions de fracturation affectant un massif cristallin.
- . L'utilisation du dispositif carré permet d'accéder à un second paramètre : le coefficient d'anisotropie. Dans la mesure où la direction suivant laquelle se fait l'allongement des diagrammes est liée à la direction de la fissuration affectant un massif cristallin, il y a tout lieu de penser que le coefficient d'allongement proportionnel au coefficient d'anisotropie est lié à l'intensité de la fissuration. Les documents établis à l'aide de ce paramètre devraient permettre de délimiter des zones plus fissurées que d'autres.

Devant l'importance de ce résultat, nous pensons qu'il serait nécessaire de confirmer par forage la relation pouvant exister entre la valeur du coefficient d'anisotropie obtenue et la qualité hydrogéologique d'un site.

La technique du dispositif carré croisé n'est pas sans présenter quelques inconvénients :

- . Sur le plan de la mise en oeuvre, elle est plus longue et nécessite la présence de 5 personnes (1 personne effectuant les mesures, 4 autres s'occupant des électrodes A, B, M et N) comme pour le profilage.

- . Les paramètres issus du calcul (direction d'anisotropie, coefficient d'anisotropie et résistivité moyenne) dans une certaine longueur de ligne d'envoi de courant sont des "paramètres apparents" au même titre que le paramètre "résistivité" que nous mesurons sur le terrain. Cela tient au fait que le milieu prospecté ne peut être assimilé à un milieu homogène. Cette notion est importante. Elle se traduit sur le terrain par l'absolue nécessité de choisir correctement la longueur de ligne d'envoi de courant. Il nous paraît indispensable d'effectuer, en quelques points de la zone prospectée, un sondage carré croisé avec plusieurs longueurs de ligne d'envoi de courant.

5.2 Proposition d'une méthodologie à utiliser dans l'étude hydrogéologique d'un massif cristallin fracturé.

L'expérimentation des 3 méthodes utilisées à MOGTEDO et à ZIGLA nous conduit à proposer quelques modifications dans la mise en place d'une campagne de prospection électrique appliquée à la recherche d'eau en pays cristallin fracturé. La méthodologie proposée est différente suivant que l'on se place à l'échelle régionale ou à l'échelle locale. Cette différenciation se répercute à la fois sur le temps nécessaire à la mise en oeuvre des mesures et sur les moyens financiers.

Nous avons regroupé dans le tableau III, les phases principales de la prospection électrique telle que nous la concevons à la lueur des résultats de ZIGLA et MOGTEDO.

5.21 Dans le cas d'une prospection à l'échelle régionale

la méthodologie proposée présente quelques variantes suivant que la zone étudiée est caractérisée par la présence ou non d'une formation superficielle. Celle-ci, lorsqu'elle est présente, peut nuire à l'observation géologique ou l'interprétation des photos aériennes. Le dispositif carré intervient alors au tout début de la prospection. Son intérêt est double :

- . Il permet de déterminer la, ou les directions de fracturation affectant le massif cristallin.
- . Au stade de la mise en oeuvre, il permet de choisir l'orientation des profils de résistivité apparente qui doivent être perpendiculaires à la direction de fracturation et exécutés avec au moins deux longueurs de ligne.

5.22 Dans le cas d'une prospection à l'échelle locale

la prospection est axée sur l'utilisation du dispositif carré croisé dont l'intérêt réside ici dans l'établissement de 2 documents :

- . Une carte de coefficients d'anisotropie apparente
- . Une carte de résistivité moyenne apparente.

Une telle méthode est plus longue et plus coûteuse que celles utilisées jusqu'à présent. Elle nécessite un effort supplémentaire au niveau de la mise en oeuvre. Devant l'importance des résultats acquis et en l'absence d'autres méthodes géophysiques permettant de fournir aux hydrogéologues des documents exploitables, cet effort nous paraît nécessaire.

Dans certains cas, on peut alléger la méthode en effectuant seulement un profilage à l'aide du dispositif carré simple décrit à la figure 72. Il consiste à mesurer le long du profil, les valeurs ρ_{\max} et ρ_{\min} correspondant respectivement aux valeurs mesurées dans le grand axe et le petit axe du diagramme de résistivité apparente. Le rapport ρ_{\max}/ρ_{\min} donne le coefficient d'allongement du diagramme qui est proportionnel au coefficient d'anisotropie. La carte établie à l'aide de ce paramètre aura donc la même signification que les cartes de coefficients d'anisotropie. La moyenne des résistivités ρ_{\max} et ρ_{\min} permet de tracer des cartes de résistivités apparentes.

Cette technique plus simple que la précédente suppose que l'on connaisse la direction de la fracturation de manière à implanter correctement le dispositif. Elle suppose que cette direction reste constante sur toute la longueur du profil. Toute variation de celle-ci entraînera en effet une erreur importante sur le coefficient d'allongement et donnera une mauvaise interprétation. Cette difficulté est illustrée sur la figure 72.

Si le dispositif carré est correctement implanté, le rapport ρ_{\max}/ρ_{\min} donne un coefficient d'allongement égal à 2.

Si la direction de la fracturation varie le long du profil et si l'on continue à implanter le dispositif de la même façon, le rapport ρ_{\max}/ρ_{\min} donne un coefficient d'allongement égal à 1,2.

Le dispositif carré simple doit donc être utilisé avec la plus grande prudence. Cette technique a plus de chances de donner de bons résultats sur des zones de faible superficie, c'est-à-dire pour des études ponctuelles. Notons que la mise en oeuvre d'un profil à l'aide du dispositif du "carré simple" est équivalente à celle d'un profil à double longueur de ligne.

Figure 72

PROFILAGE DES MESURES REALISÉES AVEC LE DISPOSITIF CARRÉ

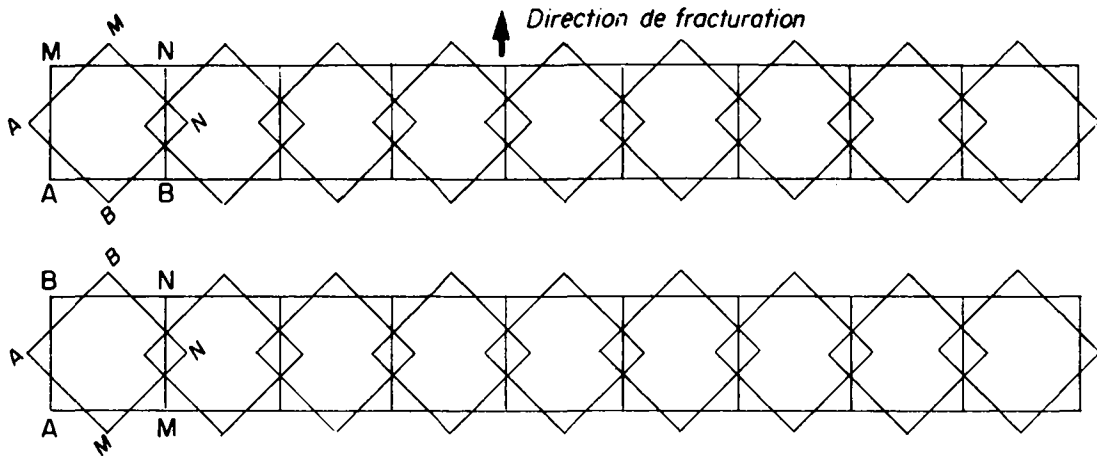


Figure 72a Dispositif carré croisé

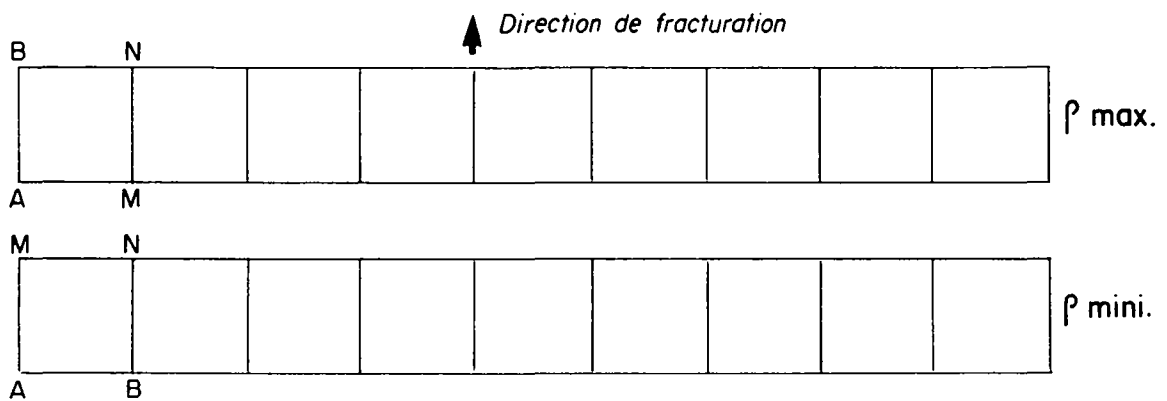


Figure 72b Dispositif carré simple

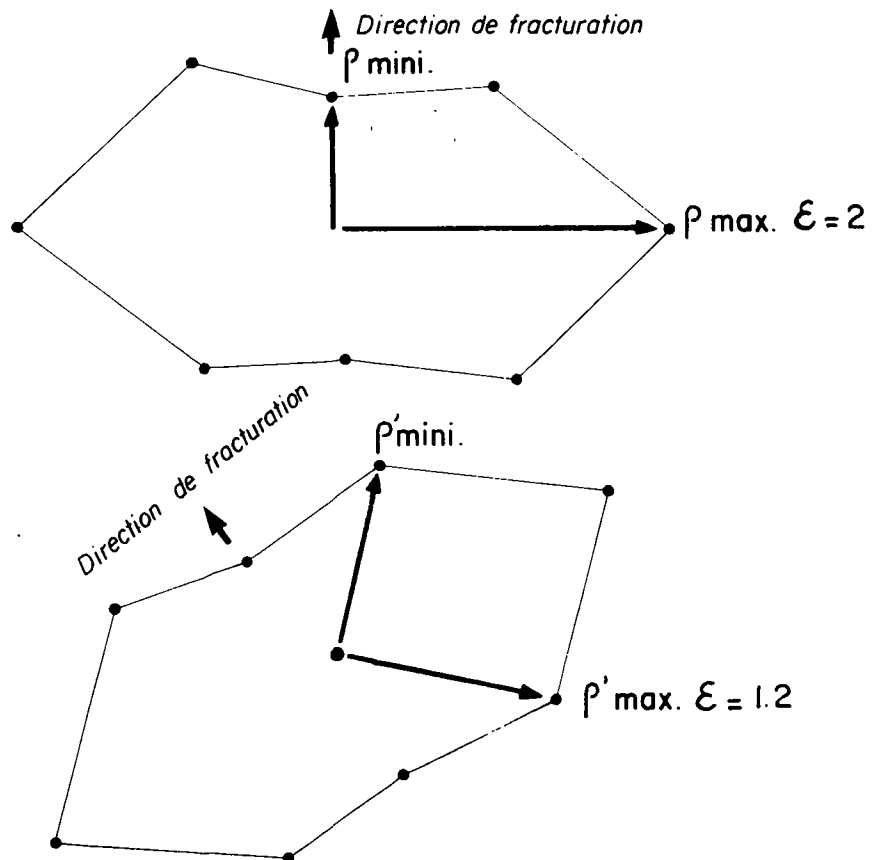


Figure 72c Dispositif carré simple

Influence d'une variation de la direction de la fracturation sur l'évaluation du coefficient d'allongement

Tableau III

PROPOSITION D'ETUDE PAR PROSPECTION ELECTRIQUE APPLIQUEE A LA RECHERCHE
HYDROGEOLOGIQUE EN ZONES CRISTALLINES FRACTUREES

	Zone sans recouvrement superficiel observation géologique-interprétation par photos aériennes possibles	Zone à recouvrement superficiel observation géologique-interprétation par photos aériennes impossibles
PROSPECTION A L'ECHELLE REGIONALE	<p>1) Profils de résistivité apparente à au moins 2 longueurs de ligne d'envoi de courant. La direction des profils est perpendiculaire à la direction de fracturation déterminée par photo aérienne. Un ou deux sondages électriques implantés auparavant permettront de choisir les longueurs de ligne à utiliser.</p> <p>2) Sondages électriques dont la principale fonction sera de contrôler la nature de quelques unes des anomalies signalées sur les profils ou cartes de résistivité apparente. Ces sondages donneront une idée des caractéristiques géoélectriques des formations prospectées. La précision de l'interprétation sera fonction du nombre de sondage électrique étalon que l'on pourra effectuer. Des coupes géoélectriques pourront être déterminées.</p> <p>Au terme de cette étude, le géophysicien pourra délimiter un certain nombre de zones vers lesquelles l'hydrogéologue pourra orienter ses recherches. Ces zones pourront faire l'objet d'une prospection géophysique détaillée.</p>	<p>1) Quelques sites de dispositif carré régulièrement répartis sur la zone à prospector permettront de déterminer la direction de fracturation affectant le massif cristallin.</p> <p>2) Profils de résistivité apparente à au moins 2 longueurs de ligne d'envoi de courant. La direction des profils est perpendiculaire à la direction de fracturation déterminée par le dispositif carré.</p> <p>3) Sondages électriques dont la principale fonction sera de contrôler la nature de quelques unes des anomalies signalées sur les profils ou cartes de résistivité apparente. Ces sondages donneront une idée des caractéristiques géoélectriques des formations prospectées. La précision de l'interprétation sera fonction du nombre de sondage électrique étalon que l'on pourra effectuer. Des coupes géoélectriques pourront être déterminées.</p>
PROSPECTION A L'ECHELLE LOCALE	<p>1) Quelques sites de dispositif croisé avec 2 ou 3 longueurs de ligne d'envoi de courant permettant de déterminer la ou les directions de fracturation qui prédominent sur le site prospecté. Un sondage carré croisé complet (une quinzaine de mesures au moins) permettra de choisir au mieux les longueurs de ligne qu'il faut utiliser.</p> <p>2) Profilage de mesures utilisant le <u>dispositif carré croisé</u>. Cette méthode aboutira à l'établissement de 2 documents :</p> <ul style="list-style-type: none"> . une carte de coefficients d'anisotropie (λa) . une carte de résistivité moyenne apparente ($\rho_m a$) <p>L'étude de ces documents, leur comparaison permettront de délimiter un certain nombre de zones intéressantes sur le plan hydrogéologique. Quelques sondages électriques simples (Schlumberger) permettront de guider l'interprétation.</p> <p>La mise en oeuvre peut être allégée en n'effectuant que des profilages de <u>dispositif carré simple</u>. La ligne AB doit alors être orientée parallèlement et perpendiculairement à la direction de la fracturation (voir figure 72 b). Cette mise en oeuvre ne peut être envisagée que dans le cas où la direction de fracturation reste la même sur toute la zone prospectée.</p>	

