



**HAL**  
open science

**Contribution à la géologie du confluent Atbara-Setit :  
étude des sites de barrage de Rumela et Burdana, Rép.  
dém. du Soudan**

Jean Chialvo

► **To cite this version:**

Jean Chialvo. Contribution à la géologie du confluent Atbara-Setit : étude des sites de barrage de Rumela et Burdana, Rép. dém. du Soudan. Géologie appliquée. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1975. Français. NNT : . tel-00756670

**HAL Id: tel-00756670**

**<https://theses.hal.science/tel-00756670>**

Submitted on 23 Nov 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

2.05.028.



Doctorat de 3° Cycle

D 052 062844 0 que et Médicale  
de Grenoble

DOUBLE  
205.142  
1975  
181

205142  
1975  
181

GEOLOGIE APPLIQUEE

# Contribution à la géologie du confluent Atbara-Setit

## Etude des sites de barrage de Rumela et Burdana

(REP. DEM. DU SOUDAN)

THÈSE

présentée pour obtenir le grade de  
Docteur de 3° Cycle

par **jean chialvo**



Thèse soutenue le 28 Novembre 1975 devant le jury d'examen

MM.	<b>R. BARBIER</b>	Président
	<b>P. ANTOINE</b>	Rapporteur
	<b>J. PERRIAUX</b>	Examineur

GEOLOGIE APPLIQUEE

205142

1975

181

Contribution à la géologie  
du confluent Atbara-Setit

Etude des sites de barrage  
de Rumela et Burdana

T. 75/1132

(REP. DEM. DU SOUDAN)

---

THÈSE

présentée pour obtenir le grade de  
Docteur de 3<sup>e</sup> Cycle

par

**jean chialvo**



Thèse soutenue le 28 Novembre 1975 devant le jury d'examen

MM.

**R. BARBIER**

Président

**P. ANTOINE**

Rapporteur

**J. PERRIAUX**

Examineur

... معایش

Maalech ...

## AVANT-PROPOS

Au moment où je termine ce travail, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé :

- Monsieur le Professeur R. BARBIER, qui m'a prodigué ses conseils en me faisant bénéficier de sa grande expérience de la géologie des barrages,
- Monsieur P. ANTOINE qui n'a jamais cessé de suivre l'élaboration de ce mémoire et dont les critiques judicieuses m'ont été d'un grand secours,
- Monsieur le Professeur J. PERRIAUX qui s'est intéressé à ce travail et m'a fait découvrir la sédimentologie,
- Monsieur le Professeur Y. LEMOIGNE de l'Université de Lyon qui, malgré ses nombreuses occupations, a spontanément accepté de déterminer mes bois fossiles,
- Madame J. SERANGE et Monsieur J.M. CANTAGREL du Laboratoire de Géologie de Clermont-Ferrand, pour les analyses chimiques et les datations absolues des échantillons,
- Madame D. PETITBOIS, du Collège de France, pour la détermination des fossiles,
- Madame GOSSELIN de la Compagnie Française des Pétroles à Talence, pour son aide dans l'interprétation des résultats d'exoscopie.

Ce travail n'aurait pu être effectué sans le concours de la SOGREAH et en particulier de Monsieur G. MOUGIN, que je remercie très vivement.

Je remercie aussi :

- le personnel de l'Institut Dolomieu et en particulier Madame C. ROBERT, qui a fait l'impossible pour me procurer une documentation difficile à obtenir,
- les membres du Sudan Geological Survey Department et du Laboratoire de Géologie de Khartoum, pour leur accueil et leur aide sur le terrain,
- la population locale dont l'hospitalité et le verre de thé réparateur font oublier l'aridité du climat.

## AVERTISSEMENT

Dans les pages qui vont suivre, nous emploierons souvent des termes anglais et arabes car, bien que possédant parfois des équivalents français, ils sont très couramment utilisés au Soudan.

## S U M M A R Y

The Upper Atbara Project requires the erection of an important hydro-power and irrigation complex, at the Atbara-Setit confluence, in the East-Central Sudan.

The area studied covers about 450 km<sup>2</sup> and includes the village of Es Showak (lat. 14°23'N, long. 35°51'E).

The most striking geomorphological feature of the area is the extensive "Cotton-soil" (dark tropical clay) plateau, under which the following formations appear, when approaching the rivers :

- . the "Karab", eroded, non-cemented, silty soil ;
- . the Gedaref Sandstone Formation, fractured, and injected by basaltic dykes.

The Jebel Aklayit, a low-level granitic inselberg, overlooks the plateau.

The researches carried out deal with the geology of the whole area, and with the project's civil-engineering geology.

The main conclusions of the study of the regional geology follow :

- . the Jebel Aklayit represents the Precambrian "Basement Complex" ;
- . the Gedaref Sandstone Formation consists of coastal deltaic deposits, spread on a flat surface, under a tropical climate. Angiosperms silicified woods were found ; they indicate an Upper Cretaceous age (post-Albian). Therefore, the Gedaref Sandstone Formation may be interpreted as an eastern tongue of the Nubian Sandstone Formation, towards the Ethiopian border ;
- . the tertiary basalts are represented by :
  - a basanite-type series ( $\approx$  crinanite), Burdigalian in age (21 millions of years by K-Ar) ;
  - a basaltic-type series, Pontian in age (10 millions of years by K-Ar) ;
- . the "Karab" yielded fossils (genus Etheria) which indicate a Pleistocene age ;
- . the "Cotton-soil" is regarded as Upper Pleistocene.

An account of field investigations and of experiments carried out on the different building materials completes the detailed study of the Rumela dam site on the Atbara river, and of the Burdana dam site on the Setit river. These data determine the type of dam to be considered (embankment dam) as well as the design of the project.

The surficial soils are classified through soils analyses, and their potential farming use is assessed.

As a conclusion, this civil engineering project emphasizes the fact that basic geologic studies can markedly improve upon inconclusive geotechnical studies.

## SOMMAIRE

AVERTISSEMENT	
RESUME	
INTRODUCTION	1
<u>PREMIERE PARTIE : LE SOUDAN CADRE GENERAL</u>	5
1. GEOGRAPHIE	7
1.1 Climatologie	9
1.2 Hydrologie	9
1.3 Activité humaine - Economie	10
2. GEOLOGIE GENERALE	11
2.1 Précambrien	13
2.2 Mésozoïque	13
2.21 Formation des Grès de Gedaref	15
2.22 Les Grès de Nubie	15
2.3 Tertiaire	17
2.4 Pléistocène et formations récentes	17
2.41 Pléistocène	19
2.42 Pléistocène et formations récentes	19
<u>DEUXIEME PARTIE : PROJET D'AMENAGEMENT DU COURS SUPERIEUR DE L'ATBARA</u>	21
3. CADRE GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE ETUDIEE ET OBJET DE L'AMENAGE- MENT	23
3.1 Cadre géographique	25
3.11 Climatologie	25
3.12 L'évapotranspiration	28
3.13 La végétation	30
3.2 Impact économique et humain	31
4. GEOLOGIE REGIONALE	33
4.1 Lithologie - Stratigraphie	35



7.15	Conclusion	135
7.2	Les matériaux de construction : gisements et cubatures	135
7.21	Le Cotton-soil	136
7.22	Le Karab	136
7.23	Les matériaux graveleux	136
7.231	En bordure de l'Atbara	136
7.232	En bordure de la Setit	137
7.233	Conclusions	137
7.24	Les alluvions du lit des rivières	138
7.25	Matériaux d'enrochements	138
	<b>8. CARACTERISTIQUES DES OUVRAGES</b>	<b>139</b>
8.1	Choix du type de barrage	141
8.11	Qualités géotechniques des fondations	141
8.12	Etanchéité	141
8.13	Recherche des matériaux de construction	142
8.14	Type de barrage	142
8.2	Caractéristiques des barrages	142
8.21	Le barrage de BURDANA	143
8.211	Conception du barrage	143
8.212	Evacuateurs de crues	143
8.22	Le barrage de RUMELA	146
8.221	Conception du barrage	146
8.222	Evacuateurs de crues	146
8.23	Les digues	148
8.231	Reconnaitances effectuées	148
8.232	Conception des digues	148
8.3	Les réservoirs	150
8.31	Les possibilités de fuites	150
8.32	L'ensablement	151
8.33	Stabilité des rives	152
	<b>9. PEDOLOGIE</b>	<b>153</b>
9.1	Analyses chimiques	155

9.11	Le Cotton-soil	156
9.12	Le Karab	157
9.2	Utilisation agricole	158
9.21	Le Cotton-soil	158
9.22	Le Karab	160

CONCLUSION	161
------------	-----

ANNEXES	167
---------	-----

1.	Données climatiques : Gedaref (1941-1970)	169
2.	Données climatiques : Es-Showak (mai-décembre 1973)	170
3.	Données climatiques : Es-Showak (1974)	171
4.	Répartition journalière des précipitations : Es-Showak	172
5.	Liste des échantillons étudiés et localisation des fossiles	173
6.	Méthodes d'analyses sédimentologiques	176
7.	Apport mensuel des rivières	180

PHOTOGRAPHIES	181
---------------	-----

BIBLIOGRAPHIE	195
---------------	-----

## LISTE DES FIGURES

1.	Carte géologique du Soudan	12
2.	Tableau de corrélation des formations paléozoïques et mésozoïques d'Ethiopie, du Soudan et d'Egypte	14
3.	Tableau de corrélation des formations tertiaires du Soudan	16
4.	Sols et dépôts superficiels du Soudan	18
5.	Localisation de la région étudiée	24
6.	Diagrammes ombrothermiques des stations d'Es Showak et de Gedaref	26
7.	Evaporation et pluviométrie (Gedaref)	27
8 et 8 bis.	Cartes d'affleurements : Burdana et Rumela	36 et 37
9.	Coupe schématique des différents terrains	38
10.	Coupe synthétique des Grès de Gedaref dans la région d'Es Showak	42
11.	Granulométrie des grès et mudstones	45
12.	Répartition mondiale des sols argileux foncés des régions tropicales et subtropicales	66
13.	Schéma des différentes phases tectoniques	69
14.	Evolution géologique de la région. Formation d'une vallée épigénique	70
15.	Localisation des sites	74
16.	Carte géologique du site de Burdana	76
17.	Site de Burdana : localisation des coupes et des sondages	77
18.	Coupe de référence de la série de Burdana (rive droite)	79
19.	Burdana : zone d'effondrement aval localisation des profils géophysiques	83
20.	Burdana : zone d'effondrement aval profils géophysiques	84
21.	Burdana : coupe géologique de la rive droite	86
22.	Burdana : coupe géologique de la rive gauche	88
23.	Burdana : profil géologique suivant l'axe du barrage	89
24.	Diagrammes de répartition des différentes fractures	91

25. Carte géologique du site de Rumela	93
26. Site de Rumela : localisation des coupes et des sondages	94
27. Coupe de référence de la série de Rumela (rive gauche)	96
28. Rumela rive gauche : variations d'épaisseur et de faciès de la série	98
29. Rumela rive droite : variations d'épaisseur et de faciès de la série	99
30. Coupe géologique du site de Rumela	106
31. Rumela : coupe géologique de la rive gauche	107
32. Rumela : panorama de la rive droite	109
33. Rumela : coupe géologique au milieu de la rivière	111
34. Interprétation de la géologie de la Fashaga	113
35. Fuseaux granulométriques des formations superficielles	126
36. Diagramme de plasticité	127
37. Analyse des minéraux argileux aux rayons X	130
38. Coupe schématique du barrage de Burdana	144
39. Plan schématique du barrage de Burdana	145
40. Emplacement des évacuateurs de crues	147
41. Reconnaissance du tracé des digues	149
42. Importance de la texture du sol et de la pluviométrie sur la répartition des Acacias et des espèces à feuilles caduques au Soudan	159

INTRODUCTION

Le projet d'aménagement du cours supérieur de l'Atbara a pour objectif la mise en valeur des terres de la région d'Es Showak, au confluent des rivières Atbara et Setit, afin d'assurer le développement économique de cette région du Centre-Est du Soudan.

En effet, la construction d'un ouvrage hydraulique important en amont du confluent permet, en bénéficiant de conditions topographiques favorables, l'irrigation des terres fertiles (Cotton-soil) à l'aval d'Es Showak et les nouveaux périmètres ainsi créés s'étendront jusqu'aux périmètres déjà existants de Khashm El Girba.

L'ouvrage hydraulique prévu est constitué par deux barrages (Rumela sur l'Atbara, Burdana sur la Setit) (1) reliés par une digue centrale.

L'objet de ma mission sur le terrain (Octobre 73 - Juin 74) concernait la cartographie de ces sites de barrage, la recherche de matériaux de construction et la surveillance des travaux de reconnaissance.

Par ailleurs, cette région n'avait jamais fait l'objet d'une étude détaillée.

C'est pourquoi, une fois les levés géologiques nécessaires au projet (sites, zones d'emprunt) terminés, et tout en continuant à superviser l'évolution des investigations, j'ai entrepris d'étudier la géologie de ce secteur.

Cependant, avant d'entrer dans le détail de la géologie régionale et de celle du projet, abordées dans la deuxième partie de ce mémoire, il m'a semblé nécessaire de rappeler très succinctement, dans la première partie, les grands traits géographiques et géologiques du Soudan.

---

(1) Rumela : prononcer Rouméla.  
Burdana : prononcer Bourdana.

PREMIERE PARTIE

LE SOUDAN : CADRE GENERAL

# CHAPITRE 1

## GEOGRAPHIE

- 1.1 Climatologie
- 1.2 Hydrologie
- 1.3 Activité humaine  
Economie

La République Démocratique du Soudan (2.505.813 km<sup>2</sup>, 16.7 millions d'habitants) est le plus vaste des pays africains.

Divisée en 9 provinces, elle s'étend entre les latitudes 3°53' N et 21°55' N et les longitudes 21°54' E et 38°30' E et a des frontières communes avec 8 pays.

Sa structure est celle d'une vaste plaine (47 % de la superficie présentent une altitude inférieure à 500 m) drainée par le Nil et ses affluents, dont la monotonie n'est rompue que par de rares massifs montagneux : les Monts Nuba (1450 m) au Centre-Ouest, les Montagnes de la Mer Rouge (2531 m) à l'Est et le massif volcanique du Jebel Marra (3088 m) à l'Ouest.

### 1.1 CLIMATOLOGIE

Le Soudan possède un climat de type tropical ; le Nord du Soudan est un désert, alors que les confins méridionaux jouxtent la forêt équatoriale.

Dans le Centre, le climat tropical est influencé par les moussons venant de l'Océan Indien. Deux saisons s'individualisent nettement : la saison sèche d'octobre à avril, la saison des pluies de mai à fin septembre.

### 1.2 HYDROLOGIE

Le Nil Blanc et le Nil Bleu confluent à Khartoum et forment le Nil qui, après avoir reçu l'Atbara, pénètre en Egypte.

Le Nil Blanc prend sa source au Lac Victoria, en Ouganda, et après son entrée au Soudan se perd dans les étendues marécageuses du Sud qui ralentissent son allure et le stabilisent. A Khartoum, son régime est régulier et à peu près constant au cours de l'année (80 millions de m<sup>3</sup>/jour en moyenne).

C'est le Nil Bleu qui, en prenant sa source au Lac Tana (Ethiopie), fournit au Nil sa crue annuelle qui fertilisait l'Egypte avant la construction du grand barrage d'Assouan. Cette crue a lieu de juillet à fin octobre et à la fin août, le débit moyen de crue du Nil Bleu atteint 500 millions de m<sup>3</sup>/jour.

Descendant des montagnes avec force, il fait oublier qu'en saison sèche, son débit est le plus faible (30 millions de m<sup>3</sup>/jour).

Le régime de l'Atbara est identique à celui du Nil Bleu car cette rivière prend également sa source en Ethiopie. A la

fin août, à Atbara, son débit de crue atteint 150 millions de m<sup>3</sup>/jour.

### 1.3 ACTIVITE HUMAINE - ECONOMIE

Le secteur primaire (agriculture, élevage, pêche et activités forestières) emploie 85 % de la population active et occupe donc une place prépondérante dans l'économie soudanaise.

Le sous-sol ne recèle aucun minerai ni aucun gisement minier important permettant une exploitation industrielle.

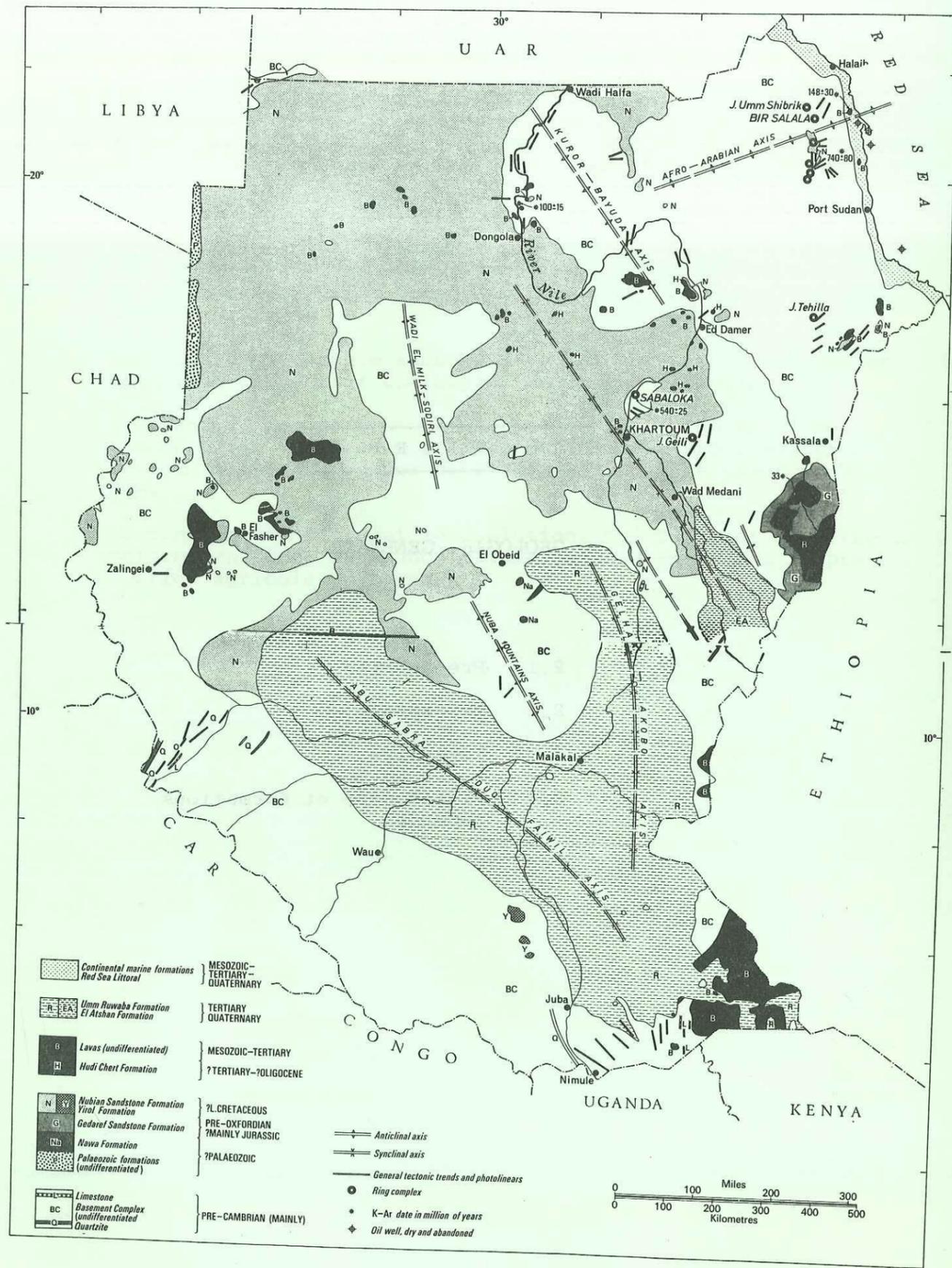
L'essentiel des ressources du pays est donc constitué par les récoltes : le coton représente 60 % des exportations et le Soudan est le premier producteur mondial de gomme arabique.

Le problème de l'eau et les solutions qui lui sont apportées, déterminent donc en grande partie la physionomie et la production agricole du pays.

## CHAPITRE 2

### GEOLOGIE GENERALE

- 2.1 Précambrien
- 2.2 Mésozoïque
- 2.3 Tertiaire
- 2.4 Pléistocène et formations récentes



La géologie du Soudan est peu connue, cependant le lecteur pourra se référer à l'excellent ouvrage de A.J. WHITEMAN (1971 b) qui contient de précieuses et récentes informations concernant la géologie de ce pays (Fig. 1, p. 12).

Le Soudan s'étend sur la zone de contact de deux grandes zones structurales africaines :

- à l'Est et au Sud, la vieille plateforme précambrienne, émergée depuis le Paléozoïque, représentée par ce que l'on nomme communément le Basement Complex ou Complexe de base ;
- à l'Ouest et au Nord, un bassin sédimentaire qui s'est établi depuis le Mésozoïque, dans lequel se sont déposés les "Grès de Nubie" et qui fut perturbé au Tertiaire par les intrusions basaltiques et les failles consécutives au soulèvement du plateau éthiopien et à l'ouverture de la Mer Rouge.

Les rapports de ces deux unités permettent de reconstituer l'histoire géologique du pays comme suit :

### 2.1 PRECAMBRIEN

Le Basement Complex, principalement constitué de roches métamorphiques et ignées (gneiss, schistes, granites orientés, granites sodiques, etc.), a une extension considérable : 49 % de la superficie totale.

Il présente par endroits, des structures particulières : les "Ring Complex".

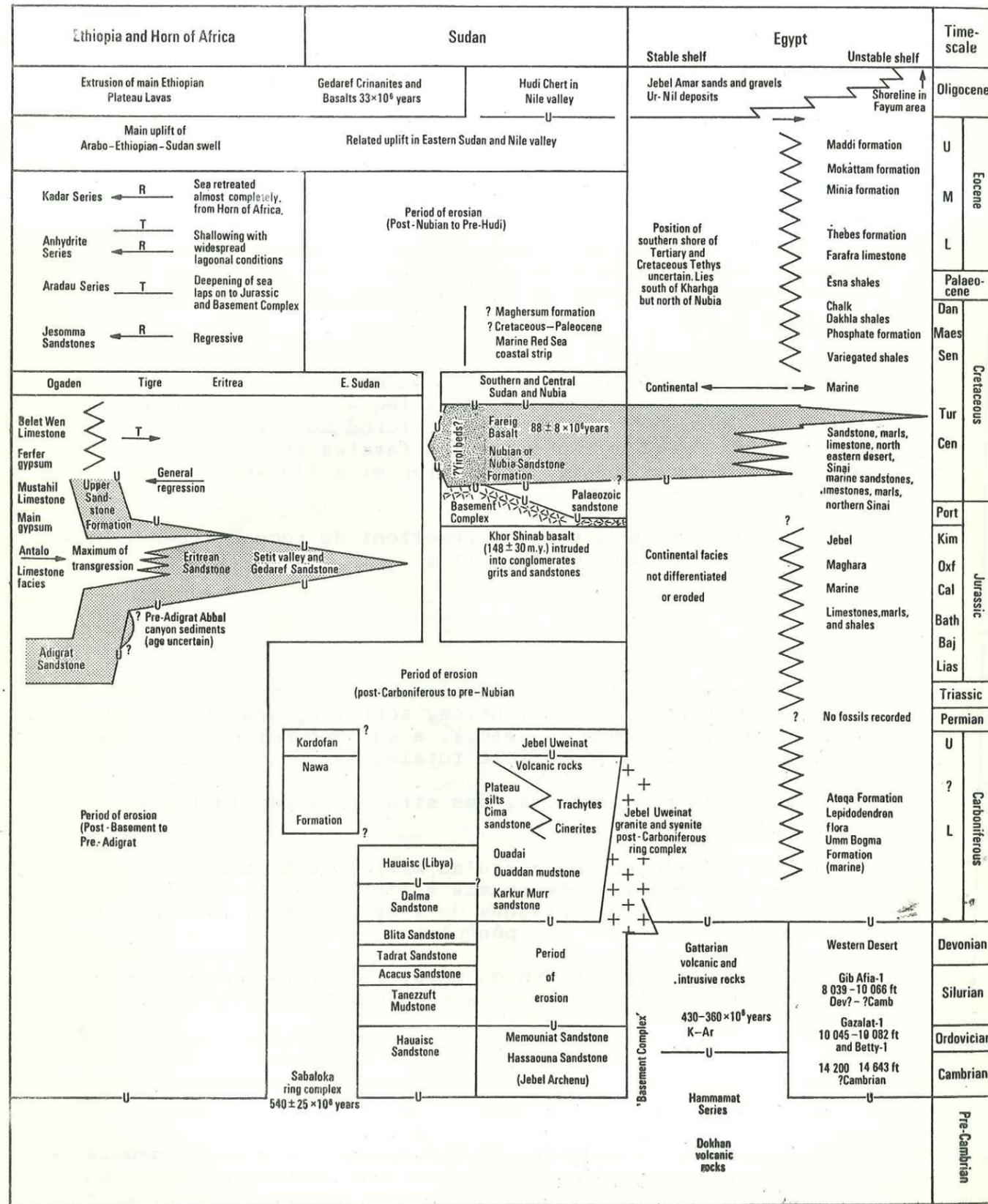
Depuis le Précambrien jusqu'au milieu du Secondaire, le Basement Complex a été soumis à l'érosion et, à part les Monts Nuba et les Montagnes de l'extrême Sud, le reste du pays a été réduit à une pénéplaine.

Dans le Centre et le Sud du pays, il est recouvert par les séries de remplissage tertiaire d'Umm Ruwaba (graviers, sables).

### 2.2 MESOZOÏQUE (Fig. 2, p. 14)

Au milieu du Secondaire, la mer envahit la région, depuis le Sahara jusqu'à l'Arabie Séoudite. Des conditions marines s'installent en Egypte et dans le Nord du Soudan, mais elles deviennent plus saumâtres au fur et à mesure que l'on descend vers le Sud.

Fig. 1 Carte géologique du Soudan  
d'après A.J. WHITEMAN



Au Soudan, le Mésozoïque est représenté par deux formations détritiques qui recouvrent le Basement Complex érodé :

- . la Formation des Grès de Gedaref (1) ;
- . les Grès de Nubie.

2.21 LA FORMATION DES GRES DE GEDAREF (GEDAREF SANDSTONE FORMATION)

A.J. WHITEMAN (1971 b) distingue à la suite de G. ANDREW (1948) et de B.P. RUXTON (1956), une formation des "Grès de Gedaref" qui présente de nombreux points communs avec les Grès de Nubie mais d'âge jurassique selon lui.

Aucun fossile n'ayant été recueilli au Soudan jusqu'à cette étude, l'âge jurassique lui était attribué par analogie avec la série éthiopienne. En effet, les Grès de Gédaref, dont l'épaisseur atteint 130 m aux environs de Gedaref, passent latéralement aux grès de la vallée de la Setit puis, en Ethiopie, aux grès d'Adigrat qui, finalement, passent sous les calcaires d'Antalo datés de l'Oxfordien (Jurassique supérieur).

2.22 LES GRES DE NUBIE (NUBIAN SANDSTONE FORMATION)

Cette série détritique est la plus importante formation secondaire du Soudan.

Elle est constituée principalement de dépôts horizontaux de grès avec parfois alternances de silstones ou d'argilites (mudstones).

Son épaisseur varie beaucoup : de 90 à 180 m dans le Nord (Jebel Uweinat), elle peut atteindre 465 m environ aux alentours de Khartoum.

Par leur épaisseur, leur extension et leur perméabilité favorable, ces grès représentent la grande formation aquifère du pays.

Les quelques fossiles rencontrés permettent de leur attribuer un âge Crétacé, mais les bois fossiles, que l'on trouve en quantité, se révèlent malheureusement peu utiles pour une détermination stratigraphique exacte.

(1) Prononcer : Guédaref.

Fig. 2 Tableau de corrélation des formations paléozoïques et mésozoïques d'Ethiopie, du Soudan et d'Egypte

d'après A.J. WHITEMAN

2.3 TERTIAIRE (Fig. 3, p.16)

A l'Eocène, la mer se retire et, entre Khartoum et Berber, se déposent à l'Oligocène, des sédiments d'eau douce connus sous le nom de "Hudi Chert".

A la même époque, les premiers mouvements orogéniques éthiopiens se font sentir au Soudan et sont accompagnés de failles et d'intrusions basaltiques entre Gallabat, Gedaref et Kassala. Ces intrusions se présentent sous forme de dykes de basaltes doléritiques ou d'épanchements de crinanites (basanites analcimifères). La datation absolue (K-Ar), effectuée sur un échantillon de basalte de la région de Gedaref, a permis de confirmer l'âge Oligocène (33 millions d'années) de ces intrusions (A.J. WHITEMAN - 1971 b).

L'amplitude du soulèvement éthiopien a été importante. D'après P.A. MOHR (1971), elle aurait atteint 2.800 m au Mt Soira, dans le Sud de l'Erythrée, 1.500 m dans la vallée du Gash, 800 m dans la vallée de la Setit et 600 m au Nord du Lac Tana.

Au Miocène moyen, une dépression se creusant lentement dans la région du Nil Blanc, permet le dépôt des séries graveleuses et sableuses d'Umm Ruwaba, en discordance sur le Basement Complex érodé. Ces séries sableuses sont aquifères.

A la fin du Miocène et au Pliocène, d'importants épanchements basaltiques ont lieu également :

- dans l'Ouest (Darfur), où ils constituent le massif volcanique du Jebel Marra ;
- dans le Nord, près d'Omdurman, Atbara et Dongola.

En bordure de la Mer Rouge, le relèvement de la bordure continentale a fait apparaître des terrasses argileuses à coquillages datant du Plio-Pléistocène.

2.4 PLEISTOCENE ET FORMATIONS RECENTES (Fig. 4, p. 18)

L'ère quaternaire a été le témoin de la poursuite de processus d'érosion consistant en l'aplanissement des volcans, à l'Ouest, la réduction de surface des pointements basaltiques, à l'Est, et au dépôt d'importantes masses de sable et d'argile qui masquent les séries sous-jacentes.

Nile Valley		Areas east and west of Nile		Red Sea		Littoral		Regional tectonic history		Time-scale	
Integration of Nile drainage		Formation of Jebel Marra, Melit, Medob, Nakhara, and Bayuda volcanic rocks. Lateite formation age uncertain (Oligocene-Miocene?)		Older terrace gravels Khor Eit		Abu Shagara Formation? Quaternary fauna		Nile Valley etc.		Pleistocene	
Umm Ruwaba Formation and El-Ashhan Formation		Lacustrine and riverain clays and sands, with fossil fish, pigs' teeth etc. Proto-Nile deposits derived from Ethiopian volcanic Plateau and East African and Nile Congo divide		Pleistocene beds Khor Eit?		A member Salt anhydrite interbedded with clays 34 metres		Subsidence in the Umm Ruwaba and El-Ashhan depressions		Pliocene	
Hudi Chert with Oligocene mollican fauna deposits. In an extensive lake in proto-Nile valley		Gedaref erosion surface intrusion of Gedaref crinanites and basalts. 33x10 <sup>6</sup> years K-Ar		Dungana Formation (post-mit. Miocene unfossiliferous)		B member Gypsum interbedded with clays 34 metres		Tertiary volcanic rocks formed at scattered localities in Sudan		Miocene	
No deposits. Pre-Hudi and Gedaref basalt time predominantly a period of erosion. Marine conditions extended approximately as far south as Aswan and as far west as Aden and Somalia Formation of Late Cretaceous—Early Tertiary Sherid and Togni surfaces		Majharum Formation (A=mid. Miocene—Holsteinian)		Abu Inama formation (mid. Miocene—Tortonian)		A member Red limestone 82 metres		Downwarping and downfaulting along eastern margin of Ethiopian plateau?		Middle Miocene	
		Hamamt Formation (Lower Miocene to? Eocene)		C member Conglomerates of igneous rocks and sandstone 50 metres		C member Gypsum anhydrite with sandstones and shales 859 metres		Gedaref area Tertiary erosion in Sudan to south; local conditions poorly developed in Egypt		? Miocene	
		Makawwa Formation (marine) 130 metres		A member 658 metres		A member 658 metres		Climax of Rift Phase 2: separation and formation of Red Sea central trough; separation approx. 80 km		? Miocene	
		190 metres uppermost Cretaceous or Palaeocene		B member Calcareite 25 metres		B member Calcareite 25 metres		Extrusion of main Ethiopian plateau lavas from fissures and vents		? Miocene	
				C member Rock salt anhydrite and marls 465 metres		C member Rock salt anhydrite and marls 465 metres		Main uplift of Arabo-Ethiopian-Sudan swell and formation of Phase 1: separation 130-170 km		? Eocene	
								Regression of sea. Volcanicity started as early as 69-10 <sup>6</sup> years ago. Abba basalts		? Eocene	
								Magharum A member may well be Lower Miocene (Magharum) (Whitman and Bell 1951)		? Eocene	
										? Palaeocene	
										? Cretaceous	

Fig. 3 Tableau de corrélation des formations tertiaires du Soudan d'après A.J. WHITEMAN

2.41 PLEISTOCENE

- Dans l'Ouest soudanais, dans le Darfur et le Kordofan, les limites du désert s'étendent loin au Sud et le "Qoz" (importants dépôts sableux d'origine éolienne) s'installe. L'origine de ce dernier se trouve souvent très au Nord, là où existent de vastes massifs de Grès de Nubie dont la décomposition a donné des sables qui ont été poussés ensuite vers le Sud, par les vents.
- Dans le Sud-Ouest du pays, l'altération latéritique du Basement Complex engendre la formation de dépôts ferrugineux et des limons rouges d'Equatoria.

2.42 PLEISTOCENE ET FORMATIONS RECENTES

Les formations pléistocènes et récentes sont difficiles à séparer et à corréliser en raison de la rareté des fossiles caractéristiques.

Le Karab (ou Kerrib)

Dans l'Est Soudanais, en amont de Khashm El Girba, en bordure des rivières Atbara et Setit, existent des dépôts silteux très ravinés appelés Karab et provenant des épandages deltaïques Pléistocène du système des rivières Gash-Atbara.

Actuellement les crues du Gash et de la Baraka alimentent toujours leurs deltas en matériel sableux ou silteux venant de l'érosion des reliefs éthiopiens.

Le Cotton soil (Badob)

Dans le Centre, le Sud et l'Est du Soudan, le matériel arraché par le Nil Bleu aux montagnes éthiopiennes, et par le Nil Blanc aux montagnes centrafricaines, remplit la cuvette de la vallée du Nil et constitue les grandes plaines argileuses du Soudan. Ces plaines argileuses sont sans conteste le trait le plus caractéristique de la géomorphologie du pays et sont généralement dénommées "Gezira clay", "Dark cracking clay" ou plus simplement "Cotton-soil".

Dans l'Est, le Cotton-soil est, par endroits, enrichi par les argiles éluviales dues à l'érosion et au lessivage des pointements basaltiques.

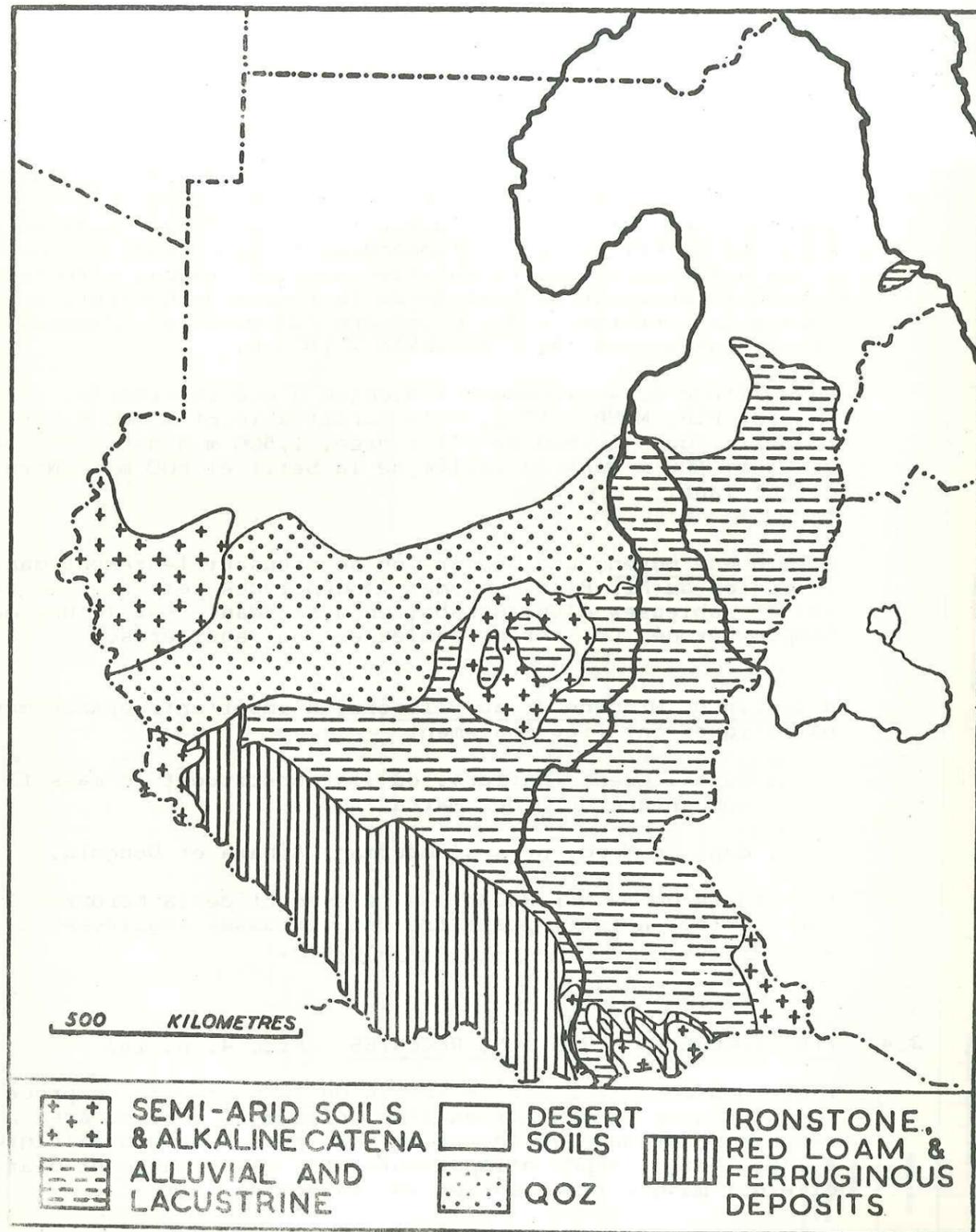


Fig. 4 Sols et dépôts superficiels du Soudan

d'après K.M. BARBOUR

Les terrasses

Les variations récentes (Holocène) du niveau du Nil Bleu, de l'Atbara et du Nil en aval de Khartoum ont formé des terrasses graveleuses sur lesquelles des sites préhistoriques ont été retrouvés.

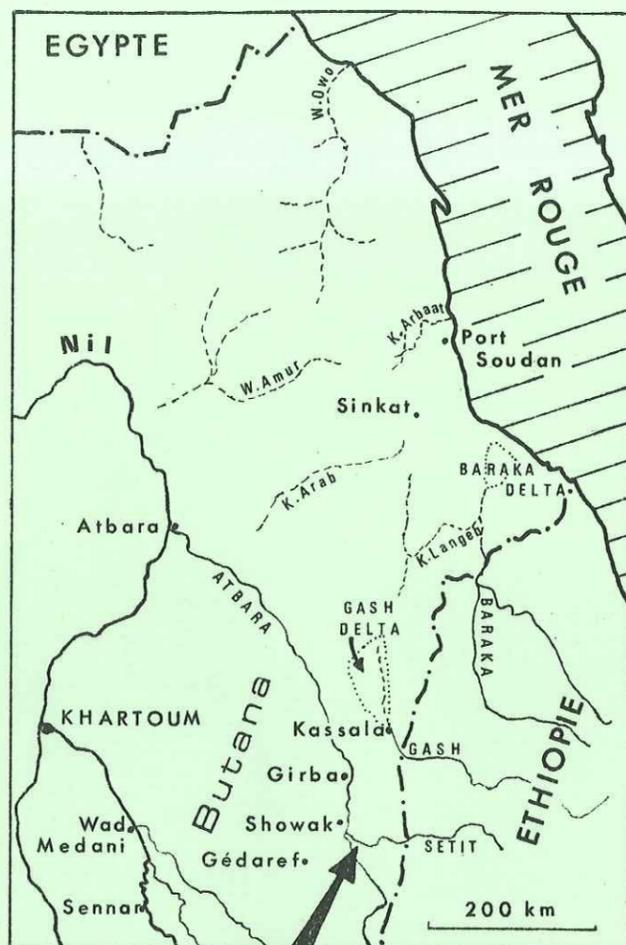
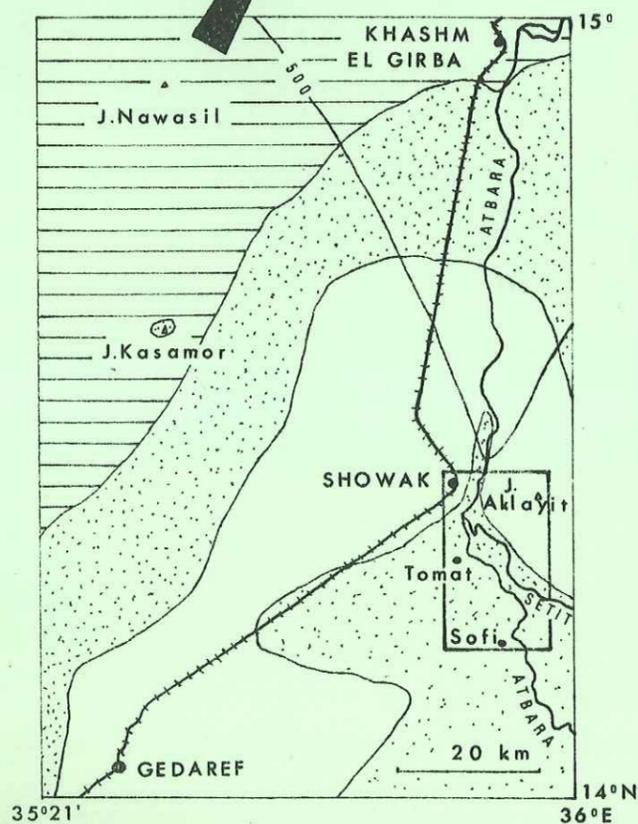
DEUXIEME PARTIE

PROJET D'AMENAGEMENT  
DU COURS SUPERIEUR DE L'ATBARA

## CHAPITRE 3

### CADRE GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE ETUDIEE ET OBJET DE L'AMENAGEMENT

- 3.1 Cadre géographique
- 3.2 Impact économique  
et humain

Région Est  
du SOUDANLocalisation  
de la région  
étudiée

-  Basalte
-  Formation de Gédaref
-  Basement Complex
-  Région étudiée

La zone étudiée (Fig. 5, p.24) est située au confluent de l'Atbara et de la Setit, rivières sur lesquelles un aménagement hydraulique est prévu.

Cet aménagement est constitué par le complexe des barrages de Rumela, sur l'Atbara, et Burdana, sur la Setit, reliés par une digue centrale.

Il doit permettre l'irrigation de 400.000 à 500.000 feddans (1) situés en rive droite et en rive gauche de l'Atbara et la production de 80 millions de kWh.

Précisons que les chiffres se rapportant à l'irrigation et à l'énergie sont basés sur des données pouvant faire l'objet de rectifications.

## 3.1 CADRE GEOGRAPHIQUE

L'Atbara et la Setit entaillent un vaste plateau argileux (Cotton-soil) dont l'altitude moyenne varie de 510 à 520 m. Un seul accident morphologique domine cette étendue : le Jebel Aklayit, inselberg de granite culminant à 650 m environ.

La région étudiée couvre approximativement 450 km<sup>2</sup>.

## 3.11 CLIMATOLOGIE

N. CHIALVO (1975) a bien analysé les différents éléments du climat de cette région et je me bornerai à indiquer les traits principaux de celui-ci.

Cependant, j'ai cru utile de disposer en annexe (1, 2, 3, 4) les données statistiques dont nous disposons. Elles nous ont été fournies par le "Sudan Meteorological Department" et concernent les localités d'Es Showak et de Gedaref, distantes de soixante kilomètres.

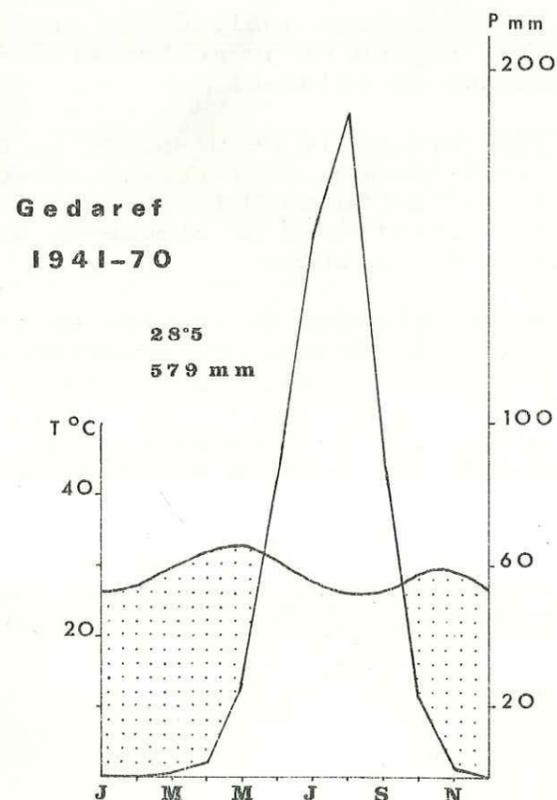
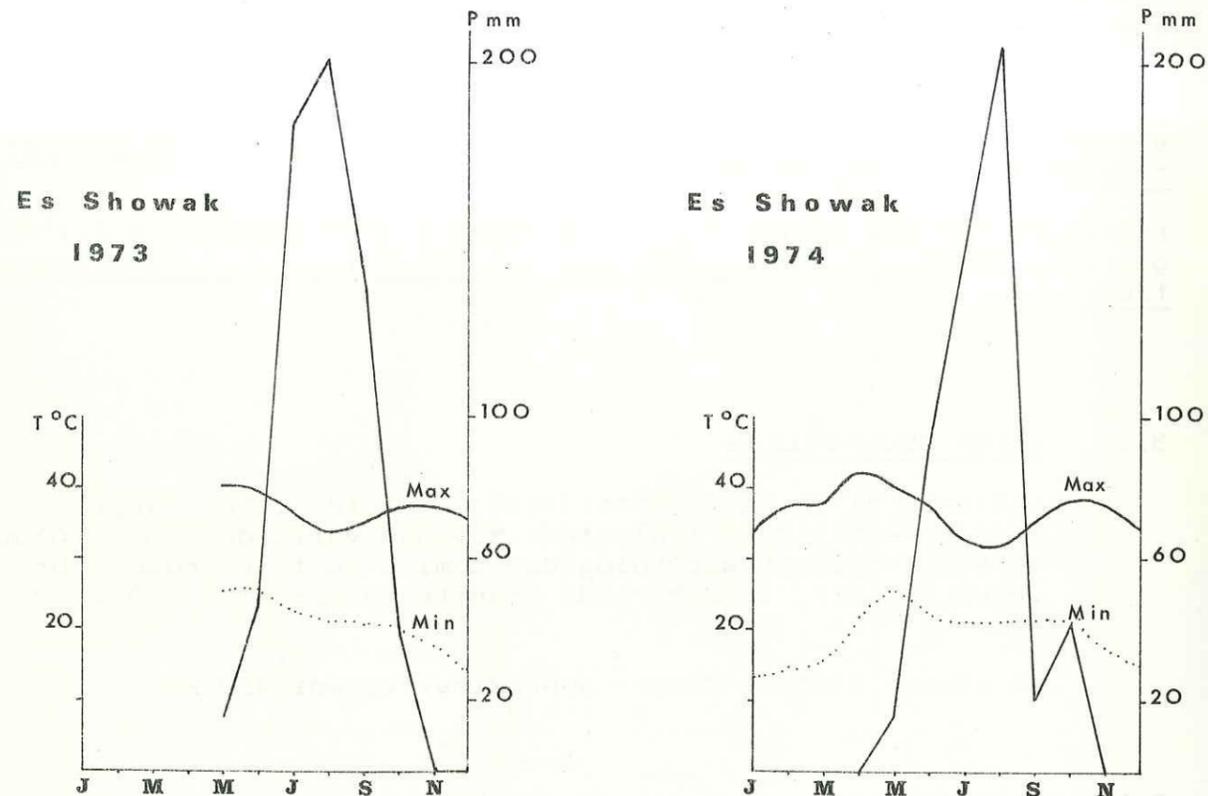
La station météorologique de Gedaref existe depuis 1941 alors que celle d'Es Showak, de création récente, ne peut fournir de données que depuis mai 1973.

Nous ne disposons que de données moyennes, insuffisantes et assez approximatives, sauf en ce qui concerne la pluviométrie.

Le climat est de type sahélo-soudanien (S.O) pour A. AUBREVILLE (1949), ou appartient, selon Ch. P. PEGUY (1970)

(1) 1 feddan = 0,4 hectare.

## DIAGRAMMES OMBROTHERMIQUES



à la région semi-aride et plus précisément, à la marge aride du climat tropical (F.E.).

La saison des pluies s'étend du mois de mai au mois d'octobre (les mois de juillet et d'août étant les plus arrosés) et la pluviométrie moyenne avoisine 580 mm.

En général, la température est élevée, la moyenne annuelle étant de 28°5 à Gedaref.

La représentation des courbes des régimes thermiques et pluviométriques sur un même graphique, en adoptant une échelle double pour les précipitations, permet d'obtenir les "diagrammes ombrothermiques de Gaussen". Avec cette convention graphique, toute période durant laquelle les précipitations sont inférieures à deux fois la température, c'est-à-dire lorsque la courbe des précipitations passe sous la courbe des températures, est considérée comme une période sèche.

Les diagrammes ombrothermiques (Fig. 6, p. 26) des stations d'Es Showak et de Gedaref montrent :

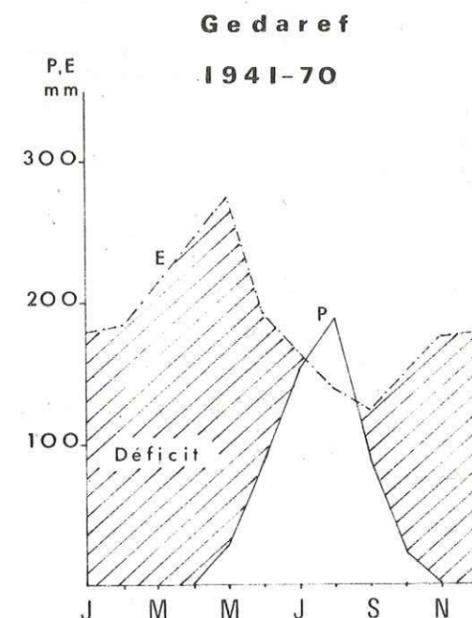
- . une période sèche hivernale et une période humide estivale ;
- . le caractère bimodal des courbes thermiques.

L'évaporation atteint 2.000 mm par an et seuls les mois de juillet, août et septembre ont une pluviométrie supérieure à l'évaporation (Fig. 7, p. 27).

Les mesures de ce facteur représentent la valeur de l'évaporation d'un plan d'eau (valeur de Piche x 0,5), et ne tiennent aucun compte des réserves du sol (nappe phréatique). Elles expriment donc, en fait, l'évaporation potentielle.

## 7

Evaporation  
et pluviométrie



3.12 L'EVAPOTRANSPIRATION

Si l'évaporation a fait l'objet de mesures, nous n'avons trouvé aucune évaluation de l'évapotranspiration au Soudan.

Nous avons essayé de calculer l'évapotranspiration réelle par les formules de TURC et de COUTAGNE, et l'évapotranspiration potentielle mensuelle par la formule de THORNTHWAITE.

Ces formules sont généralement employées dans les régions soumises à un climat tempéré, où la couverture végétale est nettement plus dense que celle de la région d'Es Showak.

Cependant, l'application de ces formules dans une zone aride d'Iran (M. ZAMAN KHAN, 1975) a donné d'assez bons résultats et, c'est pourquoi, forte de ce précédent, nous avons essayé d'évaluer l'évapotranspiration dans notre région.

Toutefois, nous devons faire des réserves quant à la valeur des résultats obtenus car l'application des formules ne tient aucun compte du régime pluviométrique. En effet, la saison des pluies s'étend de mai à octobre et celles-ci tombent sous forme d'orages ou d'averses violentes qui engendrent un ruissellement important.

a. Méthode de TURC

Le calcul de l'évapotranspiration réelle est basé sur la température moyenne annuelle et la hauteur moyenne des précipitations annuelles :

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

P : Précipitation moyenne annuelle en mm  
T : Température moyenne annuelle en ° C  
L : 300 + 25 T + 0.05 T<sup>3</sup>

Gedaref : pour la période 1941-1970

P = 579 mm  
T = 28.5° C  
L = 2170 d'où Er = 588 mm

Es Showak

La station météorologique étant d'installation récente, la moyenne annuelle des températures n'est pas connue avec exactitude.

Il nous a paru plus raisonnable d'utiliser la moyenne annuelle de Gedaref.

- Pour l'année 1973 :

P = 619 mm  
T = 28.5° C  
L = 2170 d'où Er = 625 mm

- Pour l'année 1974 :

P = 526 mm  
T = 28.5° C  
L = 2170 d'où Er = 537 mm

b. Méthode de COUTAGNE

L'évapotranspiration réelle est calculée selon la formule :

$$Er = P - \lambda P^2$$

P : Précipitation moyenne annuelle en mm

$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14 T}$

T : Température moyenne annuelle en ° C

Cette formule n'est valable que pour les précipitations comprises entre  $\frac{1}{8}$  et  $\frac{1}{2}$  soit, dans notre région, entre

598 mm et 2392 mm. C'est-à-dire qu'elle n'est pas valable pour Gedaref et Es Showak pour l'année 1974.

Pour 1973, à Es Showak, l'application de la formule donne :

P = 619 mm  
T = 28.5° C  
 $\lambda = 0.209$  d'où Er = 0.611 m = 611 mm

c. Formule de THORNTHWAITE

Elle permet de calculer l'évapotranspiration potentielle.

$$Ep = 1.6 \left( 10 \frac{t}{I} \right)^\alpha$$

$I = \sum_{i=1}^{12} i$  ;  $\sum_{i=1}^{12} : \text{somme pour l'année ; } i = \left( \frac{t}{5} \right)^{0.514}$

$$\alpha = 0.49239 + 1792. 10^{-5} I - 771. 10^{-7} I^2 + 675. 10^{-9} I^3$$

(THORNTHWAITE)

ou

$$\alpha = \frac{1.6}{100} I + 0.5 \quad (\text{SERRA})$$

Ep = Evapotranspiration potentielle en cm  
I = Indice thermique annuel  
i = Indice thermique mensuel  
t = Température moyenne mensuelle en ° C

Pour une année moyenne correspondant à la période 1941-1970 (Gedaref) l'évapotranspiration potentielle annuelle est de 1740 mm.

#### d. Conclusion

La formule de COUTAGNE ne paraît pas très adaptée au calcul de l'évapotranspiration sous ce type de climat car ses limites d'application sont réduites.

Le seul résultat obtenu par cette méthode, concorde néanmoins avec ceux obtenus par la formule de TURC.

On peut d'ailleurs remarquer que dans tous les cas, la valeur de l'évapotranspiration réelle est à peu près égale à celle du total annuel des précipitations.

### 3.13 LA VEGETATION

Sous un climat semi-aride se développe une formation végétale appelée "Steppe épineuse à Acacia mellifera" (M.N. HARRISONN et J.K. JACKSON 1958).

Cette formation est constituée par plusieurs groupements dont la composition spécifique et la répartition sont étroitement liées à la nature lithologique du substrat (N. CHIALVO 1975).

Il est ainsi possible de reconnaître de très loin l'existence d'un affleurement gréseux ou limoneux par la présence d'un arbre ou d'un arbuste caractéristique de ce type de substrat, le facteur déterminant étant en effet la texture du sol.

Plusieurs groupements ont pu être distingués, en fonction de la répartition de certaines espèces arbustives:

- sur le Cotton-soil, le groupement à Acacia seyal (tahl), Acacia mellifera (kittir) et Dichrostachys glomerata (kedad) ;
- sur le Karab, la pelouse à Aristida piquetée d'arbustes ;
- sur les reliefs gréseux et granitiques, le groupement à Acacia senegal (hashab) et à Sterculia setigera (umm teleh) ;
- sur les terrasses limoneuses, le groupement à Ziziphus spina-Christi (nebeck) et à Acacia arabica (sunut).

Balanites aegyptiaca (higlig) et Capparis decidua (tundub) sont ubiquistes.

Nous avons mis entre parenthèses les noms soudanais de ces espèces caractéristiques, car ils pourraient se révéler utiles lors d'une étude sur le terrain.

### 3.2 IMPACT ECONOMIQUE ET HUMAIN

Le village d'Es Showak compte 7.000 habitants et dans le secteur étudié, on peut estimer la population à 15.000 habitants.

Les cultures se font sans irrigation et l'aménagement proposé aurait l'avantage de mettre en valeur les terres fertiles (Cotton-soil) qui bordent l'Atbara.

D'autre part, le nomadisme est important dans cette région qui constitue le seul point d'eau du Centre-Est, en saison sèche.

A longue échéance, le développement de l'agriculture doit entraîner la sédentarisation des tribus nomades.

CHAPITRE 4

GEOLOGIE REGIONALE

GEOGRAPHIE

4.1 Lithologie - Stratigraphie

4.2 Tectonique

4.3 Séismicité

Pour étudier la géologie régionale, nous avons utilisé la carte au 1/1.000.000 qui est ancienne et à une trop petite échelle.

D'autre part, nous avons dressé :

- . une carte du confluent Atbara-Setit au 1/40.000 ;
- . et des cartes au 1/7.100 concernant plus précisément la géologie des sites (Fig. 15, p.74 et 24, p.91 ).

Précisons qu'en raison du manque de carte topographique à grande échelle de la région, les levés ont été effectués sur des photographies aériennes agrandies.

Afin d'alléger le texte, la localisation des échantillons récoltés est donnée en annexe 5.

#### 4.1 LITHOLOGIE - STRATIGRAPHIE

Dans la région d'Es Showak, la géologie est simple.

On observe la succession stratigraphique suivante :

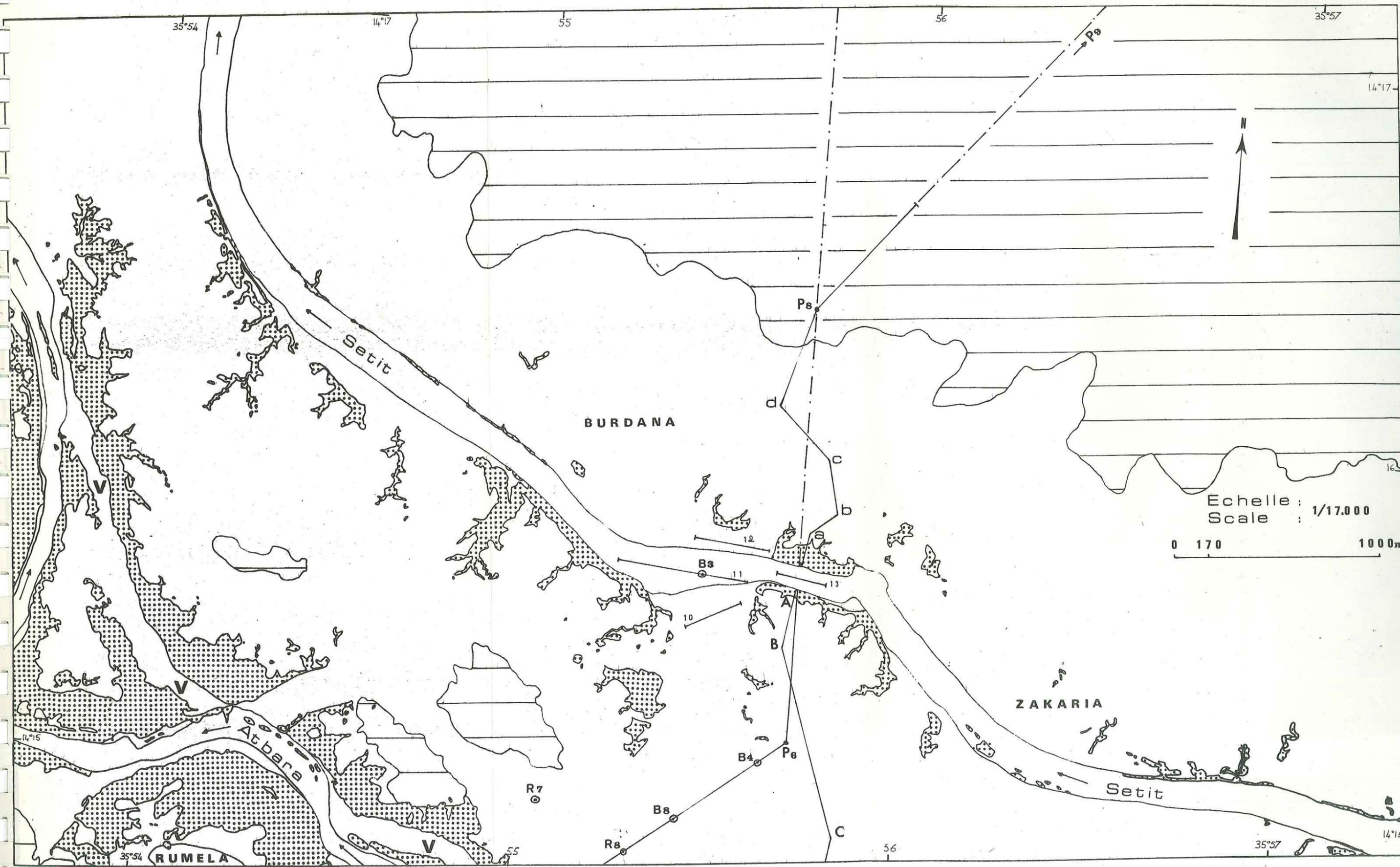
- . le Basement Complex ;
- . la formation détritique mésozoïque des Grès de Gedaref ;
- . les intrusions basaltiques tertiaires ;
- . les dépôts Pléistocène et récents du Karab, du Cotton-soil et des terrasses graveleuses.

Au niveau des rivières, seuls les grès et les formations superficielles apparaissent, ce que montrent bien les figures 8, p.36, 8 bis, p.37, et 9, p.38.

##### 4.11 LE BASEMENT COMPLEX

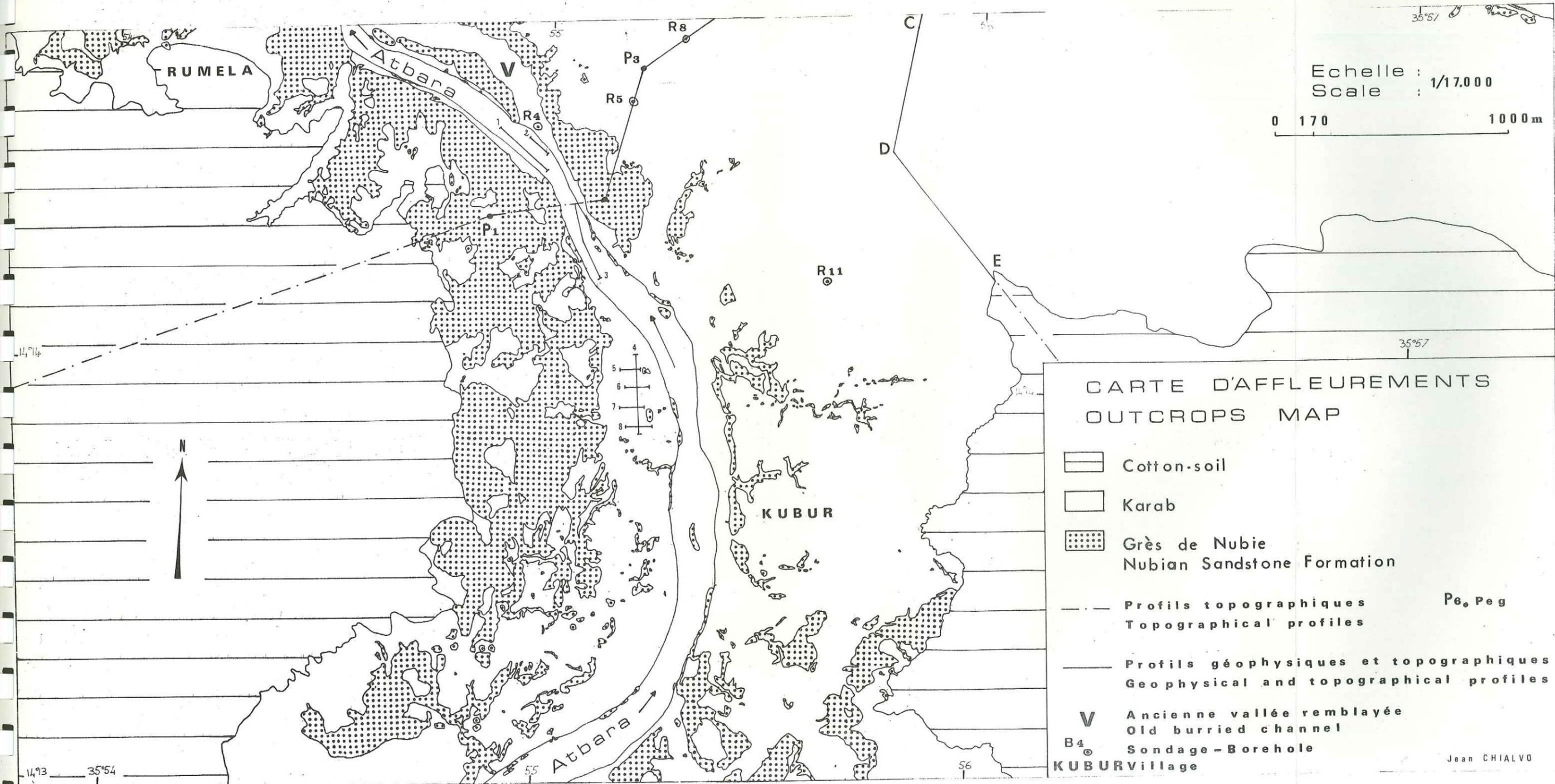
Il n'est représenté que par le Jebel Aklayit (14°24'N, 35°56'E), inselberg de granite situé en face d'Es Showak, en rive droite de l'Atbara.

Long de 4 km et large de 1.5 km environ, ce jebel est aligné selon la direction 140°-150° N qui est également l'orientation principale des diaclases.



Echelle : 1/17.000  
Scale : 1/17.000





Echelle : 1/17,000  
 Scale : 1/17,000

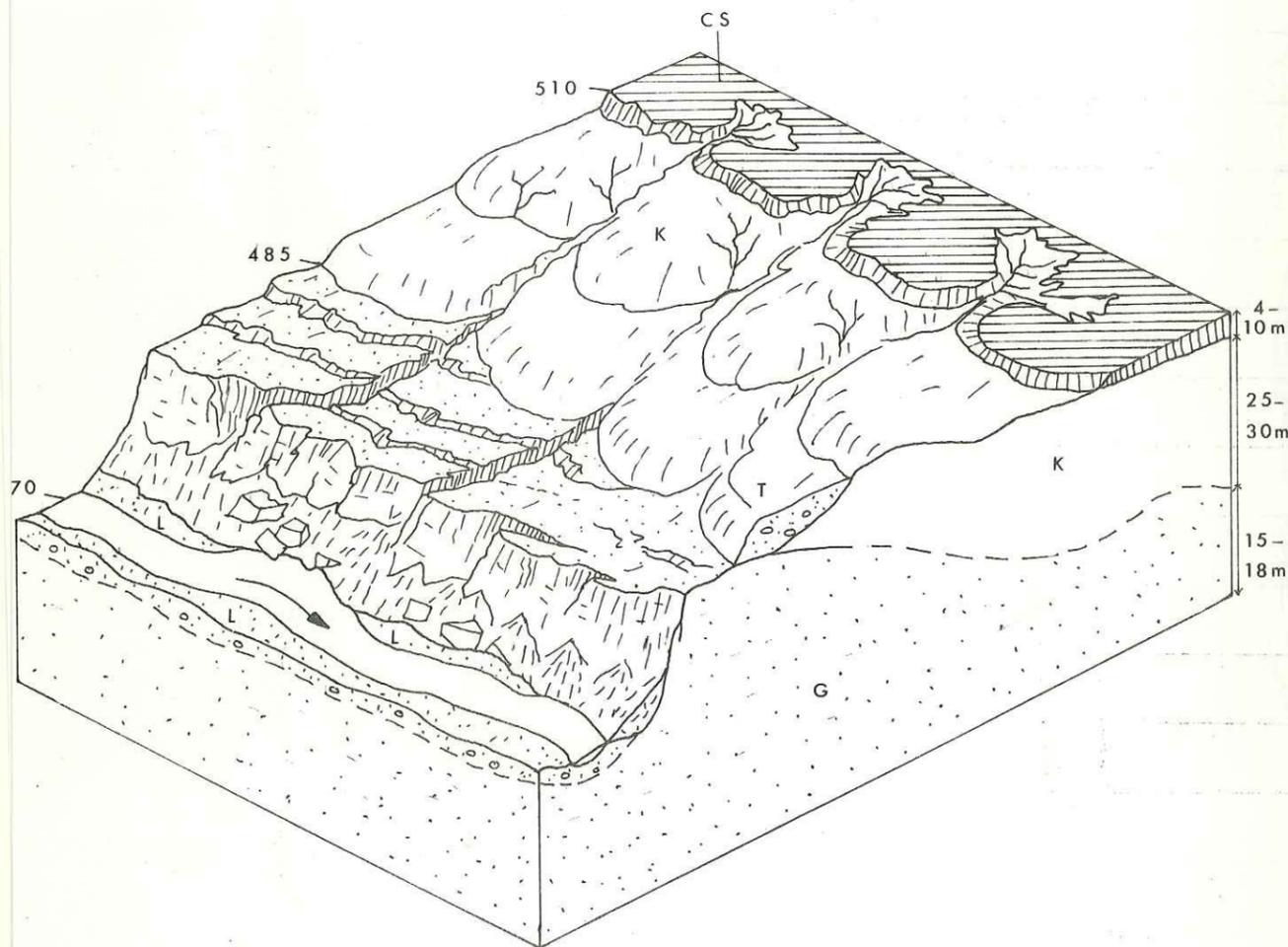


CARTE D'AFFLEUREMENTS  
 OUTCROPS MAP

- Cotton-soil
- Karab
- Grès de Nubie  
Nubian Sandstone Formation
- Profils topographiques  
Topographical profiles
- Profils géophysiques et topographiques  
Geophysical and topographical profiles
- Ancienne vallée remblayée  
Old buried channel
- Sondage - Borehole

Jean CHIALVO

## Coupe schématique des différents terrains

d'après R. BARBIER  
modifiée

- cs Cotton soil  
 K Karab  
 T Terrasses d'alluvions  
 anciennes  
 G Grès de Nubie  
 L Limons

Cette fracturation a favorisé son altération en boules et la formation de l'arène granitique qui constitue une auréole de 200 m de large environ, parfaitement visible sur photo aérienne par contraste avec le Cotton-soil noir environnant.

Cependant, l'extension de ce massif n'est pas limitée à sa surface visible car le Basement Complex a été rencontré dans le sondage E<sub>2</sub> (1.5 km au Sud du Jebel Aklayit et 5 km au Nord du sondage E<sub>1</sub>) sous une couverture Pléistocène de 3 m (10 ft).

Les mesures effectuées au laboratoire sur ce granite altéré permettent d'affirmer qu'il ne présente pas de radioactivité décelable au compteur GEIGER.

4.111 Pétrographie

Macroscopiquement, c'est un granite porphyrique à grands cristaux de feldspath (5-10 mm), dont les ferromagnésiens sont très altérés. Quelques cristaux d'épidote sont parfois visibles.

Au microscope, c'est un microgranite qui possède une structure microorbiculaire très particulière : en effet, la lame 5 (ech. 5) présente deux zones où la taille des grains est différente :

- une zone où la structure ophitique, isodiamétrique, ancienne est bien conservée. Les grains de quartz sont globulaires et bien corrodés ; les plages feldspathiques automorphes présentent des micropegmatites graphiques ;
- une zone où la structure microgrenue indique une phase fluide interstitielle. On reconnaît des feldspaths potassiques (microcline) et des plagioclases (albite surtout).

Cette zone apparaît mieux dans la lame 5a (ech. 5), où elle entoure une gaine feldspathique constituée de grains moyens. Cette dernière ceinture à son tour un grain de quartz automorphe ou un feldspath monocristallin, voire plusieurs feldspaths engrenés.

Nous avons affaire ici à un début d'orbicule, dont le grain de quartz constitue, en général, le nucléus.

Les feldspaths qui forment la gaine, se disposent perpendiculairement au pourtour du grain de quartz.

La phase "fluide" interstitielle à structure microgrenue est principalement constituée de feldspaths et d'un peu de biotite destabilisée devenue opaque.

On remarque que les figures de perthite sont nombreuses dans les plages feldspathiques tant dans la gaine que dans la zone microgrenue.

L'analyse aux rayons X indique la présence de quartz, d'un feldspath potassique proche du microcline, d'albite et d'un plagioclase, vraisemblablement du type oligoclase ; le matériel micacé est en très faible quantité.

#### 4.112 Evolution génétique

Les restites de granite à grain moyen imbibées par un granite à grain fin indiquent :

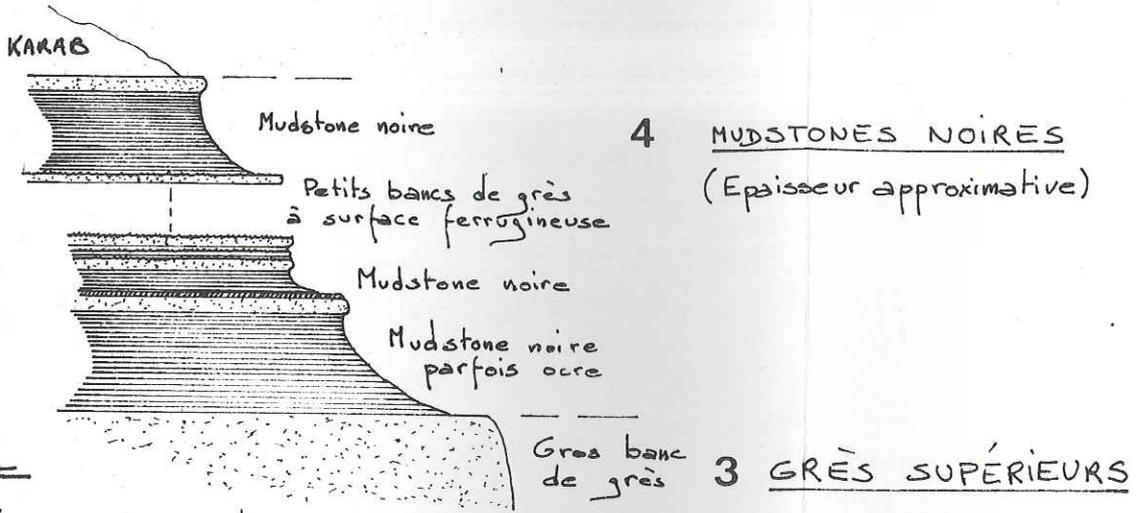
- un début de cristallisation en profondeur (enclaves grenues, quartz primaires) ;
- une reprise par une phase fluide avec mise à l'état mobile des restites (fusion partielle et incomplète?);
- une mise en place brutale provoquant une cristallisation très rapide. Les restites (quartz, feldspath monocristallin) constituent les germes autour desquels se développe la couronne feldspathique.

La cristallisation de la couronne et du fond microcristallin étant trop rapide, tous les minéraux se forment en même temps, d'où la présence de perthite ou de micropegmatite graphique.

#### 4.113 Analyse chimique et calculs normatifs

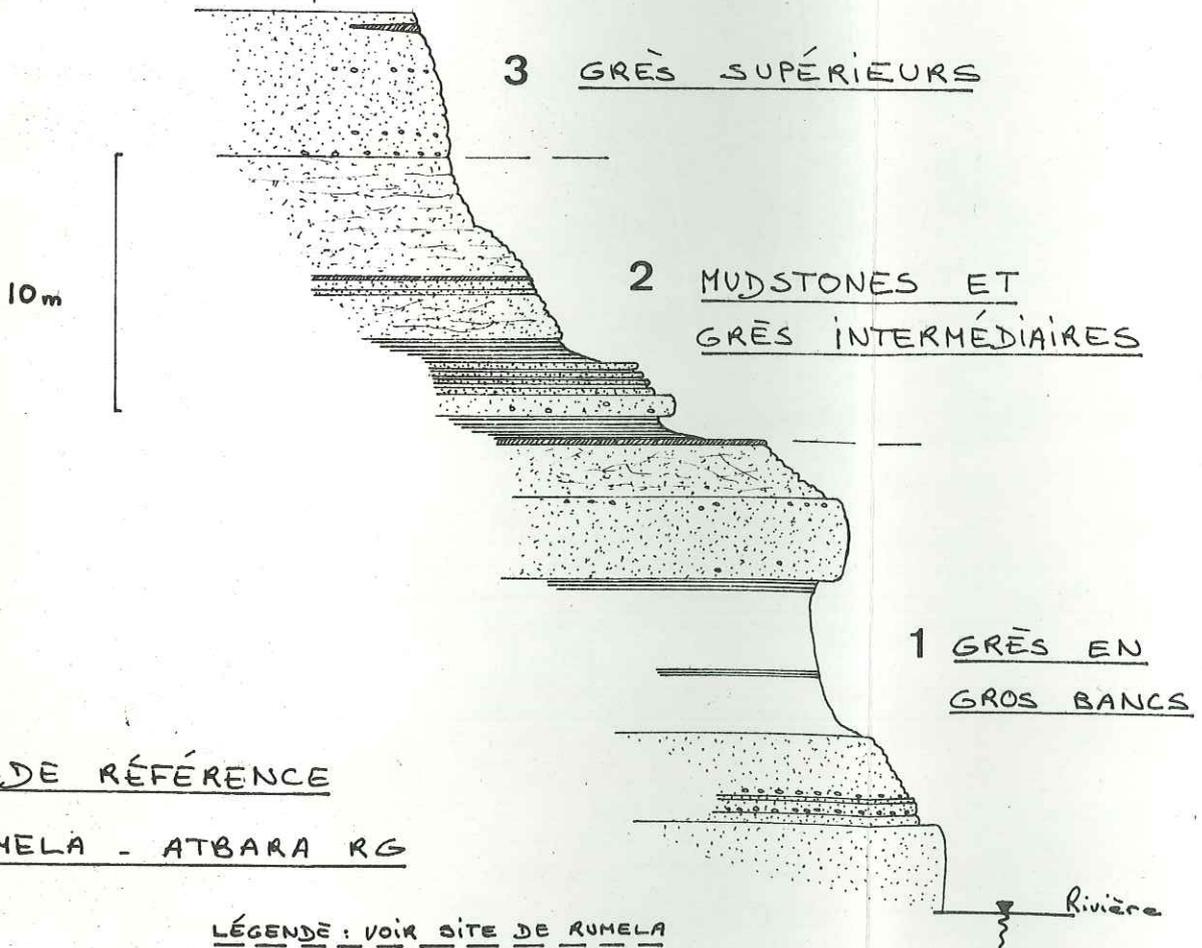
L'analyse chimique totale donne les résultats suivants :

Coupe synthétique des Grès de Gedaref dans la région d'Es Showak



COUPE EN AVAL  
DES GORGES D'ABU REIDA  
(2<sup>e</sup> VALLÉE REMBLAYÉE)  
ATBARA RD

L'épaisseur des grès supérieurs est inconnue



COUPE DE RÉFÉRENCE  
DE RUNELA - ATBARA RD

LÉGENDE : VOIR SITE DE RUNELA

Echantillon 5

14°24'N 35°56'E

(1)	%
SiO <sub>2</sub>	72.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.90
FeO	0.30
MgO	0.50
CaO	1.40
Na <sub>2</sub> O	3.40
K <sub>2</sub> O	3.90
TiO <sub>2</sub>	0.35
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Tr
MnO <sup>+</sup>	0.05
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.80
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.70
TOTAL	100.00

L'analyse chimique permet de calculer :

- . la norme CIPW donnant les minéraux virtuels ;
- . la norme sur minéraux réels (G. VIVIER, Laboratoire de Grenoble).

Cette dernière fournit la proportion de chaque minéral existant dans la roche, grâce à la vérification au microscope de l'existence des minéraux potentiels.

NORME CIPW

	%	
Ilménite	0.61	
Orthose	22.80	
Plagioclase	35.77	Ab 28.82 An 6.95
Corindon	0.41	
Magnétite	0.23	
Hématite	3.68	
Hypersthène	1.30	
Quartz	33.66	
Eau	1.50	
TOTAL	98.96	

NORME SUR MINERAUX REELS

	%	
Quartz	34.67	
Orthose	31.94	
Plagioclase An=23	24.57	Ab 18.88 An 5.69
Biotite	4.18	
Calcite	0.11	
Ilménite	0.40	
Magnétite	2.75	
Eau	1.22	
TOTAL	99.84	

(1) Analyste : J. SÉRANGE Laboratoire de Géologie-Clermont-Ferrand.

Paramètres de A. LACROIX  
(1933)

CIPW

p = I  
q = '4  
r = '2  
s = 3'

Paramètres de A. LACROIX

MINÉRAUX REELS

p = I'  
q = 3 (4)  
r = '2  
s = 3'

D'après la classification de A. STRECKEISEN (1967) basée sur la norme des minéraux réels, la roche analysée est un GRANITE (s.st.).

4.114 Datation absolue

La datation d'un échantillon de ce granite par la méthode du potassium-argon (K-Ar), a été tentée au Laboratoire de Géologie de Clermont-Ferrand. Malheureusement, aucun résultat n'a pu être obtenu car le granite était beaucoup trop altéré.

Nous en sommes donc réduits à conclure que le Jebel Aklayit appartient au Basement Complex, mais sans pouvoir préciser l'âge de sa mise en place, ni l'âge des épisodes tectoniques qu'il a pu subir (en particulier, un éventuel réchauffement provoqué par la montée des basaltes tertiaires).

4.12 FORMATION DES GRÈS DE GEDAREF - GEDAREF SANDSTONE FORMATION

La formation des Grès de Gedaref comprend tous les grès, siltstones et argilites qui affleurent dans la région de Gedaref et le long de la frontière éthiopienne.

Bien que B.P. RUXTON (1956) ait remarqué qu'elle présentait de nombreux points communs avec les Grès de Nubie, elle était considérée, jusqu'à cette étude, comme jurassique (2.22).

La découverte de bois fossiles identifiables nous a permis, comme nous le verrons plus loin, de préciser leur âge (4.124).

4.121 Lithologie

Cette formation est en général recouverte par des coulées basaltiques tertiaires et quand ce n'est pas le cas, par le Cotton-soil.

Les affleurements sont donc rares et localisés en bordure des rivières (Fig. 8, p.36 et 8 bis, p.37).

La mission géologique effectuée dans le secteur par R. BARBIER (1973) avait d'ailleurs pour but de rechercher le long des rivières ces zones d'affleurements et d'en analyser leur valeur comme appuis éventuels de barrage.

a. Dans la région d'Es Showak, la structure est tabulaire et les grès apparaissent en grandes dalles horizontales.

Au niveau des sites de Rumela et de Burdana, nous avons pu établir des coupes précises qui montrent que la série gréseuse peut être divisée en trois ensembles (Fig. 10, p. 42) :

- . une série de grès grossier en gros bancs, à la base ;
- . une série tendre constituée de mudstones blanches à grises ;
- . une série de grès moyen roux, au sommet : les grès supérieurs.

La description de ces séries est donnée dans le chapitre 5.

Un quatrième ensemble a pu être individualisé en aval des gorges d'Abū Rēida ; il s'agit d'une série constituée de mudstones noires apparaissant au-dessus des grès supérieurs.

b. Les variations d'épaisseur et de faciès sont importantes et se remarquent bien, surtout sur l'Atbara.

En effet, par leur origine probable (vastes dépôts à caractère deltaïque épanchés dans des cuvettes peu profondes), les grès se présentent comme une succession de lentilles de grandes dimensions et peuvent, de ce fait, présenter des variations d'épaisseur, entre le centre de ces lentilles et leurs extrémités. Parfois, le long de chenaux d'érosion privilégiés, ces variations peuvent être relativement rapides.

Il est donc à priori illusoire de trop compter sur la constance des épaisseurs pour dessiner les coupes géologiques en tenant compte de la disposition horizontale des couches.

En amont du site de Rumela, en rive gauche de l'Atbara, la série des mudstones s'étale largement et des distinctions telles que celles des "grès intermédiaires" ont été introduites pour nous repérer.

Par contre, en aval du site, la série des mudstones s'amincit, devenant pratiquement inexistante. Ainsi, les gorges d'Abu Reida sont taillées dans un ensemble gréseux où les gros bancs et les grès supérieurs sont confondus formant des falaises d'une trentaine de mètres environ.

A Rumela, le pendage est de 2 à 4 degrés vers l'Est mais vers l'aval, on assiste à l'envoyage des séries gréseuses vers le Nord, sous le Karab.

Ainsi, à la sortie des gorges d'Abu Reida, après l'apparition des mudstones noires, dernier niveau de la Formation de Gedaref dans cette région (Fig. 10, p. 42), les grès disparaissent sous le Karab et seuls quelques affleurements subsistent près de Tomat et d'Aradeiba sans que l'on puisse préciser quel niveau de la formation ils représentent.

Cà et là, dans la rivière, en aval d'Es Showak, affleurent quelques blocs de grès, indices de la continuité de la formation vers le Nord.

- Sur la Setit, l'extension des grès est plus réduite et, vers l'Est comme vers le Nord, ils disparaissent rapidement sous un épais manteau de Karab.

Un petit affleurement existe, au milieu du Karab, près du village d'Abuda, à proximité de dykes basaltiques, mais il est probable qu'il s'agit d'un reste de la surface topographique des grès avant son érosion et son recouvrement sous les dépôts de remblayage.

D'ailleurs, le sondage E<sub>1</sub> situé au croisement de la route de Wadi El Helew et du profil topographique NO° du barrage, a rencontré les grès à 4.2 m (14 ft) de la surface et confirme donc la présence des grès vers l'Est, sous le Cotton-soil.

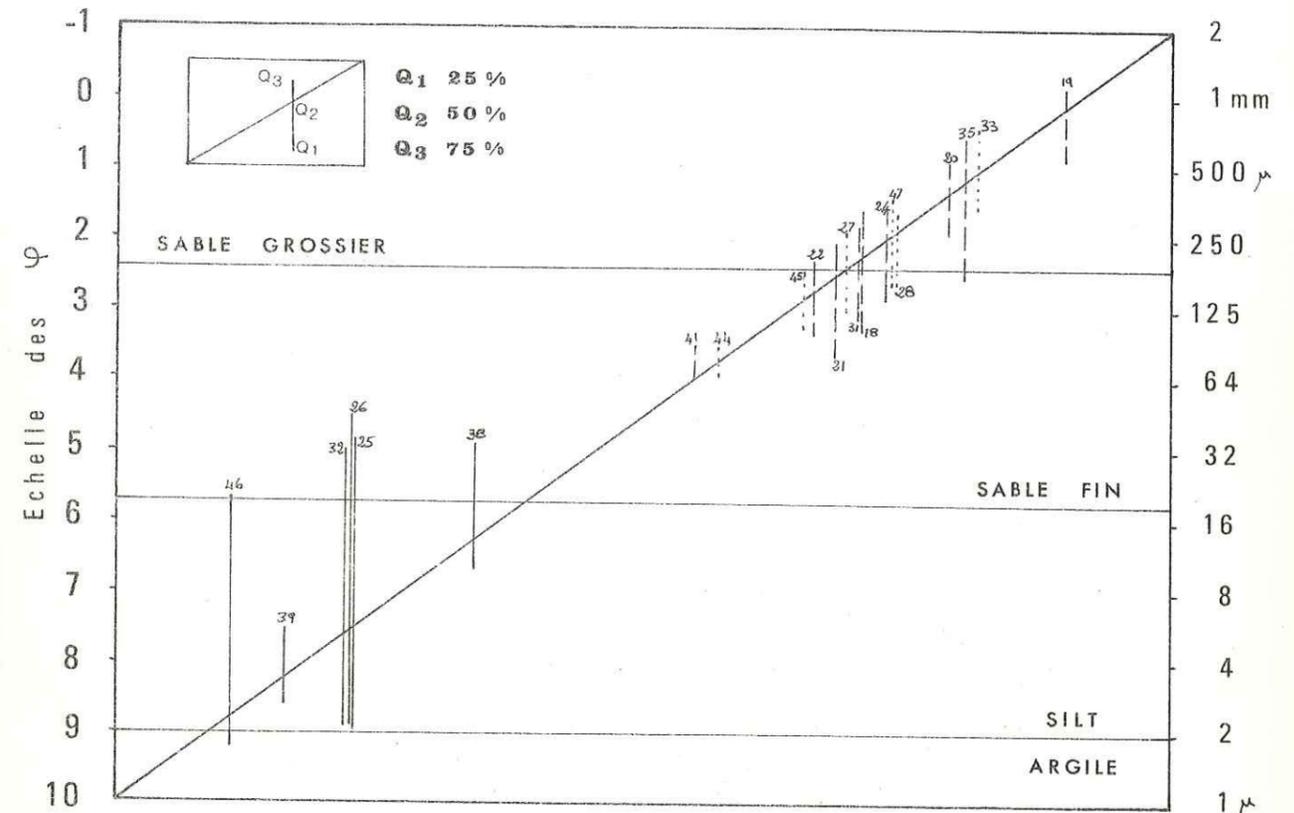
Le contact entre le Basement Complex et les Grès de Gedaref se situe entre les sondages E<sub>1</sub> et E<sub>2</sub> et il serait intéressant d'étudier plus précisément cette zone afin de connaître les rapports existant entre ces deux formations.

#### 4.122 Analyses sédimentologiques

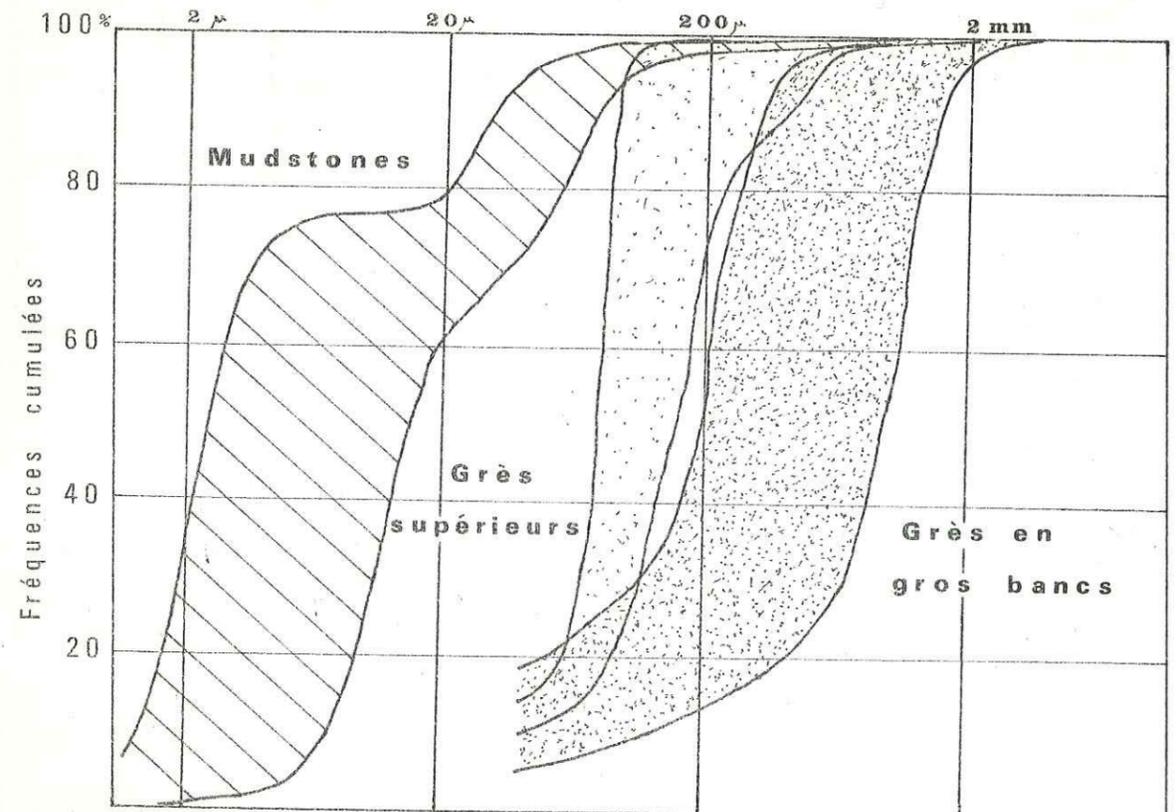
Pour étudier plus précisément ces séries gréseuses, nous avons utilisé, au laboratoire, différentes méthodes :

- . la granulométrie ;
- . la morphoscopie et la morphométrie des grains de quartz ;

## Granulométrie des grès et mudstones



1 Diagramme de Doeglas



2 Courbes enveloppes

. l'exoscopie des grains de quartz.

Le principe de ces méthodes est donné en annexe 6.

La figure 11, p. 45, regroupe les courbes granulométriques de tous les échantillons analysés :

- . sous la forme d'un diagramme de Doeglas ;
- . sous la forme de courbes enveloppes.

Nous remarquons ainsi que :

- . les grès en gros bancs sont constitués de sable grossier ;
- . les grès supérieurs, de sable moyen à fin ;
- . les couches dites "mudstones" sont en réalité des "siltstones".

L'individualisation de chaque ensemble lithologique sur le terrain, se trouve donc confirmée au laboratoire par des caractères granulométriques particuliers.

Nous allons maintenant étudier chacun de ces ensembles.

A - Les grès en gros bancs

. Granulométrie

N°	M.p <sub>mm</sub>	M.s <sub>mm</sub>	Q <sub>1mm</sub>	Q <sub>2mm</sub>	Q <sub>3mm</sub>	So	QdΨ	He	As	Can.
18	0.250	0.400	0.106	0.225	0.350	1.81	0.87	0.47	0.73	par.
19	1.25	-	0.580	0.940	1.16	1.41	0.51	0.32	0.76	par.
20	0.500	0.100	0.270	0.420	0.550	1.42	0.51	0.40	0.84	par.
21	0.250	-	0.083	0.200	0.245	1.71	0.77	0.30	0.50	ft.par.
31	0.250	0.400	0.135	0.220	0.300	1.49	0.57	0.36	0.83	par.
22	0.250	-	0.105	0.160	0.210	1.41	0.50	0.33	0.86	log.
24	0.400	0.250	0.147	0.260	0.360	1.56	0.63	0.32	0.78	par.
35	0.540	0.850	0.190	0.460	0.720	1.94	0.98	0.65	0.63	par.

N°	Numéro d'échantillon	So	Sorting-index
Mp	Mode principal	QdΨ	QdΨ de KRUMBEIN
Ms	Mode secondaire	He	Hétérométrie
Q <sub>1</sub>	= 25 %	As	Asymétrie
Q <sub>2</sub>	= 50 %	Can	Courbe canonique de RIVIERE
Q <sub>3</sub>	= 75 %	par.	Parabolique
		ft. par.	Fortement parabolique
		log.	Logarithmique

) en mm

- Le classement (So) et le triage (QdΨ, He) sont moyens à assez bons ; ceci caractérise un dépôt fluviatile élaboré, à la limite du domaine fluviatile et du domaine marin.
- L'asymétrie négative indique un remaniement (plage ?) ou des remaniements successifs lors d'épandages fluviaux.
- Les courbes canoniques de RIVIERE (que nous n'avons pas représentées ici) présentent un faciès parabolique caractéristique des sédiments peu évolués.

. Morphoscopie

Les grains sont classés d'après leur valeur d'usure qui varie de 0 à 10 :

- grains non usés (NU) (valeur d'usure : 0 à 2) ;
- grains à coins arrondis (CA) (valeur d'usure : 3 et 4) ;
- grains arrondis (AR) (valeur d'usure : 5 et 6) ;
- grains ovoïdes (OV) (valeur d'usure : 7 à 9) ;
- grains sphériques (Sph) (valeur d'usure : 10).

L'indice d'usure est le rapport du pourcentage des grains dont la valeur d'usure est supérieure à 5 au pourcentage des grains dont la valeur d'usure est inférieure à 5.

N° échantillon	NU 2	CA 4	AR 6	OV 8	Sph 10	Iu
19	13	29	47	11	0	0.45

L'indice d'usure négatif indique un matériel relativement peu évolué.

. Exoscopie des grains de quartz

L'exoscopie est une méthode nouvelle basée sur l'analyse de la surface des grains de quartz au microscope électronique à balayage (scanning). Elle permet de reconstituer l'histoire des grains grâce à l'étude des traces d'action mécanique et des traces d'action chimique (cf.annexe 6). Ces traces sont photographiées puis interprétées.

Pour notre part, nous avons réalisé les clichés nécessaires à l'interprétation, au Centre de Microscopie électronique de l'Université de Lyon.

- Echantillon 18 (cf. photo 13)

Les faces de certains grains montrent des stries profondes et des arrachements, signes d'un premier épisode aquatique de haute énergie (fluviatile ?).

Mais l'ensemble des grains possède des arêtes, et des coins arrondis, sans traces de chocs sur les arêtes, ce qui indique un second épisode de polissage aquatique de basse énergie.

Leur surface est recouverte d'une très légère pellicule de paillettes de silice qui laisse supposer une courte évolution pédologique.

- Echantillon 19 (cf. photo 14)

Certains grains ont des arêtes arrondies, mais elles montrent, ainsi que les faces, de nombreuses traces de chocs en croissant indiquant un polissage aquatique de moyenne énergie.

Ces surfaces polies présentent également des cassures nettes, très fraîches, dues à un épisode aquatique de haute énergie, postérieur au précédent.

Quelques grains n'ont d'ailleurs été modelés que par ce dernier épisode car ils sont très anguleux et montrent cassures, arrachements et stries sur leurs faces.

- Echantillon 21

Les faces et les arêtes de tous les grains montrent d'anciennes traces de chocs en croissant, restes d'une action aquatique (fluviatile ?) antérieure et des traces de chocs en V et des arrachements, dus à une légère éolisation postérieure.

On remarque que toutes les arêtes et les traces de chocs sont régulièrement polies. Aucune trace de choc récente n'apparaît. Le troisième épisode est donc un polissage aquatique très régulier, de basse énergie.

Certaines surfaces présentent parfois de petits dépôts dus à une évolution pédologique terminale.

- Conclusion

L'ensemble des éléments fournis par l'exoscopie permet de penser que les échantillons 18 et 21 ont subi une évolution marine de basse à moyenne énergie alors que l'échantillon 19 a été marqué par une évolution marine de haute énergie.

Parmi les études établissant les critères d'interprétation utilisés plus haut, le lecteur pourra se référer aux travaux de D.H. KRINSLEY et J.C. DOORNKAMP (1973) et surtout à ceux de L. LE RIBAUT (1974).

• Pétrographie

Ces grès sont essentiellement quartzeux, le ciment est siliceux.

Dans certains niveaux de grès ferrugineux, la matrice ferrugineuse peut atteindre 30 % (échantillon 35).

Conclusion à l'étude des grès en gros bancs

Ces grès sont des dépôts deltaïques d'origine fluviatile épanchés à proximité d'une zone côtière.

Le matériel est peu évolué ce qui traduit une provenance continentale de type fluviatile, mais, il présente également un polissage régulier qui témoigne d'une influence marine.

Le remaniement en cours de dépôt ainsi que la légère éolisation subie par quelques grains indiquent que la sédimentation a eu lieu dans une zone proche de la côte.

B - Les mudstones

Nous avons groupé avec les mudstones, les échantillons 38 et 39 qui font en réalité partie des "mudstones noires".

• Granulométrie

Les courbes granulométriques indiquent qu'il s'agit en fait de siltstones et que la fraction argileuse n'excède pas 30 %.

Cette fraction argileuse est principalement constituée de kaolinite, qui est parfaitement reconnaissable sur le

terrain à sa couleur blanche et que les analyses de laboratoire ont d'ailleurs confirmée.

N°	M.p <sub>mm</sub>	M.s <sub>mm</sub>	Q <sub>1mm</sub>	Q <sub>2mm</sub>	Q <sub>3mm</sub>	So	Qdψ	He	As	Can.
47	0.400	0.125	0.173	0.280	0.390	1.50	0.59	0.45	0.86	log.
46	0.00315	0.080	0.00182	0.0024	0.0208	3.38	1.75	0.45	7.4	ft.hyp.
32	0.00315	0.008	0.0023	0.0057	0.031	3.67	1.72	1.00	2.21	ft.hyp.
25	0.00315	0.008	0.0021	0.0061	0.036	4.14	2.05	1.75	2.03	ft.hyp.
26	0.00315	0.0125	0.0025	0.006	0.046	4.52	2.15	1.15	2.33	ft.hyp.
38	0.125	-	0.0103	0.0142	0.035	1.84	0.87	0.36	1.5	hyp.
39	0.0050	-	0.0028	0.0036	0.0058	1.44	0.53	0.27	1.33	hyp.

hyp. hyperbolique

- Le classement (So) moyen à très mauvais, caractérise un sédiment continental de type fluviatile.
- Le triage (Qdψ, He) est mauvais, signe d'une pluralité d'apports ou d'une turbulence qui a remanié le sédiment après son dépôt.
- L'asymétrie positive caractérise un dépôt en milieu calme.
- Les courbes canoniques de RIVIERE (non représentées ici) présentent un faciès hyperbolique, caractéristique des dépôts de décantation.

Morphoscopie et morphométrie

- Etude de la forme des grains

N° échantillon	NU	CA	AR	CV	Sph	Iu
47	2	40	45	11	2	0.47

L'indice d'usure négatif indique un matériel peu évolué.

Les abréviations employées ont été expliquées précédemment (cf. Grès en gros bancs).

Morphométrie

N° échantillon	Médiane Indice d'éroussé	Mode Indice d'éroussé	%
47	204	200	29

L'histogramme unimodal et les valeurs de l'indice d'éroussé sont caractéristiques d'un façonnement marin.

Exoscopie des grains de quartz

- Echantillon 46 (cf. photos 15, 16 et 17)

Si quelques grains semblent montrer de légères traces de choc héritées d'un épisode fluviatile ancien, tous présentent des traces de chocs en V ou rectilignes sur les faces comme sur les arêtes, traduisant l'influence d'une éolisation assez importante, postérieure.

Les grains sont régulièrement polis ce qui indique un troisième épisode de polissage aquatique de basse énergie.

Seuls, quelques grains montrent des cassures nettes sur les faces, dues à un épisode aquatique de haute énergie ultérieure.

Les surfaces de nombreux grains sont couvertes de dépôts de silice et dans certaines dépressions, des trous provoqués par la dissolution, coexistent avec ces dépôts (paillettes et placages de silice).

Cette juxtaposition de phénomènes de dissolution et de dépôt indique une évolution pédologique finale due à l'immobilisation des grains, dans un milieu tantôt sursaturé, tantôt sous-saturé en silice.

En résumé, ces grains présentent l'évolution suivante :

1. épisode fluviatile ;
2. épisode d'émergence avec éolisation ;
3. épisode marin de basse énergie parfois suivi d'un épisode de haute énergie ;
4. évolution pédologique.

. Pétrographie

Ces silstones sont très quartzeux.

Le ciment est siliceux.

Les minéraux argileux ont été étudiés aux rayons X : le minéral prédominant est la Kaolinite, indicateur de climat chaud et humide.

Conclusion à l'étude des mudstones

Ce sont des dépôts lagunaires consécutifs à une légère régression.

Le matériel peu évolué et remanié indique des origines continentales diverses.

Après une émergence entraînant une éolisation assez importante, il a subi un polissage marin régulier.

Il s'est ensuite déposé dans un milieu calme.

C - Les grès supérieurs

. Granulométrie

N°	M <sub>p</sub> mm	M <sub>s</sub> mm	Q <sub>1</sub> mm	Q <sub>2</sub> mm	Q <sub>3</sub> mm	So	Qd	He	As	Can
44	0.100	-	0.067	0.08	0.092	1.17	0.22	0.20	0.96	log.
45	0.115	0.200	0.105	0.140	0.190	1.34	0.43	0.20	1.02	log.
28	0.315	0.100	0.155	0.270	0.345	1.49	0.58	0.33	0.73	par.
33	0.800	0.400	0.360	0.600	0.800	1.49	0.57	0.40	0.79	par.
27	0.250	0.125	0.125	0.205	0.260	1.44	0.52	0.33	0.76	par.

- Le bon classement caractérise les dépôts marins de plateforme continentale.

L'excellent classement de l'échantillon 44 indique des dépôts dunaires.

- Le triage est assez bon et caractérise un dépôt à la limite du domaine marin et du domaine fluviatile, mais plus proche cependant du domaine marin.

Le très bon triage de l'échantillon 44 est caractéristique des dépôts éoliens.

- L'asymétrie négative à faiblement positive indique un remaniement moyen à nul.

- Les courbes canoniques de RIVIERE (non représentées ici) paraboliques à logarithmiques montrent le passage de sédiments peu évolués à des sédiments évolués.

. Exoscopie des grains de quartz

- Echantillon 44 (cf. photo 18)

De très gros trous à bords polis apparaissent sur les faces des grains et sont probablement l'héritage d'un épisode aquatique ancien, de haute énergie (fluviatile ?).

Sur les faces planes, on remarque également de nombreuses traces de chocs en V ou rectilignes, signes d'une éolisation ultérieure, assez importante.

Les arêtes et les coins saillants des grains sont arrondis et aucune trace de choc récente n'apparaît. Ils ont subi un polissage aquatique de basse énergie, dans une troisième phase.

La surface montre parfois de petits dépôts de silice et des traces de dissolution dans les dépressions qui traduisent une légère amorphisation au cours de l'évolution pédologique finale.

- Echantillon 45 (cf. photo 19)

On aperçoit sur les faces des grains, de grandes traces de chocs en arc de cercle provoquées par une évolution fluviatile ancienne ; elles sont quelquefois recoupées par des traces de chocs en V qui, suivant les grains, indiquent une éolisation légère à assez importante.

Les arêtes et les coins arrondis sont le témoignage d'un épisode ultérieur de polissage aquatique de basse énergie et certains grains présentent également des cassures nettes sur les faces, qui traduisent un nouvel épisode aquatique de haute énergie.

Les faces planes ainsi que la surface des grains sont enduites de minces dépôts de silice provoqués par l'évolution pédologique finale.

En résumé, ces grains ont subi l'évolution suivante :

1. épisode fluviatile ;
2. éolisation consécutive à une période d'émersion ;
3. épisode marin de basse énergie parfois suivi d'un épisode de haute énergie ;
4. évolution pédologique finale.

#### Pétrographie

Ces grès sont essentiellement quartzeux et le ciment est siliceux.

Pour certains grès ferrugineux, la matrice ferrugineuse peut atteindre 48 % (échantillon 41).

#### Conclusion à l'étude des grès supérieurs

Ce sont des dépôts deltaïques d'origine continentale, épanchés dans une zone côtière et ayant subi une influence marine assez forte.

Les traces d'éolisation et les niveaux dunaires (échantillon 44) indiquent la proximité de la côte cependant, l'influence marine est déterminante comme en témoigne le matériel évolué et bien classé.

Ces derniers caractères permettent d'ailleurs de penser que la sédimentation a eu lieu sur une vaste surface plane.

#### 4.123 Paléogéographie des grès de Gedaref

Pour essayer de reconstituer la paléogéographie de la région, nous ne pouvons nous contenter des seules analyses sédimentologiques.

Sur le terrain, en de nombreux endroits, apparaissent des niveaux de grès ferrugineux peu épais (10 - 50 cm), dont l'extension est réduite (quelques dizaines à quelques centaines de m).

Aucune discontinuité de sédimentation n'existe entre ces grès et les grès sous-jacents et, au-dessus, la sédimentation s'est poursuivie normalement.

Nous pensons qu'il s'agit d'une altération provoquée par des stades d'émersion temporaire, accentuée peut-être actuel-

lement par les migrations d'oxydes de fer, dues aux variations climatiques.

A la saison des pluies, les infiltrations oxydent le fer et, en saison sèche, un dépôt d'oxydes se forme par évaporation, dans la tranche de surface.

Ce phénomène a d'ailleurs été décrit par P. ANTOINE (1964) dans les niveaux ferrugineux des "grès de base" du Néocomien, au Liban.

Il est probable qu'il se produit également dans notre région mais en des points très localisés cependant.

D'autre part, nous avons récolté :

- des troncs de bois fossiles, dans les grès en gros bancs de Rumela et dans les grès supérieurs à l'entrée de la deuxième vallée remblayée ;
- des empreintes de feuilles, dans les mudstones en rive gauche de l'Atbara, en amont de Rumela.

Ces restes fossiles étaient en place et même s'il peut s'agir de bois flottés, il nous faut admettre que la côte était proche.

J.P. LEFRANC (1975) explique le processus de silicification des bois par la présence de silice en solution dans un sol tropical (?). Les forêts africaines du Crétacé et de l'Oligocène étant des forêts tropicales, il en déduit que les bois silicifiés caractérisent, le plus souvent, un milieu continental soumis à un climat tropical.

Ainsi, à l'analyse des arguments de terrain et de laboratoire, nous pouvons conclure que, dans la région d'Es Showak, les Grès de Gedaref sont de vastes dépôts deltaïques plus ou moins côtiers, épanchés sur une surface plane soumise à des épisodes d'émersion et de régression, sous un climat de type tropical.

#### 4.124 Age des Grès de Gedaref

La découverte de bois fossiles et surtout la détermination de leur structure a permis de préciser l'âge des Grès de Gedaref, dans notre région.

En effet, l'âge de cette formation était jusqu'alors considéré comme Jurassique (2.22), mais aucun reste fossile n'avait permis de confirmer cette supposition.

Nous avons découvert à Rumela (4.123) de nombreux bois silicifiés, régulièrement sectionnés et remarquablement conservés, soit en place à la surface des grès, soit remaniés au fond des khors (1) qui entaillent la roche.

L'analyse de ces végétaux par le Professeur LEMOIGNE de l'Université de Lyon, permet de préciser qu'il s'agit de restes de bois appartenant à trois familles d'Angiospermes : Légumineuses, Méliacées et Sapindacées.

D'après leur structure, on peut dire que dans la région où se sont développés ces végétaux, régnait un climat humide, mais toutefois, sans pouvoir trancher entre un climat tropical et un climat tempéré.

L'histoire du monde végétal nous montre que des flores différentes se sont succédées à la surface de la Terre, au cours des temps géologiques ; ainsi, les Angiospermes n'apparaissent qu'au Crétacé supérieur, après l'Albien.

Les restes fossiles ayant été trouvés en place, en divers endroits, et présentant tous des caractères d'Angiospermes, nous devons attribuer au minimum un âge Crétacé supérieur à la série gréseuse des environs de Rumela.

Cet âge est à rapprocher de l'âge Crétacé supérieur (Cénomanién-Turonien) des Grès de Nubie, qui présentent d'ailleurs de nombreux points communs avec les Grès de Gedaref. Les rapports de ces deux formations ne sont pas visibles car ils sont masqués, dans la plaine de Butana, par un épais recouvrement quaternaire (Cotton-soil) ou, plus au Sud, par un recouvrement tertiaire (série d'Umm Ruwaba).

Il nous semble cependant que la Formation des Grès de Gedaref peut être interprétée comme un lobe de la série nubienne s'étendant vers l'Ethiopie.

En conclusion, tous les arguments d'ordre paléogéographique et surtout d'ordre stratigraphique nous amènent à considérer que les Grès de Gedaref sont en fait les Grès de Nubie.

#### 4.13 TERTIAIRE : LES BASALTES DE GEDAREF

A l'Oligocène, les premiers mouvements orogéniques éthiopiens provoquent, dans la région de Gedaref, des épanchements basaltiques se présentant :

- . soit en coulées compactes et prismées, ou en culots recouvrant les Grès de Gedaref ;
- . soit en dykes ou en sills s'injectant dans la série.

(1) Kho. : talweg.

#### 4.131 Lithologie

- a. Les coulées et les culots occupent une grande superficie et leur épaisseur est considérable.

A Er Rawashda, près de Gedaref, un sondage a traversé 203 m de basalte sans atteindre la base de la coulée. Toutefois, vers le Sud-Est, en direction de Gallabat, la série basaltique s'amincit et son épaisseur est comprise entre 30 et 90 m.

Près d'Es Showak, des inselbergs basaltiques dominent le plateau de Cotton-soil et nous avons eu l'occasion d'en étudier deux :

- . l'un (14°25'N, 35°47'E) dont le nom nous est malheureusement inconnu, borde le côté gauche de la route de Gedaref à environ 5 km du village d'Es Showak, en venant de celui-ci.

Il forme un petit mamelon très circonscrit (150m x 100 m x 40 m), au-dessus de la plaine et sa surface est jonchée de petits blocs de basalte.

- . l'autre, le Jebel Wad Ummar (14°22'N, 36°05'E) est situé à une dizaine de kilomètres au Nord de Wadi El Helew, en rive droite de l'Atbara.

Ce Jebel est une succession de monticules assez plats, recouverts de blocs de basalte de tailles diverses, dont la moyenne se situe aux alentours de 30 cm.

- b. Les dykes recoupent la série gréseuse et apparaissent surtout au niveau des rivières (Fig. 24, p. 91) ; les plus caractéristiques sont le gros dyke des gorges d'Abu Reida et celui de Rumela, leur largeur variant de 3 à 7m et leur longueur dépassant 3 km.

Ces dykes se mettent en place à la faveur de fractures anciennes et sont généralement accompagnés d'une multitude de dykes plus petits qui hachent la série gréseuse.

Les rivières suivent d'ailleurs, les grandes fractures soulignées par ces dykes.

4.132 Pétrographie

Les échantillons récoltés peuvent être séparés en deux groupes, suivant :

- leur localisation sur le terrain ;
- leur structure en lame mince.

Ainsi, les échantillons 3, 7, 9, 12, 13, 30 et 36 ont été recueillis dans les dykes et sont des basaltes doléritiques à olivine et zéolite alors que les échantillons 1B, 4 et 8 ont été ramassés sur des pointements de basalte.

a. Basaltes doléritiques

- Macroscopiquement, ce sont des basaltes sombres dans lesquels on distingue des cristaux d'olivine et de nombreuses vacuoles souvent remplies d'amygdales de zéolite.
- Microscopiquement, la structure est doléritique intersertale, ce qui est une structure peu courante.

Les phénocristaux sont essentiellement des plagioclases et des olivines automorphes.

Les pyroxènes (augite) se trouvent souvent en cristaux automorphes disposés entre les nombreuses lattes feldspathiques enchevêtrées.

L'ordre de cristallisation permet de distinguer :

- un premier temps représenté par des phénocristaux d'olivine automorphes ;
- un deuxième temps représenté par la syncristallisation d'augite et de plagioclase (An = 39) ;
- enfin, le dernier temps est représenté par l'analcime qui s'insinue dans les coins intergranulaires demeurés libres et/ou une plus ou moins grande proportion de verre.

Analyse chimique et calculs normatifs

.... Résultats de l'analyse chimique totale :

Echantillon 9 14°19'N 35°54'E Altitude : 490 m

(1)	%
SiO <sub>2</sub>	47.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.75
FeO	8.25
MgO	6.10
CaO	7.30
Na <sub>2</sub> O	4.65
K <sub>2</sub> O	0.60
TiO <sub>2</sub>	1.50
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15
MnO	0.10
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	1.35
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.10
TOTAL	100.00

De plus, l'analyse du baryum, strontium et rubidium en fluorescence X donne :

	Ba	Sr	Rb	
ech. 9	343	554	10	en p.p.m
	+20%	+ 5%	+5%	

.... Calculs normatifs

NORME CIPW	
	% minéraux virtuels
Apatite	0.34
Ilénite	2.89
Plagioclase	49.00 Ab 26.20 An 21.80
Néphéline	7.10
Magnétite	8.35
Diopside	28.57 CaOSiO <sub>2</sub> 5.22 MgOSiO <sub>2</sub> 15.30 FeOSiO <sub>2</sub> 8.05
Eau	1.45
TOTAL	99.88

NORME SUR MINÉRAUX REELS (2)	
	%
Orthose	2.42
Plagioclase	53.80 Ab 32.33 An=39 An 21.47
Augite	16.09
Olivine	10.88
Analcime	8.89
Ilménite	2.76
Magnétite	7.86
Apatite	0.36
Eau	1.25
TOTAL	104.31

(1) Analyste : J. SERANGE, Laboratoire de Géologie - Clermont-Ferrand.

(2) D'après : G. VIVIER, Laboratoire de Géologie - Grenoble.

On remarque la présence d'analcime, minéral exprimé, qui cristallise tardivement.

Paramètres de A. LACROIX || Paramètres de A. LACROIX

p = III  
q = '6  
r = 3  
s = '5

p = II (III)  
q = (5) 6  
r = 3  
s = '5

D'après la classification de A. STRECKEISEN (1967) basée sur la norme des minéraux réels, la roche analysée est une TEPHRITE A OLIVINE (ou BASANITE).

Nous pensons que cette roche est à rapprocher de la "cri-nanite" des environs de Gedaref et de Gallagat, décrite par B.P. RUXTON (1956) et qui correspond à une "basanite analcimifère mésocrate, holoplagioclasique, à structure doléritique" (J. JUNG et R. BROUSSE - 1959).

b. Basaltes

- Macroscopiquement, ce sont des laves sombres, compactes, où les zéolites sont rares.
- Microscopiquement, la structure est fluidale et on distingue :
  - un premier temps de cristallisation représenté par des phénocristaux d'olivine automorphes et de pyroxène résorbés ;
  - un deuxième temps représenté par la mésostase dans laquelle s'individualisent des microlithes de plagioclase.

Analyse chimique et calculs normatifs

.... Résultats de l'analyse chimique totale :

Echantillon 1B 14°22'N 35°47'E Altitude : 515 m

(1)	%
SiO <sub>2</sub>	46.70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.65
FeO	7.75
MgO	9.65
CaO	11.70
Na <sub>2</sub> O	2.10
K <sub>2</sub> O	0.30
TiO <sub>2</sub>	0.80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Tr
MnO <sup>+</sup>	0.15
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	1.80
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.45
TOTAL	100.50

L'analyse du baryum, strontium et rubidium en fluorescence X donne :

ech.1B	Ba	Sr	Rb	en p.p.m.
	74	226	<10	
	+20%	+5%		

Particularité :  
Les teneurs sont faibles.

.... Calculs normatifs

NORME CIPW	
	% minéraux virtuels
Ilménite	1.52
Leucite	1.31
Plagioclase	39.71 Ab 5.24 An 34.47
Néphéline	6.82
Magnétite	3.94
Diopside	44.92 CaOSiO <sub>2</sub> 9.86 MgOSiO <sub>2</sub> 24.10 FeOSiO <sub>2</sub> 10.96
Eau	2.25
TOTAL	100.47

NORME SUR MINERAUX REELS (2)	
	%
Orthose	0.56
Plagioclase	48.40 Ab 14.44 An 33.96
Augite	28.96
Olivine	16.68
Analcime	2.20
Ilménite	1.24
Magnétite	1.48
Eau	1.87
TOTAL	101.39

(1) Analyste : J. SERANGE Laboratoire de Géologie - Clermont-Ferrand.

(2) D'après G. VIVIER Laboratoire de Géologie - Grenoble.

Paramètres de A. LACROIX

p = III  
q = '6  
r = 4  
s = '5

Paramètres de A. LACROIX

p = III  
q = 5  
r = 4  
s = '5

D'après la classification de A. STRECKEISEN (1967), la roche analysée est un **BASALTE (BASALTE ALCALIN)**.

c. Conclusion

La séparation des échantillons en deux groupes est donc justifiée par les analyses chimiques et les calculs normatifs car le premier groupe se rattache à une série sous-saturée du type basanite alors que le second se situe dans une série basaltique normale.

Par ailleurs, la teneur en Sr et Rb est plus importante dans l'échantillon 9 que dans l'échantillon 1B.

4.133 Datation absolue

Les échantillons récoltés ont été datés par la méthode potassium-argon (K-Ar), par J.M. CANTAGREL du Laboratoire de Géologie de Clermont-Ferrand, mais, la majorité d'entre eux étant très altérés, seuls les échantillons 30 et 8 ont pu donner un âge correct.

L'échantillon 30 (14°14'15" N, 35°55'E) appartient au grand dyke qui traverse le site de Rumela, en rive gauche de l'Atbara (cf. Fig. 24, p. 91).

L'échantillon 8 (14°22'N, 36°05" E) a été prélevé au Jebel Wad Ummar.

Résultats obtenus :

Echantillon	N°	DA	K %	<sup>40</sup> Ar (1)	At % (2)	Age <sub>10<sup>6</sup></sub> ans
30	R 6368	388	0.180	0.267	82	21 ± 1
8	R 6369	387	0.319	0.232	68	10.2 ± 0.4

(1) Argon radiogénique 10<sup>-9</sup> g/g  
(2) % Argon atmosphérique

Il faut remarquer que les teneurs en potassium sont faibles pour des échantillons de nature basaltique.

L'examen des résultats révèle que les âges obtenus ne correspondent pas à l'âge Oligocène (33 millions d'années par K-Ar) rapporté par A.J. WHITEMAN (1971 b) pour un échantillon de basalte de la région de Gedaref (2.3).

Il est d'ailleurs regrettable que l'auteur ne mentionne ni la localisation de l'échantillon analysé ni sa position dans la série des basaltes de Gedaref, ce qui nous prive d'une comparaison très fructueuse. En effet, cet âge correspond à celui des épanchements basaltiques du plateau éthiopien qui ont eu lieu à partir de fissures et de cheminées et sont postérieurs à la surrection des massifs éthiopiens et à la première phase de la formation de la Mer Rouge.

La datation de nos basaltes donne un âge Miocène : Burdigalien (21 millions d'années) pour l'échantillon 30, Pontien (10 millions) pour l'échantillon 8. Ceci correspond à la montée de roches basaltiques en des points très localisés du Soudan (Jebel Marra, Jebel Meidob par exemple).

En fait, ces échantillons sont chacun le représentant d'une série basaltique (4.132), dont les rapports sont masqués par la couverture quaternaire :

- l'échantillon 30 appartient à la série sous-saturée de type basanite, affleurant sous forme de dykes ;
- alors que l'échantillon 8 fait partie de la série basaltique dont les affleurements sont constitués par des culots.

Il paraît donc logique de penser que toutes les différences observées (datation, nature pétrographique, gisement) sont le résultat de mises en place ou d'épanchements non contemporains.

Nous pouvons alors reconstituer les épisodes éruptifs tertiaires de la région, comme suit :

- au Miocène inférieur (Burdigalien), les dykes s'injectent dans la série gréseuse en profitant des fractures qui l'affectent (consécutives à la surrection des massifs éthiopiens ?) ;
- au Miocène supérieur (Pontien), des épanchements basaltiques ont lieu à la surface de la série nubienne et forment des culots.

Ces derniers n'affleurent pas à proximité des rivières et nous n'avons donc pas pu observer les rapports existant entre les deux séries basaltiques.

#### 4.14 PLEISTOCENE ET FORMATIONS RECENTES

##### 4.141 Le Karab

###### A. Lithologie

Au-dessus des grès et sous le plateau de Cotton-soil, existent d'épais dépôts silteux (25-40 m), de couleur brun clair à ocre, à morphologie de "bad lands", qui impriment aux rives de l'Atbara et de la Setit leur aspect raviné jusqu'à Khashm El Girba.

Ces dépôts sont dus aux épandages deltaïques de l'Atbara, de la Setit et du Gash dont le régime, au Pléistocène, était comparable au régime actuel du Gash aux environs de Kassala.

En plus du matériel silteux, ces rivières ont transporté des matériaux plus grossiers qui, sous la forme de lits de graviers ou de niveaux conglomératiques apparaissent dans la partie inférieure du Karab.

On les rencontre surtout dans le fond des khors (Es-Showak ; Zakaria) mais leur extension n'excède pas quelques dizaines de mètres.

Il ne faut pas les confondre avec le niveau des terrasses dont nous traiterons plus loin (4.143).

D'autre part, la surface du Karab est parsemée de petites concrétions calcaires (1-3 cm) engendrées par la migration et la concentration du carbonate de calcium, sous l'influence des variations climatiques (sécheresse, humidité).

###### B. Age

Le Karab, n'ayant jusqu'à notre étude fourni aucun fossile, était attribué au Pléistocène, par analogie avec les Formations de la Gézira.

Nous avons eu la chance de découvrir, en place dans le Karab, sur les sites de Burdana et de Rumela, ainsi qu'à proximité des villages de Tomat et d'Es Showak, des fossiles Lamelli-branches d'eau douce, que Mme D. PETITBOIS du Collège de France de Meudon, a pu déterminer.

Ils appartiennent au genre Etheria elliptica Lamarck - forme semilunata Lamarck - et permettent de confirmer l'âge Pléistocène de la formation.

Précisons que ces fossiles ont déjà été rencontrés lors de la construction de l'hôpital de Khartoum et à Es Shaheinab à 50 km au Nord de Khartoum (A.J. WHITEMAN, 1971 b).

Actuellement, ces bivalves vivent dans de nombreux cours d'eau d'Afrique Noire (Afrique occidentale, Zaïre, etc.) et d'Afrique Orientale (Ouganda, Ethiopie, Soudan, Egypte), et ils existent dans ces régions depuis le Pléistocène inférieur.

##### 4.142 Le Cotton-soil

###### A. Lithologie

Le Cotton-soil fait partie du groupe des argiles noires tropicales ou sols argileux foncés dont la figure 12, p. 66, représente la répartition mondiale.

Ce terrain argileux de couleur sombre, constitue la grande plaine appelée Butana, s'étendant jusqu'au Nil à l'Ouest et jusqu'à Kassala à l'Est.

Son épaisseur est assez constante et atteint une dizaine de mètres en moyenne (12 m à Khashm El Girba, 4 à 10 m à Rumela et Burdana).

Son pourcentage d'argile (montmorillonite principalement) varie entre 50 et 60 % et la fraction grossière ne comprend que quelques concrétions calcaires ("kankar") ou des fibrilles gypseuses.

Les concrétions calcaires sont généralement localisées en profondeur à environ 1 m de la surface et peuvent former un niveau blanchâtre peu épais. Cependant, dans notre région, nous n'avons observé que très rarement ce phénomène.

Du fait de sa forte teneur en argile, le Cotton-soil est très sensible aux variations climatiques. La sécheresse provoque l'ouverture de larges et profondes fentes de retrait alors que la pluie sature rapidement la couche superficielle, la rendant très plastique et glissante, d'où l'arrêt de toute circulation au cours de la saison des pluies.

Ces variations de volume sont provoquées par la montmorillonite dont les propriétés de gonflement sont très importantes et il n'est pas rare d'observer, à la limite du Karab et du Cotton-soil, de profondes cavités ou des boyaux dus à l'érosion interne.

A cet endroit, en effet, les profondes fentes de retrait du Cotton-soil atteignent la partie supérieure du Karab et, au

début de la saison des pluies, l'eau n'a aucune peine à enlever les particules silteuses du Karab.

Une fois le Cotton-soil gorgé d'eau, ce matériau cohérent et imperméable constitue une sorte de "pont" au-dessus du vide, qui peut atteindre un à deux mètres de hauteur et quatre à cinq mètres de longueur, laissé par le Karab érodé.

En saison sèche, les fentes de retrait réapparaissent et si la cohésion n'est plus suffisante, le "pont" de Cotton-soil s'écroule.

A la prochaine saison des pluies, une nouvelle cavité pourra se former par érosion interne et le cycle continuera.

### B. Origine - Age

L'origine de ces argiles noires est attribuée aux dépôts de débordement du Nil Bleu et de l'Atbara, au Pléistocène, mais il est évident que la majeure partie dérive du lessivage et de l'érosion des massifs proches, surtout des pointements basaltiques nombreux dans la région. Rappelons, en effet, que l'altération des basaltes donne de la montmorillonite.

Ces dépôts de "sheet-flood" évoluent depuis les matériaux argilo-sableux du piedmont des jebels, jusqu'aux épaisses argiles noires de Butana.

De plus, avant la saison des pluies, de violents vents de poussière appelés "habub", contribuent à déplacer d'importantes quantités de matériaux argileux et jouent ainsi un rôle non négligeable dans le remaniement du Cotton-soil.

En raison de son dépôt postérieur au Karab et en l'absence de fossiles, nous attribuerons au Cotton-soil, qui est comparable aux argiles de la Gezira, le même âge Pléistocène supérieur.

#### 4.143 Les terrasses d'alluvions anciennes

Le long de l'Atbara et de la Setit, on trouve des terrasses graveleuses qui s'étalent sur la partie inférieure du Karab et dans les khors voisins.

Elles constituent des placages facilement repérables car leur couleur grise tranche bien sur celle plus ocre du Karab et forment des plateformes dont l'excellent drainage favorise l'implantation des villages. Ceux-ci existent depuis fort longtemps comme en témoignent les sites préhistoriques découverts à Khashm El Girba et à Kubur (rive gauche de l'Atbara).

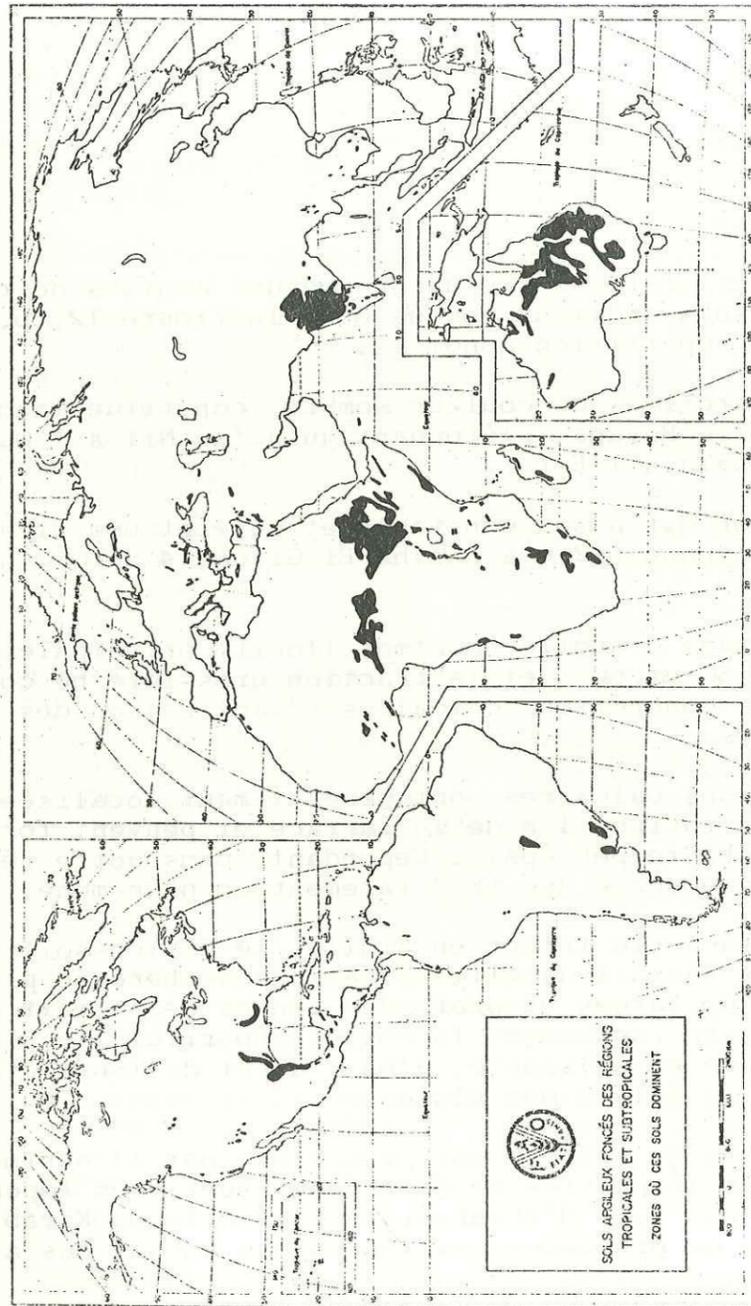


Fig. 12 Répartition mondiale des sols argileux foncés des régions tropicales et subtropicales d'après F.A.O.

Ces terrasses sont très développées en amont des sites mais leur importance diminue vers l'aval.

Origine - Age

Ces terrasses sont le résultat de la reprise du creusement au Quaternaire récent (Holocène), après la phase de remblayage Pléistocène.

4.144 Les alluvions modernes

Signalons pour terminer, les alluvions modernes constituées par :

- une terrasse de limon sableux qui correspond aux dépôts de crue. Haute de 4 à 7 m, elle s'avance plus ou moins loin dans les khors;
- les alluvions plus ou moins grossières, à forte proportion de galets de basalte, remplissant le lit des rivières sur une grande épaisseur (20 m environ).

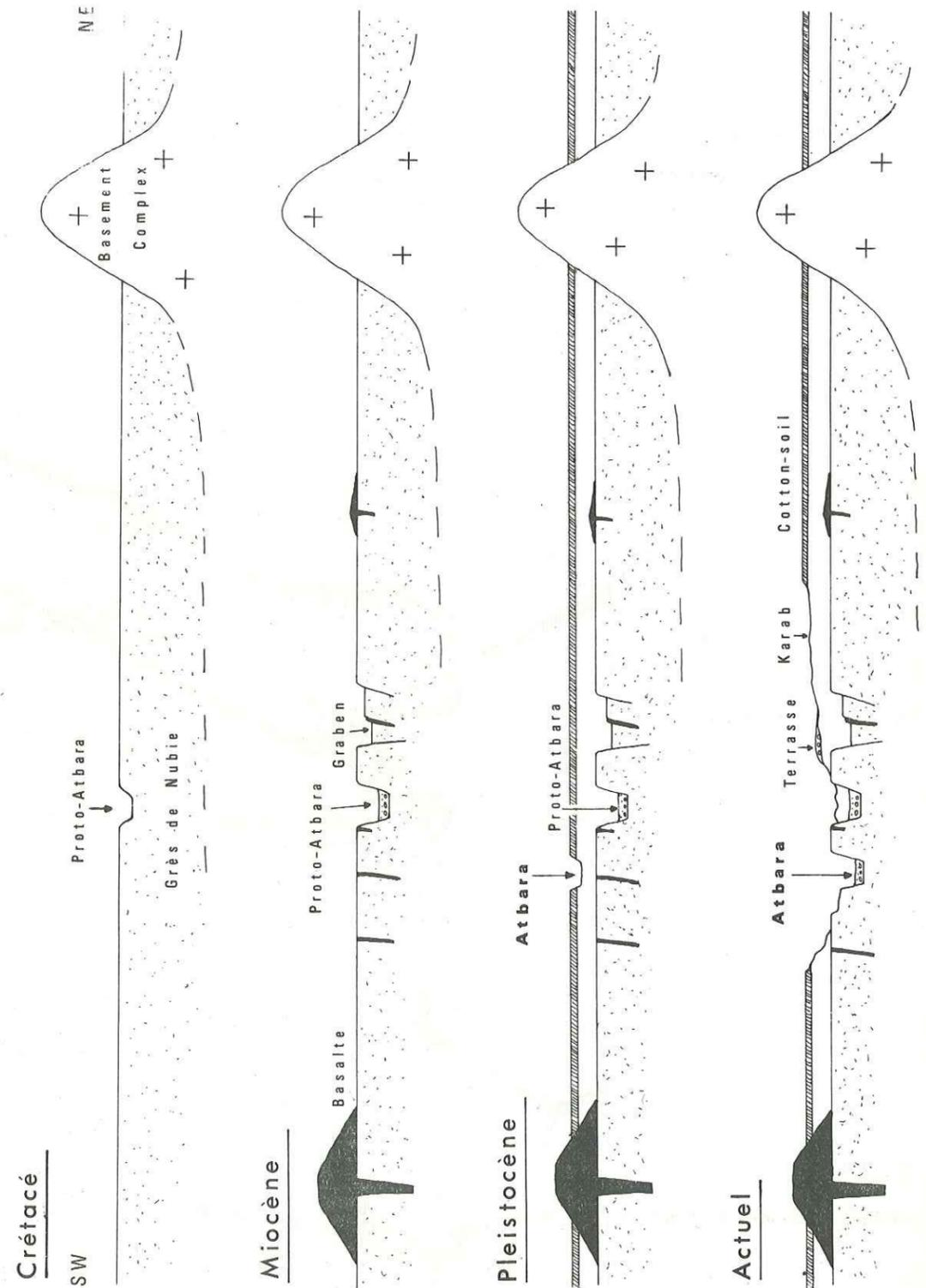
4.2 TECTONIQUE

Les principaux épisodes tectoniques de la région peuvent être reconstitués de la façon suivante (Fig. 13, p. 69) :

1. Au Crétacé, les Grès de Nubie se déposent dans une vaste zone d'épandage deltaïque, à proximité des côtes.  
Ces matériaux détritiques sont issus de la pénéplation du Basement Complex précambrien.
2. Du Crétacé au Miocène, une émerision (?) entraîne la formation d'une topographie accusée avec notamment, un réseau hydrographique différent de l'actuel (Fig. 14, p. 70).
3. Au Miocène, la montée des basaltes succède aux premiers mouvements orogéniques éthiopiens (Oligocène).

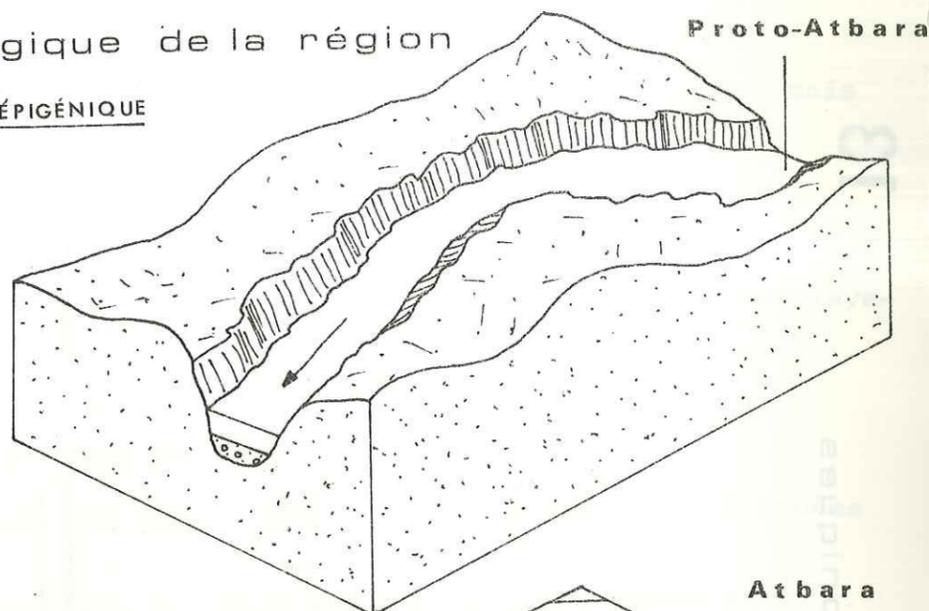
Des failles importantes affectent la série nubienne séparant des compartiments qui peuvent jouer en horsts et grabens (à Burdana, en particulier).

Schéma des différentes phases tectoniques

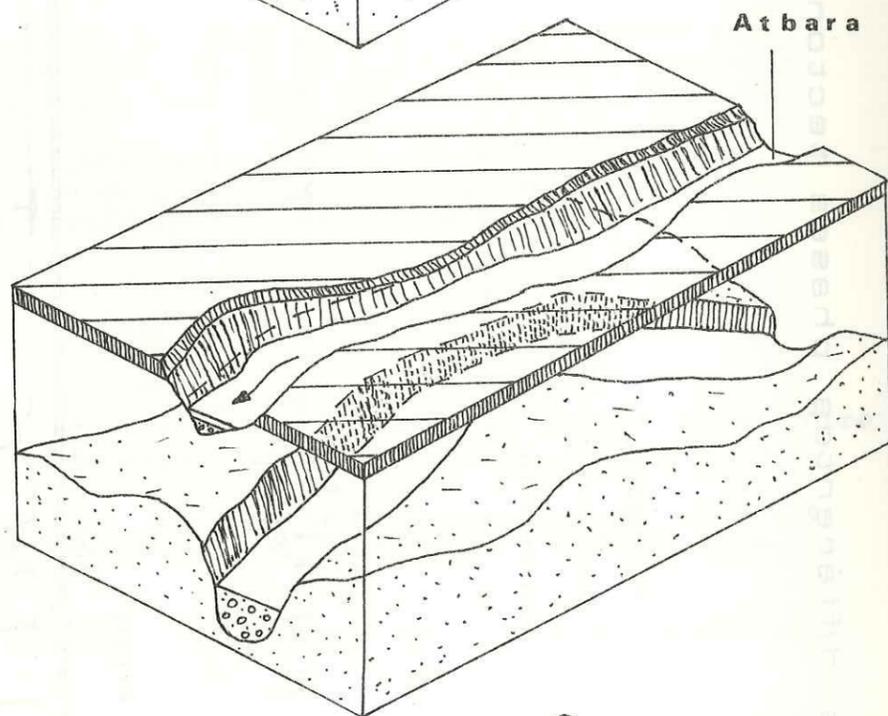


FORMATION D'UNE VALLÉE ÉPIGÉNIQUE

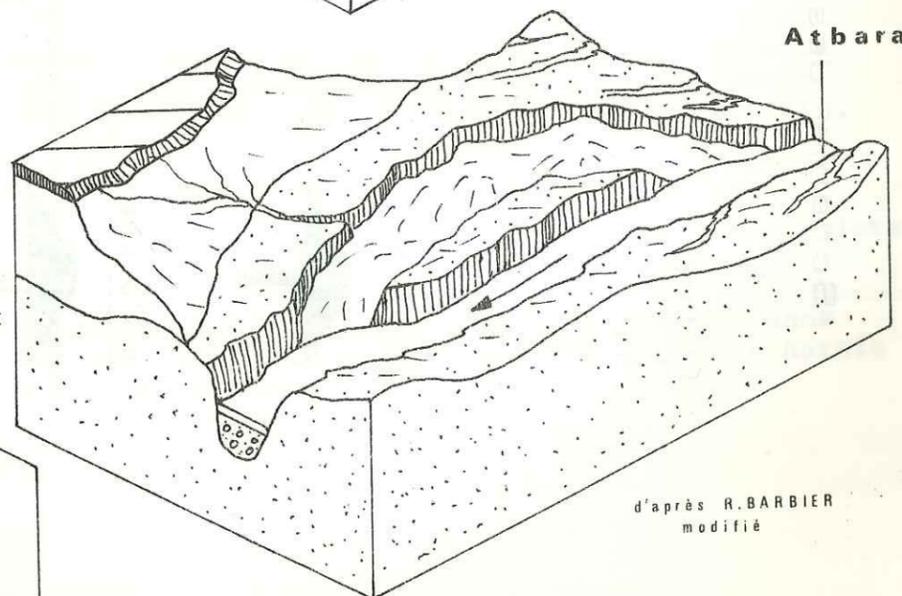
cycle d'érosion  
pré-Pleistocène



Pleistocène  
phase de remblayage



Actuel  
phase de creusement



-  Cotton soil
-  Karab
-  Grès de Nubie

d'après R. BARBIER  
modifié

Au Miocène inférieur (Burdigalien), les basaltes profitent de la fracturation générale pour s'injecter, sous forme de dykes, dans la série gréseuse.

Au Miocène supérieur (Pontien), une seconde phase éruptive crée des reliefs nouveaux (Jebel Wad Ummar, par exemple).

4. La phase déterminante pour la géomorphologie de la région a lieu au Pléistocène, où, à la suite de l'érosion des premiers massifs éthiopiens, un important remblayage de matériaux meubles (Karab, Cotton-soil) enterre l'ancienne topographie dont seuls quelques inselbergs subsistent.

5. Au Quaternaire, une nouvelle phase de creusement provoque l'installation progressive du réseau hydrographique actuel.

Au cours de ce creusement, se produit un temps d'arrêt, avec remblayage momentané, qui entraîne le dépôt de terrasses d'alluvions anciennes (Fig. 13, p. 69).

Ce creusement épigénique retrouve localement des points de l'ancienne topographie (sites de barrage) et recoupe d'anciennes vallées remblayées.

4.3 SEISMICITE

Comme nous l'avons vu plus haut, cette région a subi le contre-coup du soulèvement éthiopien et il est possible que même actuellement, des mouvements sporadiques aient lieu.

Or, la construction d'un barrage nécessite de connaître les dangers sismiques afin d'en tenir compte pour la stabilité de l'ouvrage.

En ce qui concerne les intensités maximales des séismes soudanais, d'après les ouvrages fondamentaux de B. GUTENBERG et C.F. RICHTER (1953), et de J.P. ROTHE (1969), la liste des tremblements de terre survenus entre 1904 et 1965, dans la région comprise entre les 3° et 18° parallèles Nord et les 22° et 39° méridiens Est donne :

27. 2. 1913	17 1/2 N	39 E	5 3/4
27. 3. 1913	16 1/2 N	39 E	5 1/2
23. 9. 1915	16 N	39 E	6 3/4
21. 9. 1921	14 N	39 E	5.3 à 5.9

25.	8.	1906	9 N	39 E	6 3/4
14.	7.	1960	7.2 N	38.5 E	5.3 à 5.8
4.	10.	1928	7 N	38 E	6
21.	5.	1915	6 N	31 E	6.6
16.	9.	1913	6 N	36 1/2 E	6.2
6.	9.	1944	6 N	38 E	6
30.	6.	1954	5.8 N	37.3 E	6
4.	2.	1955	5.8 N	36.6 E	5.5
30.	11.	1937	5 N	36 E	6 1/4
9.	7.	1912	3 N	33 E	6 3/4

Tous les séismes mentionnés sont superficiels (foyers situés à moins de 70 km de profondeur).

Si l'on se réfère à la carte de G. DUBOURDIEU (1973), compte tenu du fait que le site d'Es Showak est très voisin d'un carré vert de cette carte, il semble prudent de fixer "l'intensité maximale probable" d'un séisme à 6.4 (zone de faible sismicité).

## CHAPITRE 5

### CONDITIONS GEOLOGIQUES DU PROJET

5.1.1 Le site de Burdana

5.2 Le site de Rumela

5.3 La Fashaga

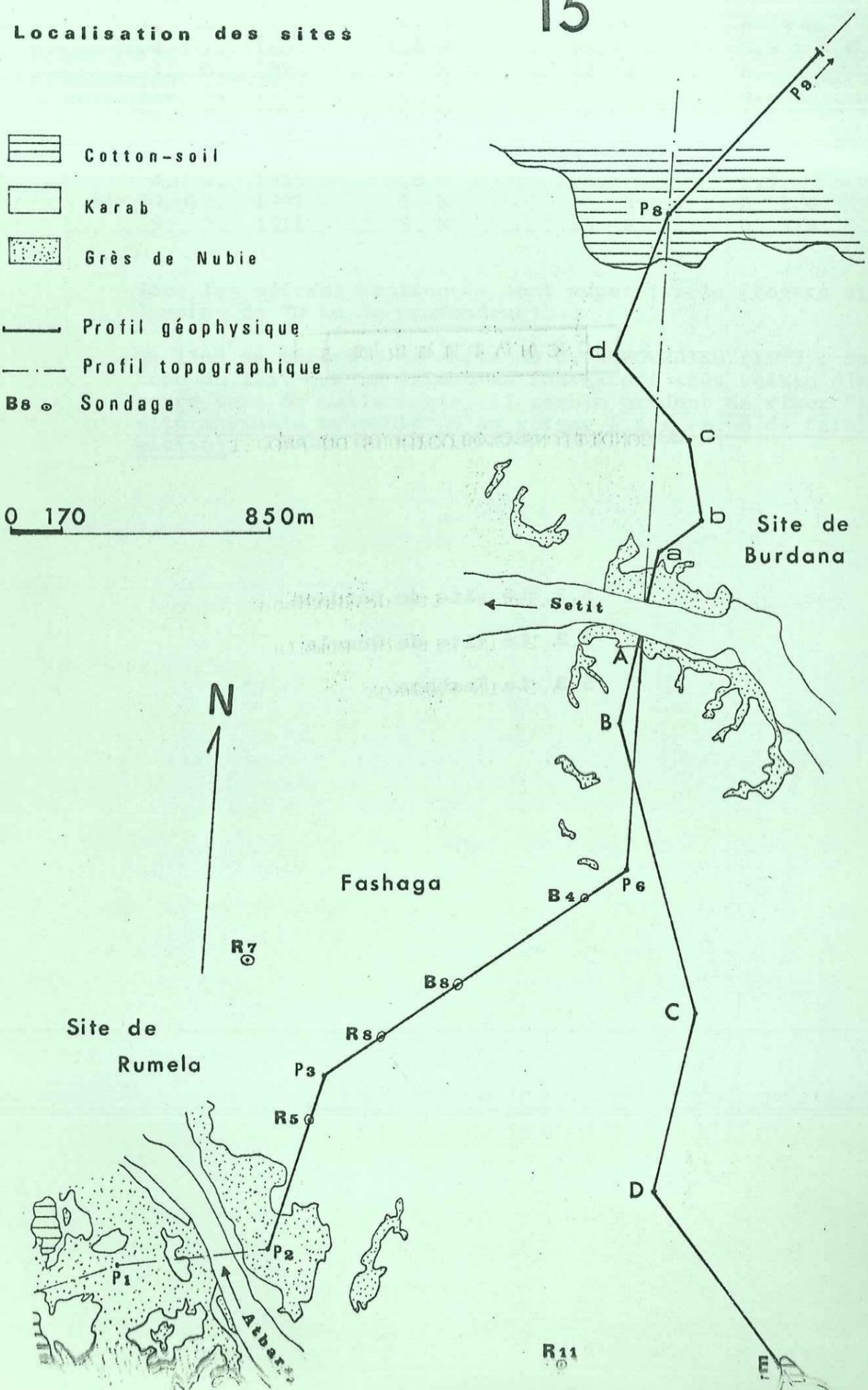
15

Localisation des sites

-  Cotton-soil
-  Karab
-  Grès de Nubie

-  Profil géophysique
-  Profil topographique
-  B.S. Sondage

0 170 850m



Le schéma général du projet (Fig. 15, p. 74) se présente comme un barrage double constitué par deux barrages reliés par une digue centrale. Ils sont localisés respectivement au site de Rumela sur l'Atbara et au site de Burdana sur la Setit.

Dans le cas de l'ouvrage hydraulique qui nous intéresse, chaque site est un cas particulier ainsi que la zone comprise entre eux que l'on nomme la Fashaga.

C'est pourquoi, nous allons traiter séparément l'étude des sites de Burdana, de Rumela et de la Fashaga.

5.1 LE SITE DE BURDANA (Fig. 16, p.76 et 17, p. 77)

Le site de Burdana est une gorge d'environ 180 m de large et 400 m de long, taillée par la Setit dans les Grès de Gedaref.

Les falaises ont une hauteur d'environ 20 m et montrent une alternance de bancs horizontaux de grès et de mudstones.

Les alluvions du lit de la rivière sont constituées essentiellement de galets de basalte, atteignant probablement une vingtaine de mètres d'épaisseur.

Méthode de travail

L'étude géologique a été effectuée avec des moyens de fortune, surtout en ce qui concerne la cartographie.

Après l'établissement de coupes de surface, nous avons procédé à un levé géologique de détail à l'échelle du 1/2.000 et du 1/7.100 (Fig. 16, p. 76), sur des photos aériennes agrandies.

En l'absence de carte topographique correcte, nous avons été obligés de coter nous-mêmes certains points de la photo par référence à des points connus, soit à l'altimètre, soit à l'aide de nivellements sommaires au clisimètre.

Les erreurs commises en plan ne sont sans doute pas considérables, la qualité de la photo étant suffisante, et les points de repère assez nombreux. En altitude, nous ne pensons pas avoir commis d'erreur supérieure à deux mètres en moyenne.

Les sondages n'ont fourni que peu d'indications sur les terrains traversés car leur pourcentage de carottage était généralement faible.

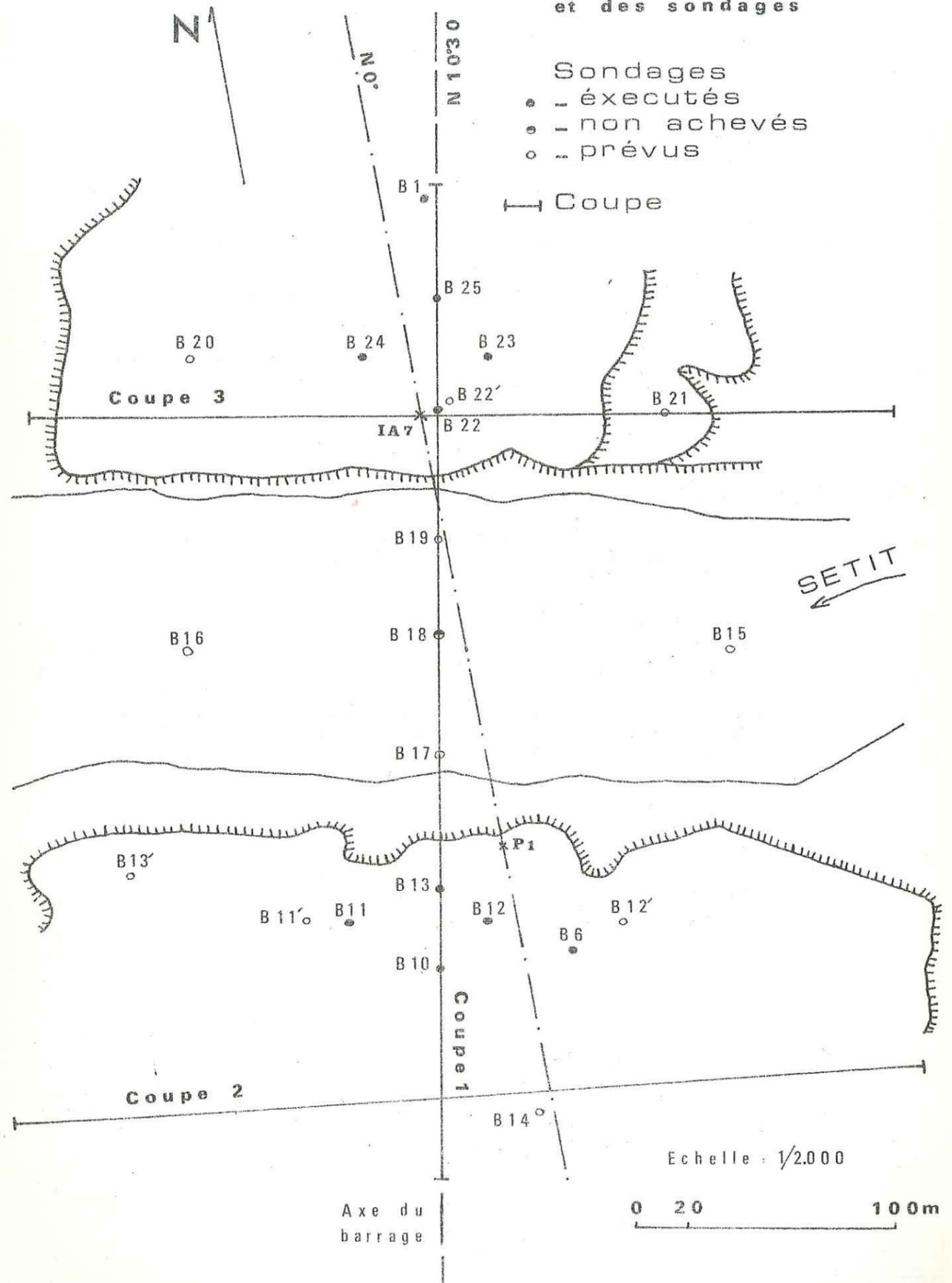
Ces sondages étaient effectués à rotation, mais l'emploi

SITE DE BURDANA

Localisation des coupes et des sondages

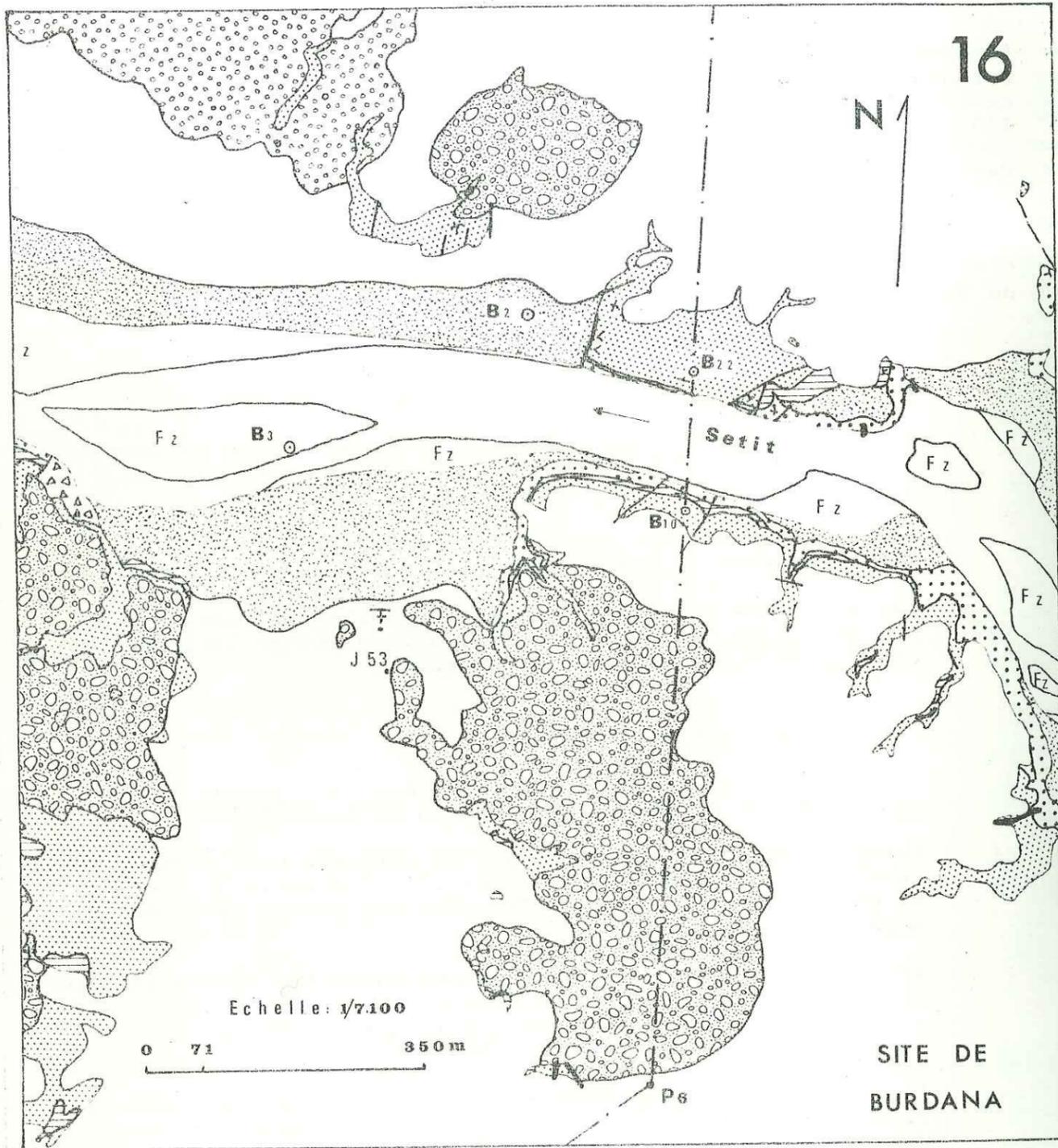
- Sondages  
 ● - exécutés  
 ○ - non achevés  
 ○ - prévus

┌─ Coupe



Echelle: 1/2.000

0 20 100m



Echelle: 1/7.100

0 71 350m

SITE DE BURDANA

LÉGENDE

- |                           |                           |                |
|---------------------------|---------------------------|----------------|
| Fz Alluvions récentes     | Grès de Nubie             | Eroulement     |
| Limon                     | Grès supérieur            | Glissement     |
| Graviers superficiels     | Mudstone                  | Eboulis        |
| Graviers exploitables     | Grès intermédiaire        | Faille         |
| Cotton-soil               | Grès en gros bancs        | Pendage        |
| Karab                     |                           | Sondage        |
| <b>Activité tertiaire</b> | Ancienne vallée remblayée | Echantillon    |
| Dykes basaltiques         | Gisement fossilifère      | Axe du barrage |
|                           |                           | Peg            |

d'un carottier simple, une forte circulation d'eau et une vitesse d'avancement élevée ont réduit en sable les carottes de grès déjà très friables.

C'est donc un ensemble d'indications fournies par chaque sondage qui permet d'interpréter la suite des coupes déjà levées.

5.11 COUPES LITHOLOGIQUES

Nous avons précisé (4.121) que, d'après la morphologie du site, la série gréseuse peut être divisée en trois ensembles :

- les Grès grossiers en gros bancs, à la base ;
- les Mudstones et les grès intermédiaires ;
- les Grès supérieurs.

5.111 Coupe de référence C<sub>1</sub> (Fig. 18, p. 79)

Cette coupe est située en rive droite, à 50 m à l'aval de l'axe. Nous distinguons de bas en haut :

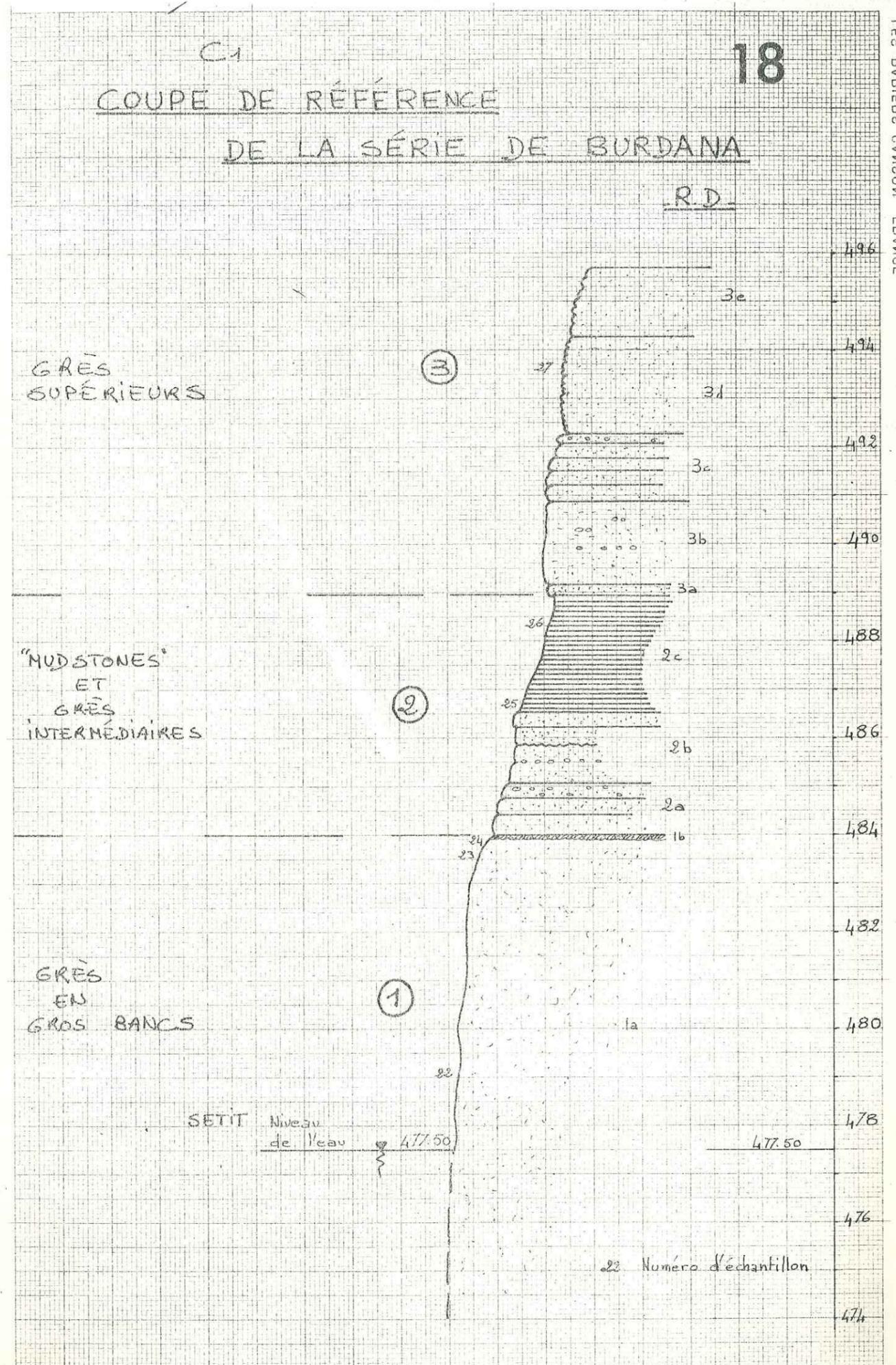
les Grès en gros bancs

Il s'agit d'un niveau extrêmement épais (plus de 10 m) d'un grès moyen, massif, dépourvu de stratification. La patine est claire et ce banc est très visible dans le paysage du site dont il forme pratiquement le soubassement. Sur la coupe de référence, seuls les 4 mètres supérieurs apparaissent et il faut aller vers l'amont pour observer ce niveau remarquable dans sa quasi-totalité.

A noter que la partie supérieure de ces grès montre assez fréquemment des granulations sphériques rappelant des pisolithes et qui nous ont servi de repère. En outre, ce banc est surmonté de façon assez régulière par une couche plus ou moins régulière de grès ferrugineux rouge (1b).

les Mudstones et les Grès intermédiaires

2a 3 strates de grès grossiers ou très grossiers, micro-conglomératiques à grains très anguleux et forte porosité. La teinte d'ensemble est rougeâtre (épaisseur : 1.10 m).



2b Ensemble hétérogène de grès bien lités, rubannés et microconglomératiques. Le grain est fin à très fin vers la base, plus grossier au sommet (épaisseur : 1.40 m).

2c Il s'agit en réalité de niveaux de grès très fins, friables et la proportion d'argile apparaît très faible. En surface quelques passées prennent une teinte violette (épaisseur mesurée : 2.40 m).

les Grès supérieurs

Epaisseur visible : 6 à 7 mètres.

Il s'agit du ressaut sommital qui montre les subdivisions suivantes :

- 3a Mince niveau de grès moyen rougeâtre à fines passées gréseuses blanches.
- 3b Banc massif de grès grossier ou moyen à passées conglomératiques - Litage entrecroisé - Croûtes rubéfiées vers la base (épaisseur : 1.60 m).
- 3c Grès très grossier friable, aux formes émoussées - Le litage est bien marqué (épaisseur : 1.35 m).
- 3d Banc massif de grès grossier. Patine rougeâtre. Présence de croûtes ferrugineuses. Niveau de microconglomérat à la base (épaisseur : 2 m).
- 3e Grès grossier à patine rousse avec passée de microconglomérat (épaisseur : 1.40 m).

5.112 Coupe complémentaire

La coupe de référence précédente nous a permis de mettre en évidence la succession lithologique des rives de la Setit, soit une épaisseur totale de terrain de 16 à 18 m. Etant donné l'horizontalité des couches, il est impossible, au site même, de compléter la succession des terrains, tant vers le haut que vers le bas.

Les couches sous-jacentes aux grès en gros bancs nous intéressent pourtant au premier chef puisqu'elles constitueront l'assise même du barrage.

Nous avons pu observer une partie de ces terrains en des points plus éloignés de l'axe, grâce à des dispositions structurales favorables, mais ces observations n'ont jamais porté que sur des épaisseurs réduites.

Il nous faudra donc recourir aux sondages de reconnaissance pour établir plus précisément la succession des couches, en particulier sous le lit de la Setit.

La coupe amont rive droite

La rive droite à l'amont de l'axe est constituée essentiellement par la masse horizontale des grès en gros bancs qui, à eux seuls, constituent toute la rive.

En suivant celle-ci, on peut observer vers l'embouchure du premier khor amont, une diminution stratigraphique de l'épaisseur des grès en gros bancs et l'apparition des niveaux sous-jacents.

Nous avons pu mesurer dans ce secteur la coupe suivante :

- . grès en gros bancs..... épaisseur : 3.25m
- . couche de mudstone inférieure..... épaisseur : 2.60m
- . niveau de grès..... épaisseur : 1 m visible

Ainsi, les grès en gros bancs du site reposent-ils sur une couche de mudstone plus nettement argileuse, puis sur un niveau de grès.

Cette observation est à rapprocher de la coupe du sondage B<sub>13</sub> qui indique, sous les grès en gros bancs :

- . mudstone grise..... épaisseur : 4.50m
- . grès grossier clair..... épaisseur : 3.50m

puis une succession de niveaux de mudstone et de grès qui complètent bien notre coupe.

5.113 Coupe synthétique de l'ensemble des terrains intéressant le site de Burdana

Nous pouvons résumer ce qui précède de façon schématique en indiquant la succession probable des faciès avec estimation de leur cote au niveau de la coupe de référence (50 m à l'aval de l'axe en R.D.).

Nous pouvons estimer, au point indiqué ci-dessus, la succession générale suivante :

- 500 à 497 : Mudstones
- 497 à 489 : Grès
- 489 à 486 : Mudstones
- 486 à 483 : Grès

- 483 à 472 : Grès en gros bancs
- 472 à 467 : Mudstones
- 467 à 463 : Grès
- 463 à 461 : Mudstones
- 461 à 454 : Grès
- 454 à 452 : Mudstones

Grès

5.114 Les variations d'épaisseur des différents niveaux

Les couches de mudstones sont particulièrement affectées par les variations de puissance, ce qui est particulièrement net si l'on se réfère au tableau ci-après.

Ensembles lithologiques	Position des coupes				
	Extrême amont	Amont	Axe (sondage B <sub>13</sub> )	Coupe de référence	Extrême aval
Grès sup.		4 - 6m		7 - 8 m	7m
Mudstones et grès interm.		8m	8m	5m	1.60
Grès en gros bancs	3.50m	12m	11m	11m	?
Mudstones inférieures	2.60m	non observées	5m	non observées	non observées

5.12 LA STRUCTURE DU SITE

Nous distinguerons deux échelles :

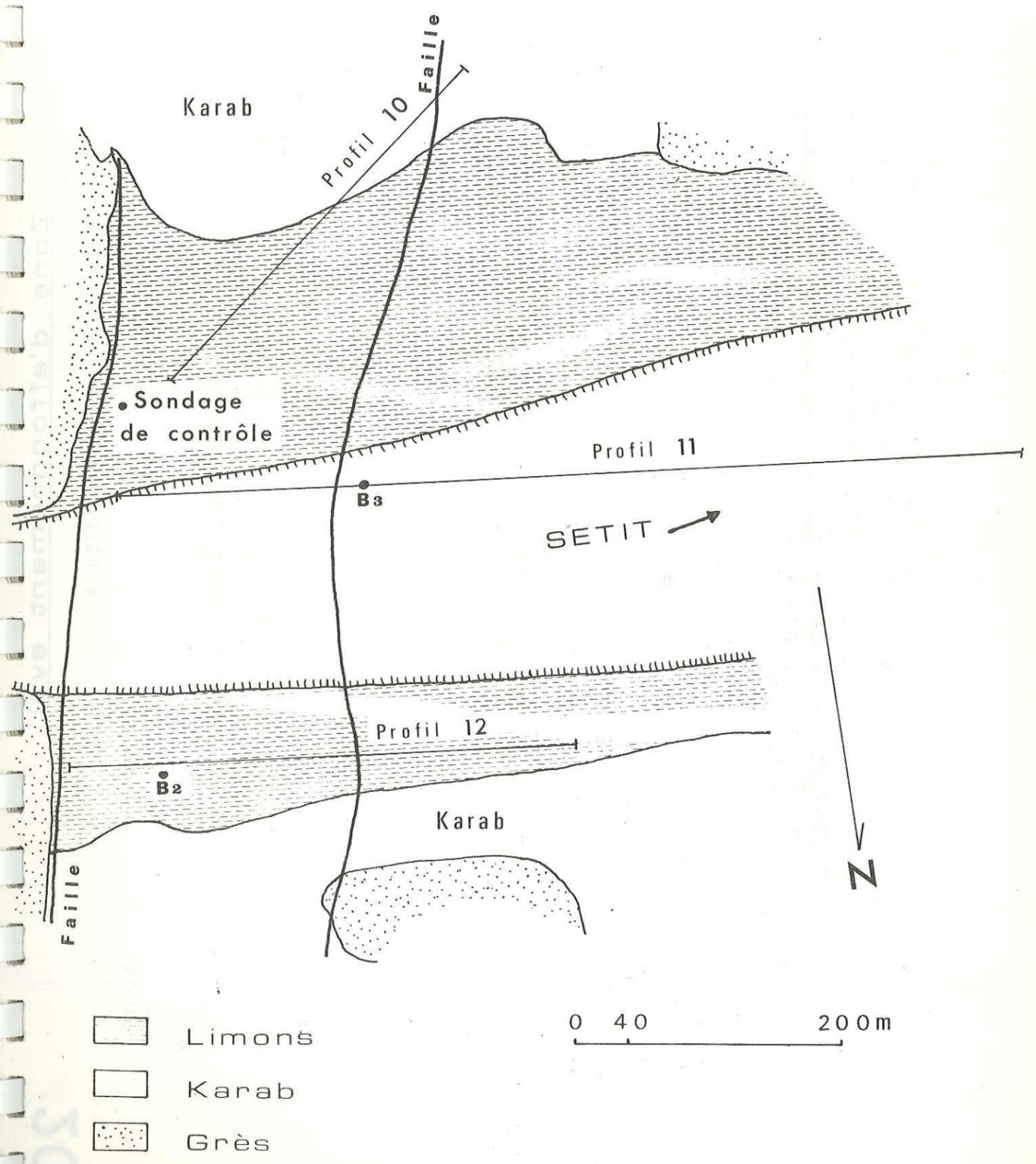
- l'échelle "régionale" englobant les terrains situés aux alentours du site : 1 km de part et d'autre de l'axe, et de même, 1 km de part et d'autre de la rivière ;
- l'échelle du "site", c'est-à-dire la zone d'emprise de l'ouvrage lui-même.

5.121 La structure régionale

• La zone d'effondrement aval (Fig. 19, p.83 et 20, p. 84)

Zone d'effondrement aval

Localisation des profils géophysiques



A l'extrémité aval de la gorge de la Setit, les grès disparaissent brusquement sur les deux rives. Leur fait suite une dépression remplie de limons de débordement et de cailloutis, la dépression de Burdana.

Les profils géophysiques montrent que cette disparition des grès est probablement due à une grande fracture (F<sub>1</sub>) qui abaisse le compartiment Burdana par rapport à celui du site lui-même.

Il est curieux de noter, qu'à ce compartiment effondré correspond une véritable petite fosse de comblement alluvial, puisque, dans le secteur de Burdana, il a été rencontré de 25 à 30 m de cailloutis alluviaux au-dessus du bed-rock, selon l'interprétation de la géophysique. De ce fait, un sondage de reconnaissance B<sub>2</sub>, implanté en rive droite à l'amont de Burdana, a traversé 25 m de graviers et cailloutis sans toucher le bed-rock.

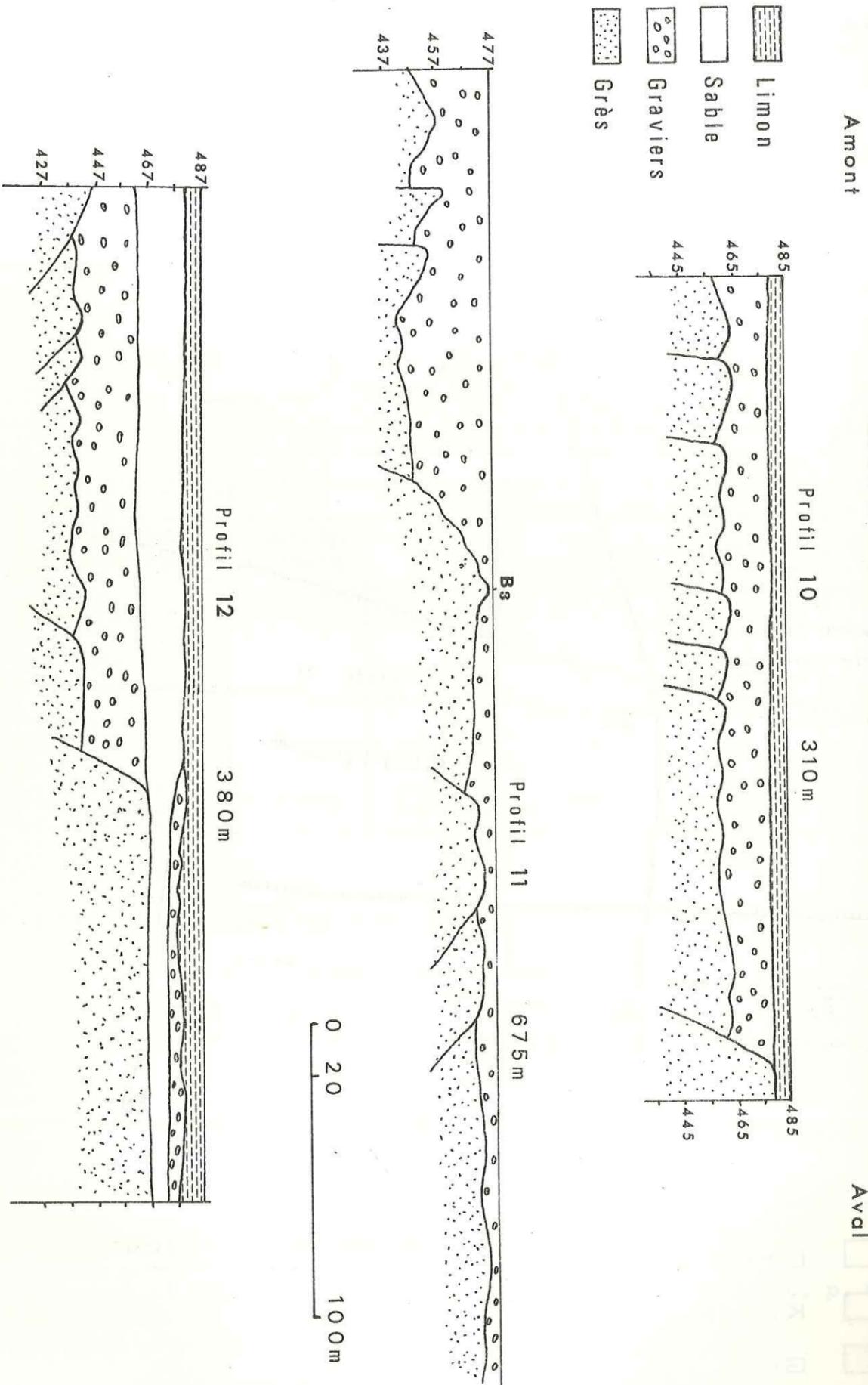
Précisons qu'en rive gauche, cette faille a découpé un compartiment qui est actuellement masqué sous les limons.

Un sondage de contrôle et un profil géophysique situés en aval de la faille, ont permis de vérifier que la série nubienne se trouvait à environ 10 m sous le niveau des limons, c'est-à-dire à la cote 476.

Le système de failles au large rive droite

L'examen sur photographies aériennes du secteur de la Fashaga montre très clairement une curieuse linéation qui joint, depuis Rumela, la rive droite de l'Atbara à la rive gauche de la Setit, en aval du site de Burdana, à peu près en face de Burdana. Cette linéation pourrait correspondre à une importante zone de fracture dont l'orientation se trouverait aux alentours de N 45° - N 50° (ce qui est une direction connue sur le site). Il est à noter que la présence de cette linéation coïncide curieusement avec un double décrochement "en baïonnette" du tracé des cours de l'Atbara et de la Setit.

Par ailleurs, à l'amont du site de Burdana, la Setit suit un tracé parfaitement rectiligne d'orientation N 140° qui s'infléchit brusquement selon une nouvelle direction, rectiligne également (à N 100°), au site même. Le changement de direction s'accompagne d'une anse marquée en rive droite de la Setit, 300 m environ à l'amont de l'axe du barrage. Or, dans tout ce secteur, nous connaissons des fractures présentant les deux orientations. Nous avons noté en particulier un véritable "prédécoupage" des bancs de grès massifs qui constituent la rive droite à l'amont de l'axe, selon la direction N 100°, responsables de l'écroulement



BURDANA

Amont

Profils géophysiques

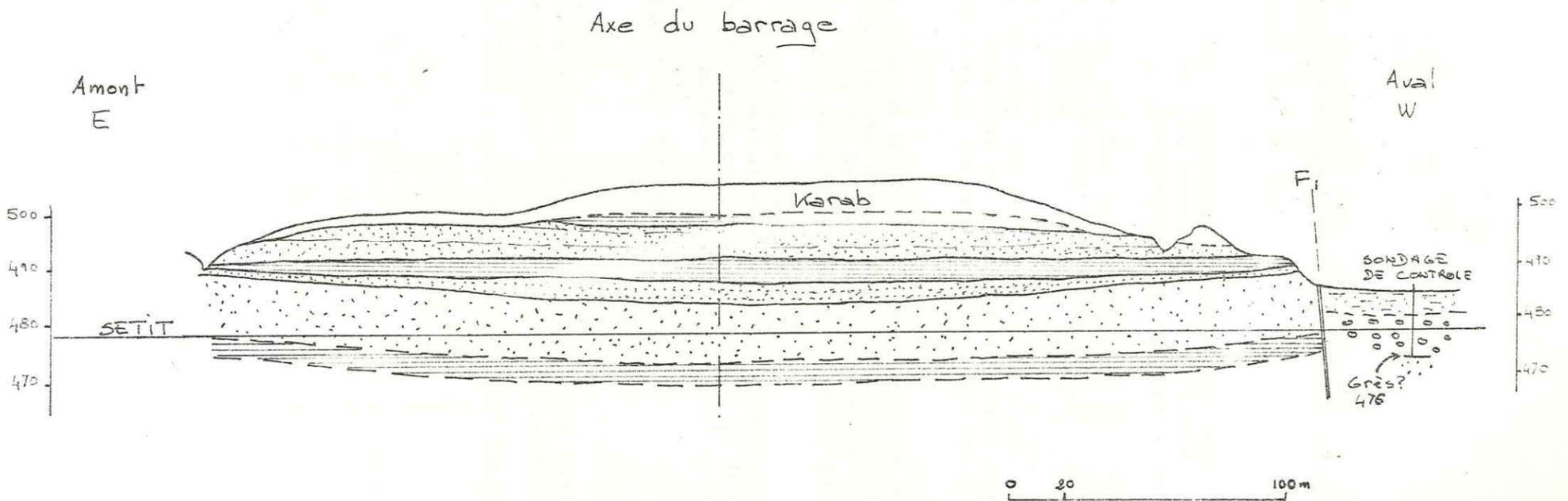
Zone d'effondrement aval

Aval

20

Coupe géologique de la rive gauche C2

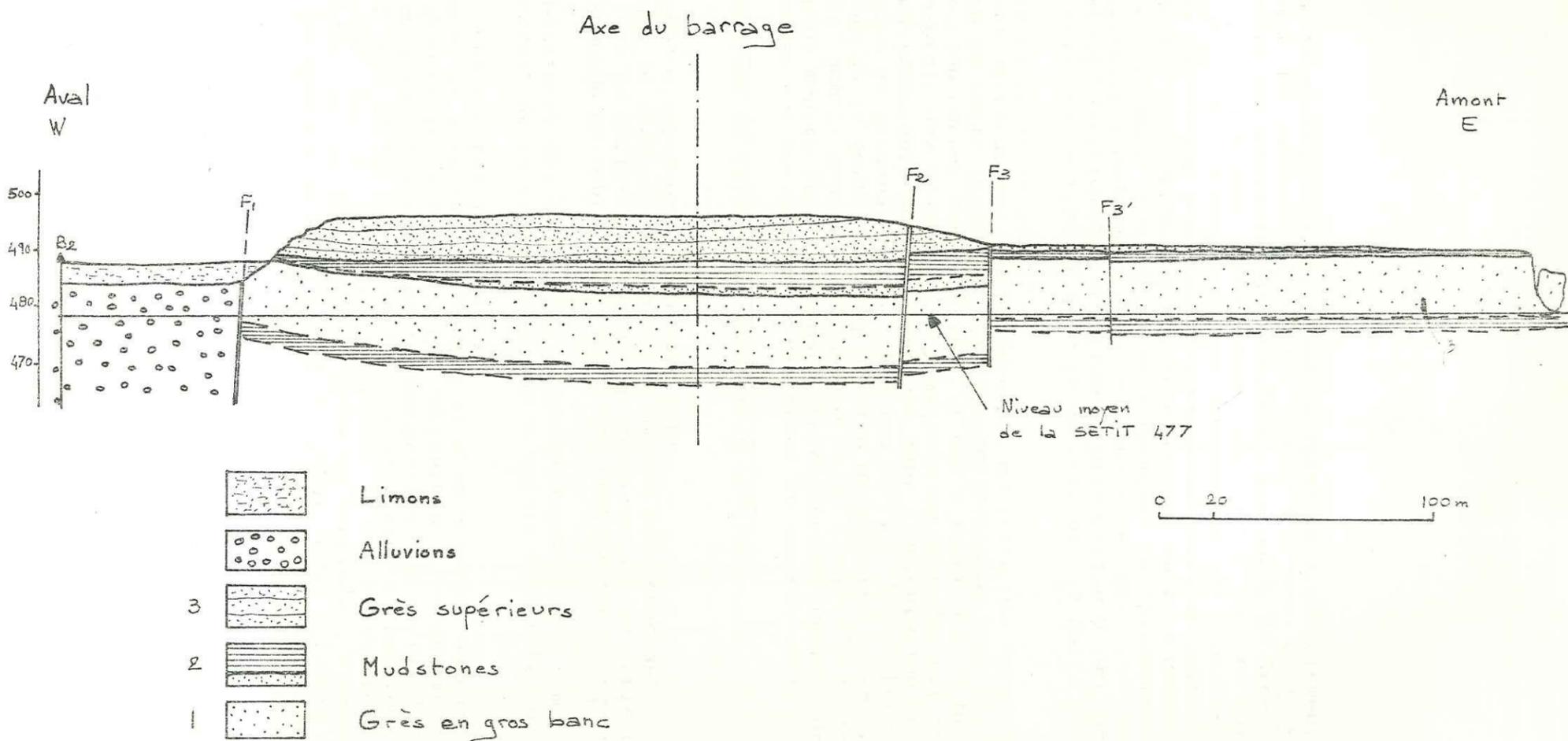
Echelle 1/2.000<sup>e</sup>



Légende: voir coupe géologique rive droite

Coupe géologique de la rive droite C3

Echelle 1/2.000<sup>e</sup>



de blocs gigantesques basculés sur la berge du fleuve. Le tracé du cours de la Setit pourrait donc être orienté, dans le secteur considéré, par deux systèmes de fractures de direction N 100° et N 140°.

Si cela est presque prouvé pour la direction N 100°, comme nous le montrerons au paragraphe suivant, la certitude est moindre en ce qui concerne la direction N 140°.

Si cela était, il pourrait ainsi s'établir un relais de fractures entre les failles N 50° et N 140° en rive droite du site de Burdana dans la zone couverte par le Karab qui échappe en fait à toute observation directe. Cependant, la géophysique a retrouvé au voisinage du sondage B<sub>1</sub> le passage de la grande fracture N 50°.

5.122 La structure du site (Fig. 21, p. 86, 22, p. 88 et 23, p. 89)

La structure géologique, au site même, est simple. Les couches de grès et de mudstones sont horizontales et affectées de quelques fractures.

• La coupe 3 (Fig. 21, p. 86)

La rive droite, montre, outre la faille F<sub>1</sub> d'effondrement déjà mentionnée, deux cassures F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub>. La plus importante est la faille F<sub>3</sub> (orientée à N 30°) qui provoque un abaissement de 5 m du compartiment aval.

L'existence de ces fractures ne pose pas de problème particulier si ce n'est au niveau de l'étanchéité par les possibilités de circulation créées par l'intersection avec d'éventuelles fractures de direction différente (N 100° par exemple).

Il paraît à peu près certain que les failles F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub> de la rive droite traversent la Setit et qu'elles déterminent deux petits khors en rive gauche. Mais nous avons également établi l'existence d'une fracture orientée N 98° (F<sub>5</sub> de la coupe 1) au large en rive gauche, retrouvée par géophysique au niveau de l'axe du barrage, qui peut recouper les accidents précédents (ou bien être recoupée par eux).

Quelle que soit l'éventualité, il s'établit un maillage géométrique entre les fractures qui se recoupent et le litage de la roche, très favorable aux infiltrations.

• La coupe 1 (Fig. 23, p. 89)

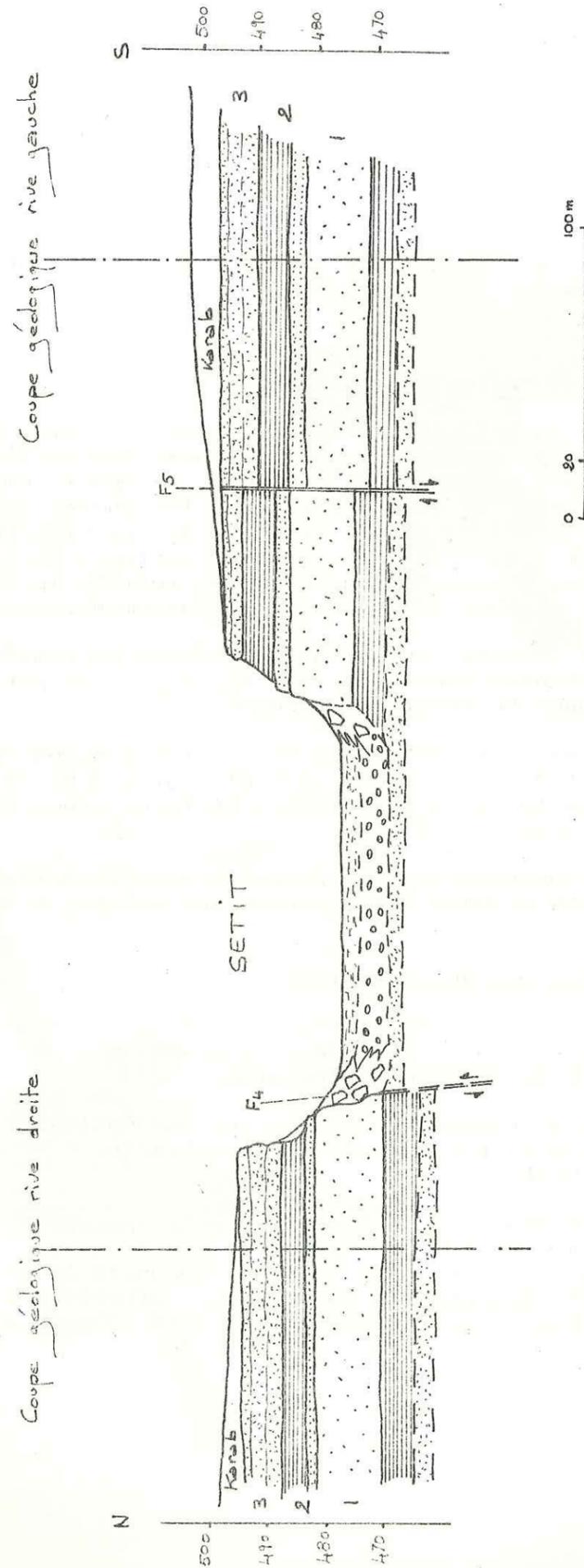
Montre une différence de cote nette entre le toit des grès en gros bancs en rive droite (environ 484 m) et le même

23

Profil géologique suivant l'axe du barrage C1

Echelle 1/2.000

BURDANA



Légende: voir coupe géologique rive droite  
Les formations non numérotées sont interprétées d'après les sondages

niveau en rive gauche (cote 488 environ). Cette impression ressort du reste assez bien à l'examen du site. Il nous paraît logique, malgré la faiblesse de ce décalage, d'admettre l'existence d'une fracture d'origine tectonique, d'orientation N 100° située quelque part sous le lit de la rivière, probablement vers la rive droite.

En surface, toute une fracturation de direction similaire existe, et notamment les grands clivages qui ont "prédécoupé" les blocs parfois gigantesques effondrés sur les berges de la Setit.

. Fracturation (Fig. 24, p. 91)

Une caractéristique générale de la région semble bien être la dépendance du dessin du cours des vallées à l'égard des grands accidents du bed-rock. L'aspect comparé des tracés de la Setit et de l'Atbara, sur les photos aériennes, est très parlant à ce sujet. Le cours de ces rivières, essentiellement constitué dans certains secteurs de tronçons rectilignes, d'orientation variable, reflète le dessin de certaines des grandes fractures du soubassement.

Sur le site, ces grands accidents se manifestent par d'importantes fractures (F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub>...) et par deux dykes basaltiques en amont rive droite.

Le maillage des blocs est variable selon les terrains rencontrés ; les blocs sont plus gros dans les gros bancs que dans les grès supérieurs, certains blocs écroulés dépassant largement 20 m.

Les orientations principales des discontinuités sont N 150° N 10° N 70° et les orientations annexes N 30° N 130°

. Épaisseur des alluvions

Les rivières de la région érodent les montagnes éthiopiennes et, en entrant dans la grande plaine soudanaise, déposent le matériel transporté.

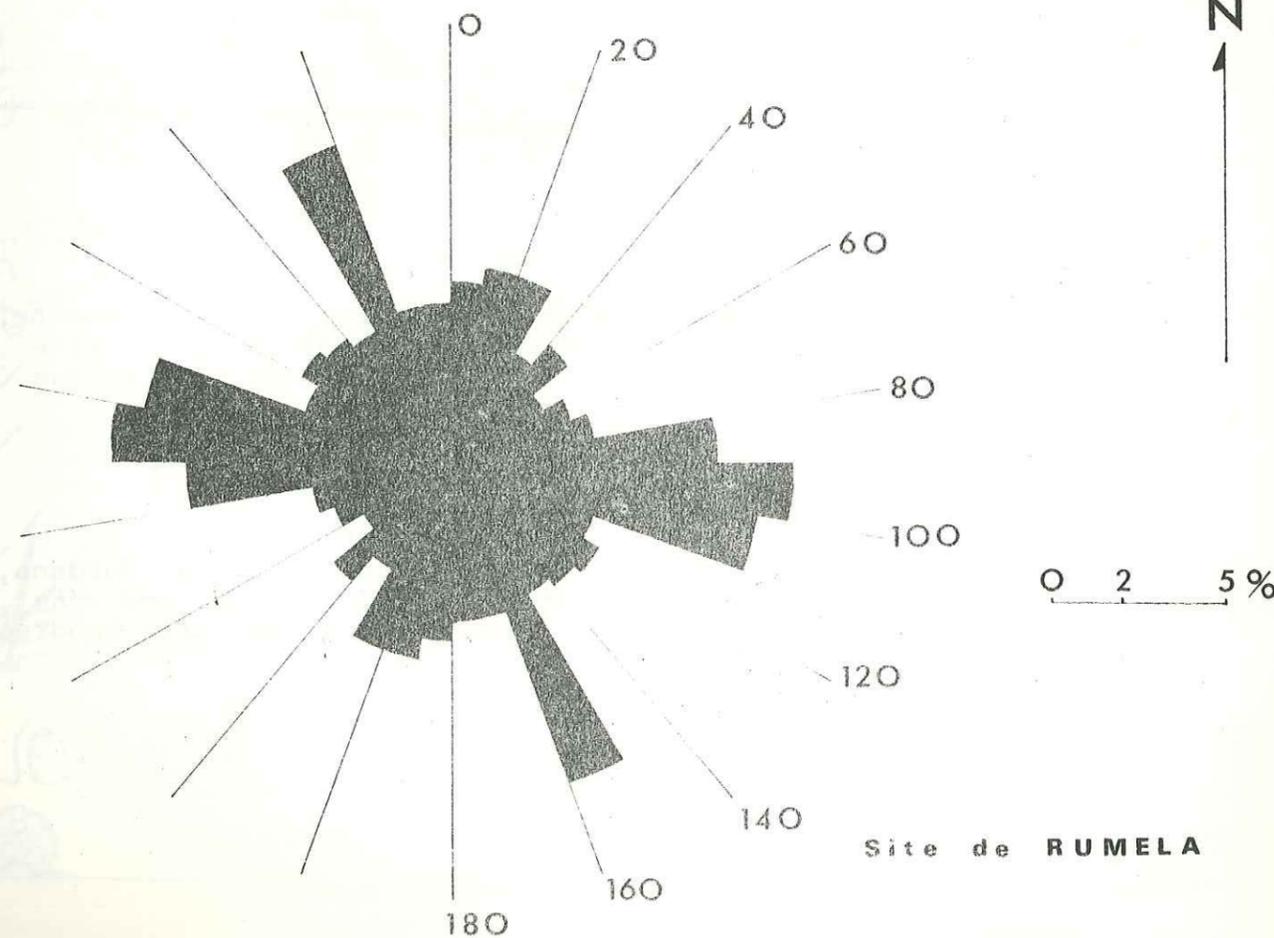
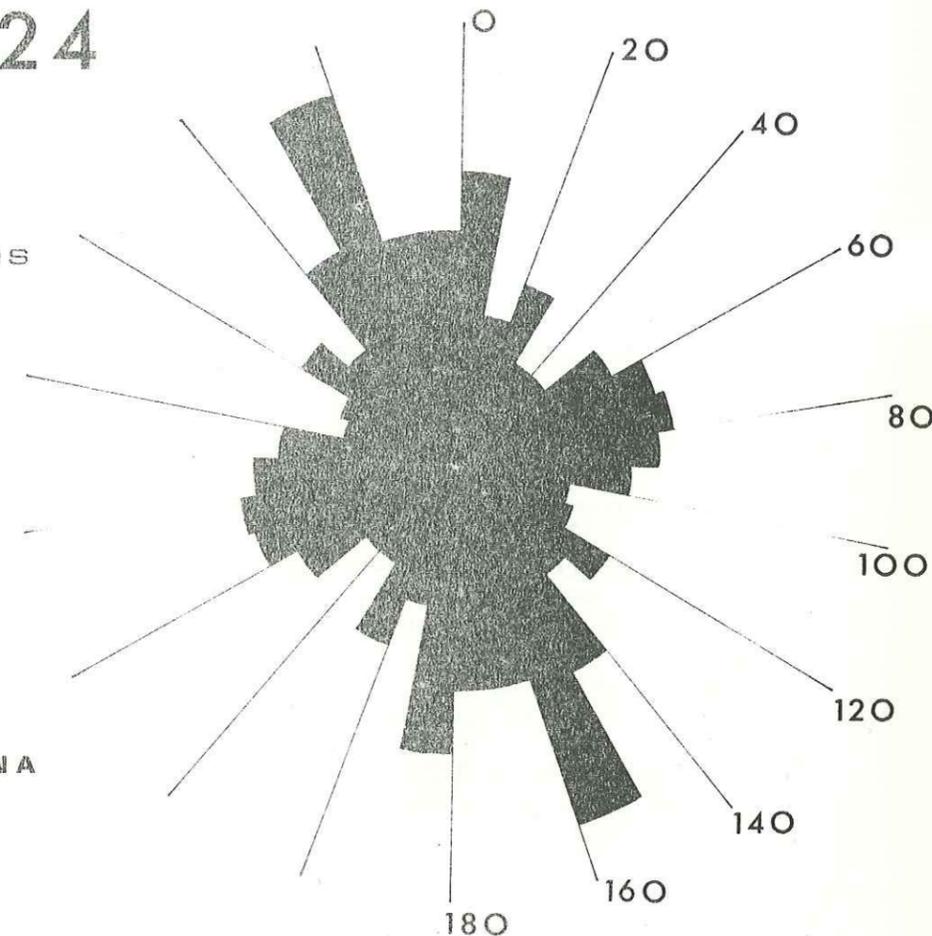
Les alluvions accumulées ont une épaisseur importante et à Kassala, par exemple, celle-ci atteint 60 m dans le delta du Gash.

A Burdana, on peut estimer leur épaisseur à une vingtaine de mètres car, d'une part, le sondage B<sub>18</sub> s'est arrêté à 13.8 m (46 ft), sans avoir rencontré le bed-rock, d'autre part, les profils géophysiques effectués à l'aval du site indiquent un remplissage de 20 à 30 m en moyenne (5.121).

24

Diagrammes de répartition des différentes fractures

Site de BURDANA



Site de RUMELA

Précisons que ces alluvions sont essentiellement constituées de galets de basalte et que les seuls sondages susceptibles de les traverser doivent être effectués en percussion.

5.2 LE SITE DE RUMELA (Fig. 25, p. 93 et 26, p. 94)

Le site de Rumela est une gorge relativement étroite, d'environ 100 m de large, taillée par l'Atbara dans les Grès de Gedaref.

Les falaises, hautes d'une vingtaine de mètres, sont très fracturées et montrent une alternance de bancs horizontaux de grès et de mudstones coupés par des dykes basaltiques.

D'après les profils géophysiques effectués, le lit de la rivière serait rempli par environ 25 m d'alluvions, principalement des galets de basaltes.

La méthode de travail est identique à celle appliquée à l'étude du site de Burdana.

Nous avons établi des coupes de surface et effectué une cartographie du site au 1/3.200 et au 1/7.100 (Fig. 25, p. 93).

5.21 COUPES LITHOLOGIQUES

La structure de la région étant tabulaire, nous retrouvons les trois ensembles individualisés à Burdana, soit :

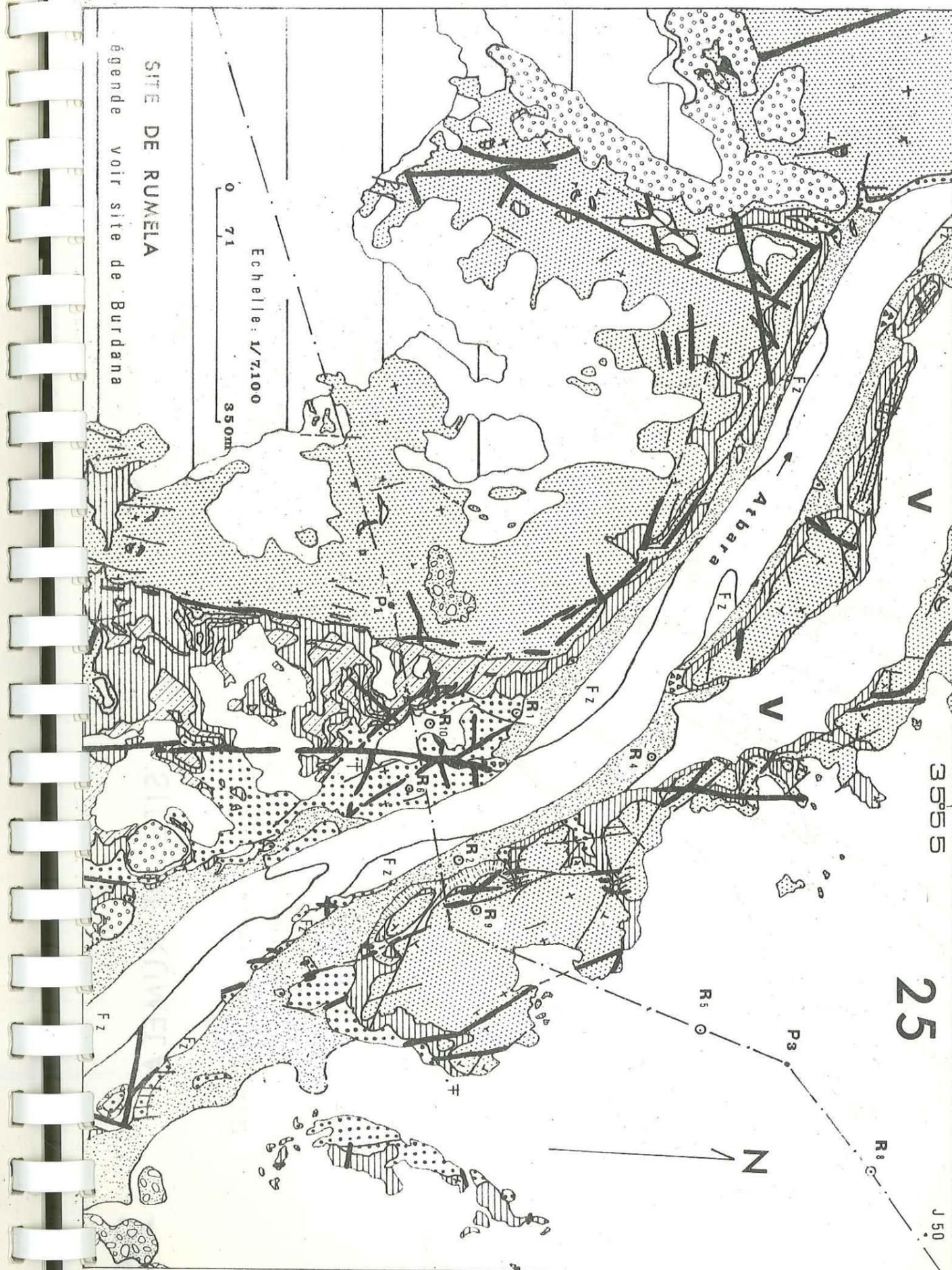
- les Grès en gros bancs ;
- les Mudstones et les grès intermédiaires ;
- les Grès supérieurs.

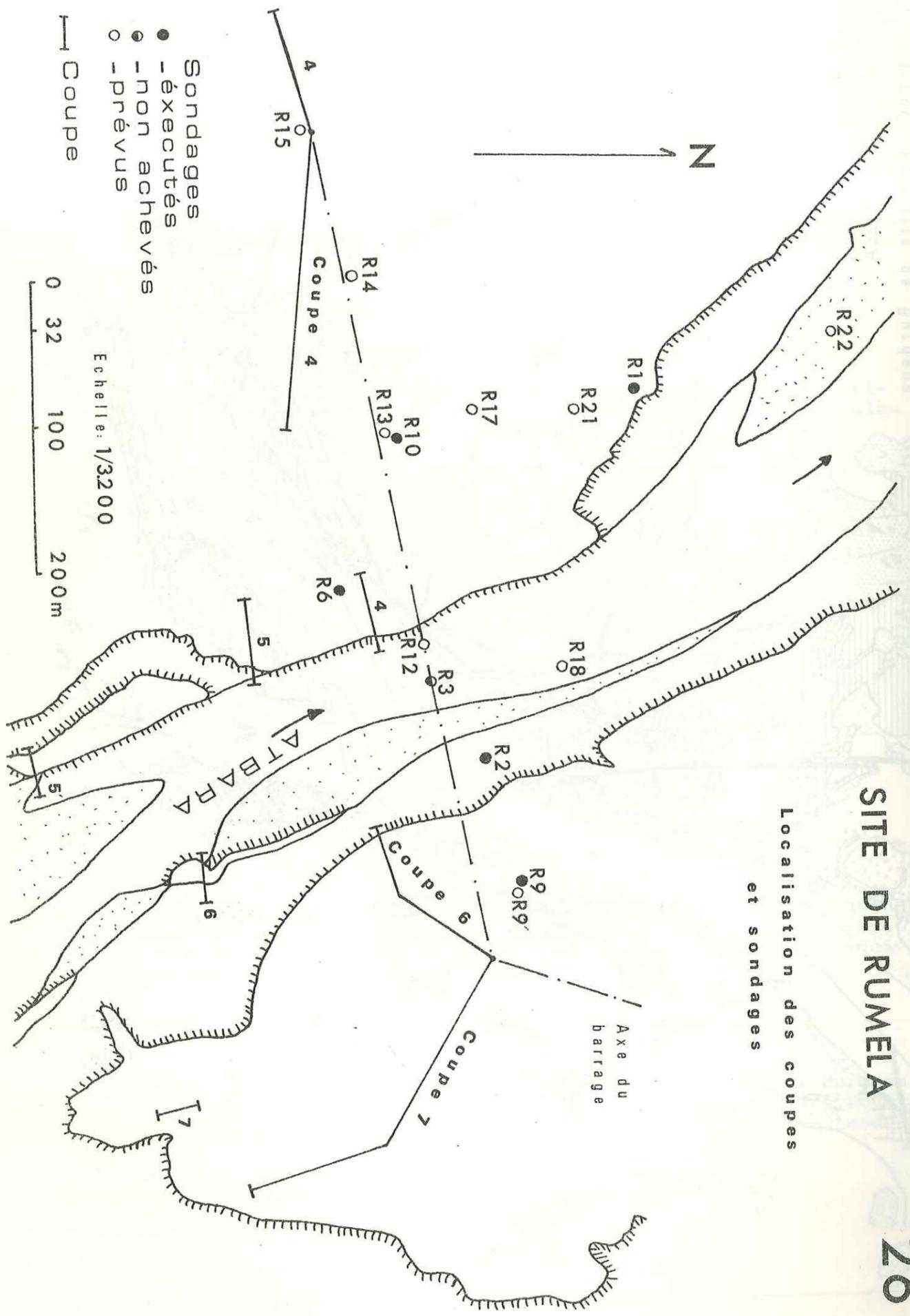
5.211 Coupe de référence C<sub>4</sub> (Fig. 27, p. 96)

Cette coupe a été établie sur l'axe du barrage en rive gauche, car les différents ensembles apparaissent nettement. En rive droite, au niveau de l'axe, un gros placage d'éboulis masque la série.

- Les Grès en gros bancs

Épaisseur visible 18.68 m. A la différence du site de Burdana, deux niveaux de gros bancs existent ici, séparés par une zone d'éboulis qui correspond à des "mudstones" et des grès tendres.





- 1a Grès moyen à très grossier, massif à patine grise. Litage bien marqué (épaisseur : 3.50 m).
- 1b ( Ensemble de 3 bancs de grès moyen à très grossier à
- 1c ) patine beige (épaisseur : 1.40 m)
- 1d (
- 1e Ensemble de bancs mal lités de grès moyen, clair, très grossier à la base (épaisseur : 2.30 m).
- 1f Eboulis montrant par endroits de petits affleurements de mudstone ou de grès très fin, tendre, blanc. Au sommet des éboulis, petit niveau de mudstone ocre (épaisseur : 3.10 m).
- 1g Banc massif de grès moyen à grossier, à patine rose, avec quelques pisolithes (épaisseur : 3.10 m).
- 1h ( Ensemble de petits bancs (5 - 10 cm) de grès moyen, mal
- 1i ) lités, à patine rose jaunâtre se terminant par un petit niveau de grès ferrugineux (li) (épaisseur : 2.50 m).

Mudstones et grès intermédiaires

C'est une série constituée par une alternance de ces deux termes. De ce fait, ils n'ont pu être séparés comme à Burdana. (épaisseur totale : 11.25 m).

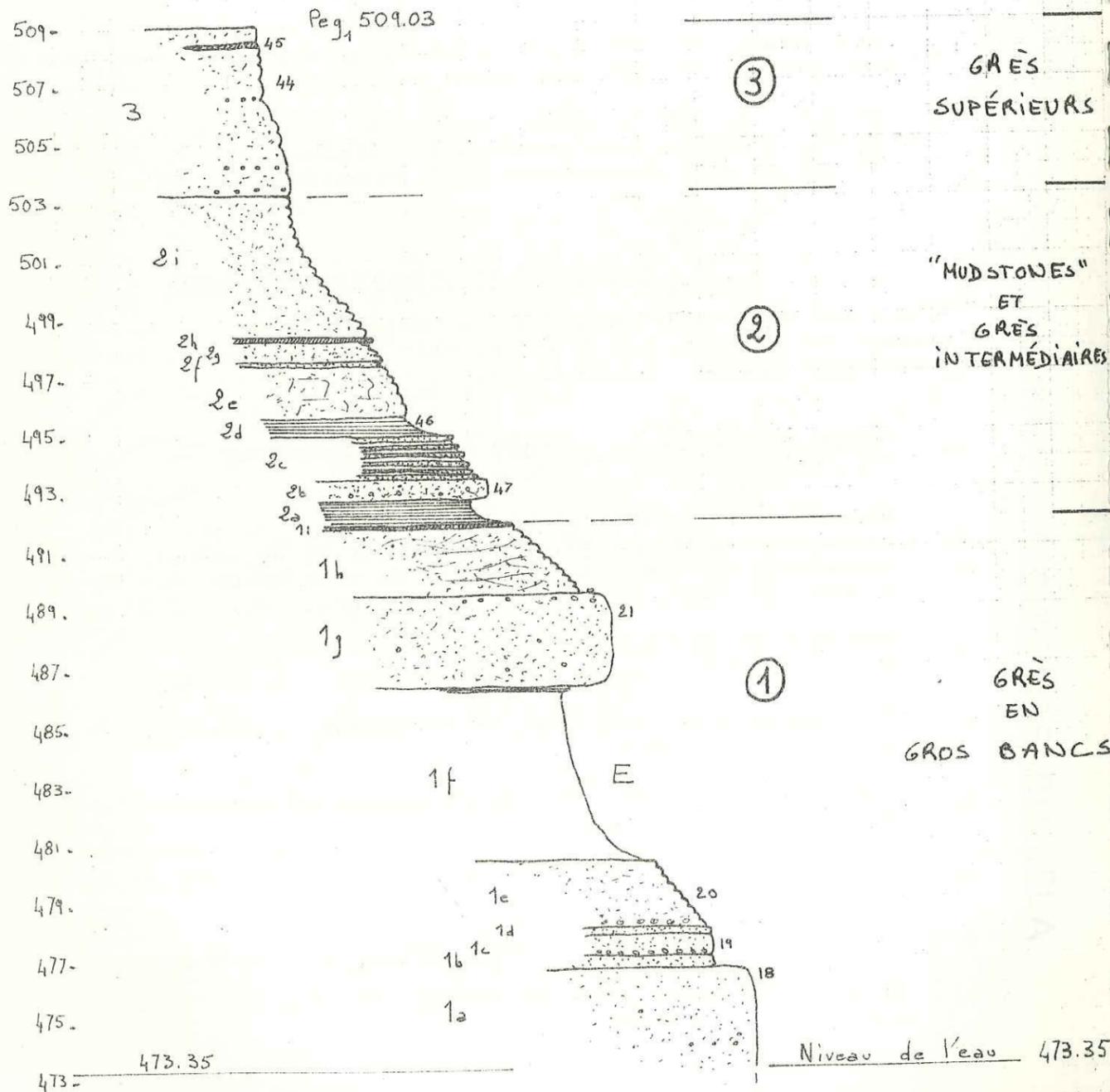
- 2a Mudstone blanche en mauvais état, masquée par des éboulis (épaisseur : 0.80 m).
- 2b ( Ensemble constitué à la base, par un banc de grès très
- 2c ) grossier, beige, de 70 cm d'épaisseur et au sommet, d'une alternance de bancs (10 - 20 cm) de grès moyen gris et de niveau peu épais de mudstone grise (épaisseur : 2.25 m).
- 2d Mudstone grise bien litée. (épaisseur : 0.65 m). Ensemble hétérogène de grès (épaisseur : 2.75 m).
- 2e Grès moyen gris, mal lité, se découpant en cubes massifs (épaisseur : 1.70 m).
- 2f Grès fin gris clair, avec mince niveau de mudstone violette (épaisseur : 0.20 m).
- 2g Grès moyen beige, mal lité, de 0,65 m d'épaisseur se terminant par :
- 2h Un niveau de grès ferrugineux (épaisseur : 0.20 m).
- 2i Ensemble de bancs (20 - 30 cm) de grès fin gris clair (épaisseur : 4.80 m).

Fig. 27

C4

# COUPE DE RÉFÉRENCE DE LA SÉRIE DE RUMELA

RG



E E boullis  
19 Numéro d'échantillon

## Les Grès supérieurs

Ensemble de bancs de grès moyen à très grossier, en général à patine rousse, mal lités, avec parfois des niveaux de grès fin, blanchâtre (épaisseur : 5.60 m jusqu'au peg P<sub>1</sub>) (1).

Les grès supérieurs sont très étendus et forment un plateau qui s'étend jusqu'au Cotton-soil. La limite supérieure des grès supérieurs est située à la cote 517, ce qui correspond à une épaisseur totale observable de 13.60 m.

### 5.212 Les coupes complémentaires

La coupe de référence est complétée par plusieurs coupes qui permettent d'apprécier les variations d'épaisseur et de faciès sur chaque rive.

Les endroits propices présentés par la morphologie n'ont permis que des levés en amont de l'axe.

#### Coupes amont rive gauche (Fig. 28, p. 98)

La coupe C<sub>5</sub> montre l'augmentation d'épaisseur de la séquence "mudstone" et l'amenuisement de la série lf comprise entre les deux gros bancs. Cet amenuisement est encore plus net dans la coupe C'<sub>5</sub> et se poursuivra vers l'amont jusqu'à la disparition complète de cette série plus tendre (Fig. 31, p.107).

Ces coupes présentent l'intérêt d'être situées à l'entrée de l'évacuateur de crue et permettent de préciser l'assise de sa fondation.

#### Variations de faciès

##### Série gros bancs

- 1f<sub>1</sub> Alternance de bancs d'épaisseur variable (15 - 60cm) de grès moyen et de mudstone (épaisseur : 1.60 m).
- 1f<sub>2</sub> Mudstone blanche ocre (épaisseur : 1.50 m).
- 1g<sub>1</sub> Grès moyen à grossier beige (épaisseur : 0.50 m).

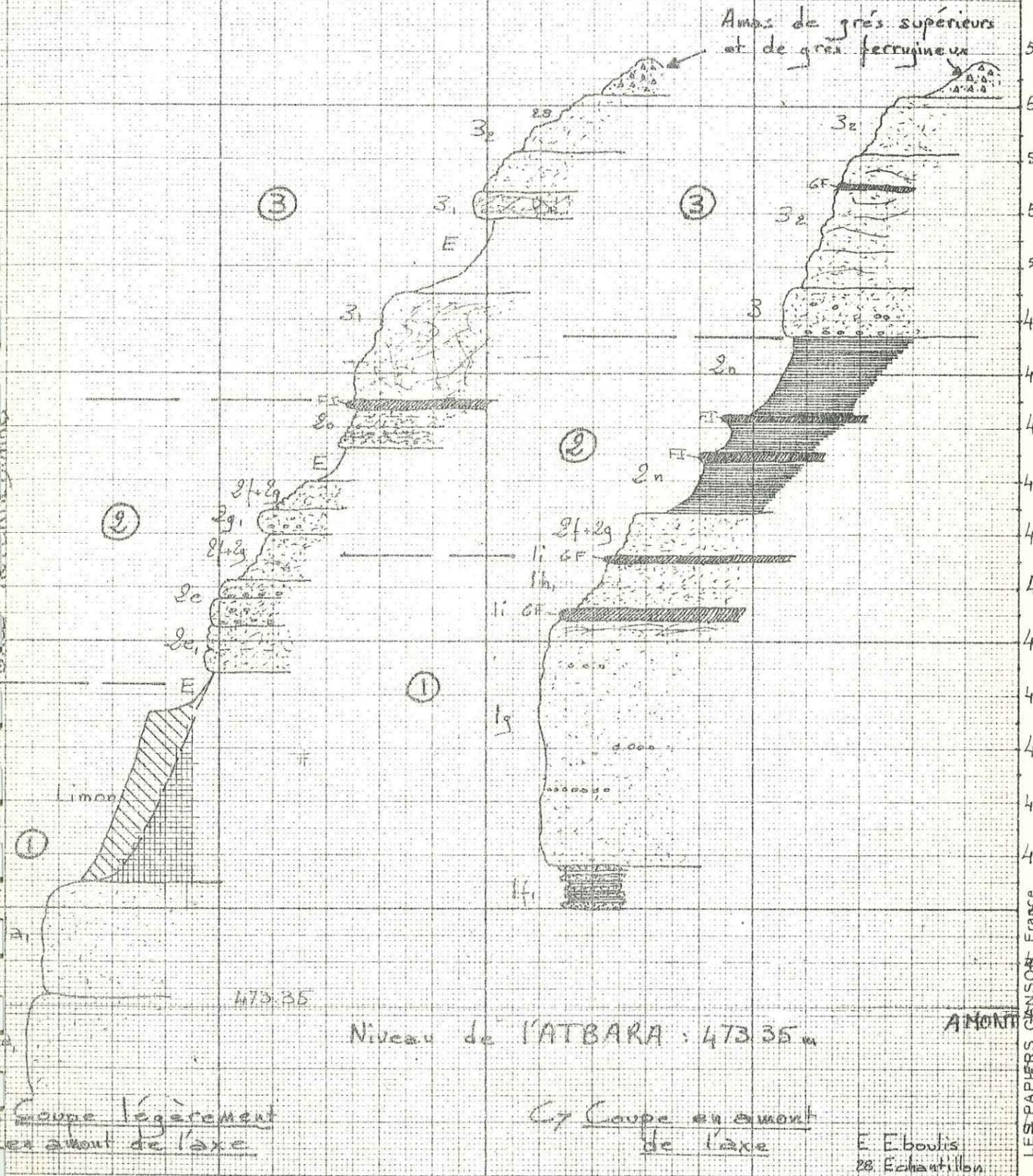
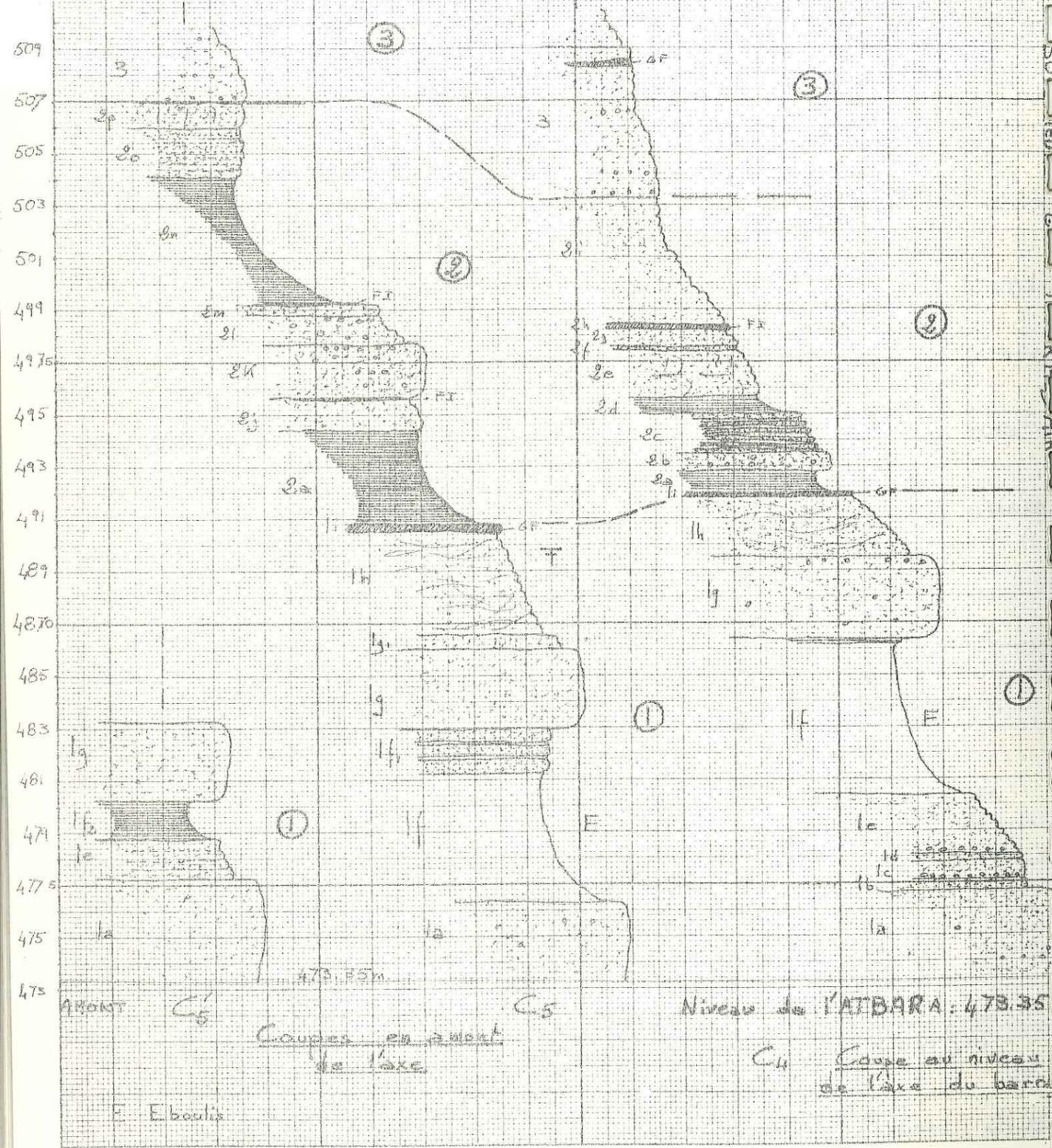
(1) Peg = repère topographique.

Variations d'épaisseur et de faciès de la série

Limite grès supérieurs coté ouest: 517m

Variations d'épaisseur et de faciès de la série

Amas de grès supérieurs et de grès ferrugineux



LES PAPIERS  
 69  
 71  
 73  
 75  
 77  
 79  
 81  
 83  
 85  
 87  
 89  
 91  
 93  
 95  
 97  
 99  
 101  
 103  
 105  
 107  
 109  
 111  
 113  
 115  
 117  
 119  
 121  
 123  
 125  
 127  
 129  
 131  
 133  
 135  
 137  
 139  
 141  
 143  
 145  
 147  
 149  
 151  
 153  
 155  
 157  
 159  
 161  
 163  
 165  
 167  
 169  
 171  
 173  
 175  
 177  
 179  
 181  
 183  
 185  
 187  
 189  
 191  
 193  
 195  
 197  
 199  
 201  
 203  
 205  
 207  
 209  
 211  
 213  
 215  
 217  
 219  
 221  
 223  
 225  
 227  
 229  
 231  
 233  
 235  
 237  
 239  
 241  
 243  
 245  
 247  
 249  
 251  
 253  
 255  
 257  
 259  
 261  
 263  
 265  
 267  
 269  
 271  
 273  
 275  
 277  
 279  
 281  
 283  
 285  
 287  
 289  
 291  
 293  
 295  
 297  
 299  
 301  
 303  
 305  
 307  
 309  
 311  
 313  
 315  
 317  
 319  
 321  
 323  
 325  
 327  
 329  
 331  
 333  
 335  
 337  
 339  
 341  
 343  
 345  
 347  
 349  
 351  
 353  
 355  
 357  
 359  
 361  
 363  
 365  
 367  
 369  
 371  
 373  
 375  
 377  
 379  
 381  
 383  
 385  
 387  
 389  
 391  
 393  
 395  
 397  
 399  
 401  
 403  
 405  
 407  
 409  
 411  
 413  
 415  
 417  
 419  
 421  
 423  
 425  
 427  
 429  
 431  
 433  
 435  
 437  
 439  
 441  
 443  
 445  
 447  
 449  
 451  
 453  
 455  
 457  
 459  
 461  
 463  
 465  
 467  
 469  
 471  
 473  
 475  
 477  
 479  
 481  
 483  
 485  
 487  
 489  
 491  
 493  
 495  
 497  
 499  
 501  
 503  
 505  
 507  
 509

Série mudstone

- 2j Grès fin à grossier beige clair, se terminant par une pellicule de grès ferrugineux (épaisseur : 1.30m).
- 2k Banc massif de grès grossier beige à pisolithes (épaisseur : 2.00 m).
- 2l Grès grossier à très grossier, blanc, à pisolithes (épaisseur 1.10 m).
- 2m Grès moyen à grossier, beige, bien lité, terminé par une pellicule ferrugineuse (épaisseur : 0.40 m).
- 2n Mudstone ocre violette (épaisseur : 5 m).
- 2o Grès tendre, blanc, en petits bancs friables (épaisseur : 1.80 m).
- 2p Grès fin tendre, blanc, à débit cubique (épaisseur : 1 m).

o Coupes amont rive droite (Fig. 29, p.99)

En raison du manteau d'éboulis qui couvre le versant, seules des coupes plus en amont ont pu être levées. Ces coupes appellent tout d'abord quelques remarques :

o Coupe C<sub>6</sub>

- a. Seuls les gros bancs inférieurs apparaissent, le reste étant masqué par les limons.
- b. Les grès intermédiaires dominant, le terme "mudstone" est très réduit.
- c. Toute la série est à un niveau plus bas qu'en rive gauche.

Ceci peut être dû :

- o soit aux nombreuses failles qui hachent le versant et qui ont dû provoquer un affaissement de la série ;
- o soit à une faille plus importante, longeant l'Atbara et qui a pu décaler les deux compartiments de quelques mètres.

o Coupe 7

- a. Levée plus en amont que la précédente, elle permet de situer le sommet des gros bancs à une cote légèrement inférieure à leur cote en rive gauche.
- b. La série "mudstone" est globalement moins épaisse (8 m environ) et la limite entre grès supérieurs et mudstone se trouve très abaissée.

Si nous tenons compte de la réduction d'épaisseur de la série "mudstone" en rive droite, les séries sont à peu près au même niveau sur chaque rive de l'Atbara, l'abaissement de la série de la coupe C<sub>6</sub> étant plus vraisemblablement le fait de failles dans le versant, et non dû à la présence d'une grande faille le long de la rivière.

Variations de faciès

Série en gros bancs

- 1a<sub>1</sub> Deux gros bancs massifs de grès moyen à grossier, beige foncé, à pisolithes (épaisseur : 3.80 m et 3.00 m).
- 1h<sub>1</sub> Grès fin blanc en petits bancs (épaisseur : 1.50m).

Série "mudstone"

- 2e<sub>1</sub> Ensemble de bancs bien lités de grès moyen beige et de grès fin tendre, gris blanc ; friable (épaisseur : 1.72 m).
- 2g<sub>1</sub> Banc de grès moyen, légèrement violacé.

Série grès supérieurs

- 3<sub>1</sub> Grès moyen à grossier, roux, mal lité, avec de nombreux filonnets de quartz (zone fracturée).
- 3<sub>2</sub> Grès fin à moyen, beige glanchâtre, mal lité avec quelques niveaux de grès ferrugineux.

Aucun terrain sous-jacent n'affleurant sous les gros bancs, la coupe de référence ne peut être complétée que par les indications des sondages.

5.213 Coupe synthétique des terrains intéressant le site de Rumela

Les sondages R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>6</sub>, R<sub>9</sub> et R<sub>10</sub> ont un pourcentage de carottage faible dans la partie supérieure (20 - 25 m environ), mais qui s'améliore en profondeur.

Néanmoins, aucune corrélation entre les coupes de surface et les sondages R<sub>6</sub> et R<sub>9</sub>, par exemple, n'est possible et c'est plutôt un ensemble d'indications fournies par chaque sondage qui permet le recouplement et l'interprétation de la suite des coupes déjà levées.

Nous pouvons résumer ce qui précède en indiquant la succession probable des faciès, avec estimation de leur cote au niveau de la coupe de référence.

Cette succession n'est donnée qu'à titre indicatif puisque les cotes ne sont pas très précises et les variations d'épaisseur mal connues.

La succession générale est la suivante :

- . 517 à 503 = grès supérieurs
- . 503 à 496 = grès
- . 496 à 495 = mudstone
- . 495 à 493 = grès
- . 493 à 492 = mudstone
- . 492 à 486 = grès en gros bancs
- . 486 à 480 = mudstone et grès tendre
- . 480 à 473 = grès en gros banc
- . 473 à 469.50 = grès
- . 469.50 à 465 = mudstone
- . 465 à 463.50 = grès
- . 463.50 à 458.50 = mudstone ou grès argileux
- . 458.50 à 456 = grès
- . 456 à 452 = mudstone ou grès argileux
- . 452 à 432 = grès

5.214 Variations d'épaisseurs des différents niveaux

Nous avons vu (4.123) que ces grès sont des dépôts deltaïques et peuvent donc présenter d'importantes variations d'épaisseur surtout dans les couches de mudstones.

Le tableau suivant indique les variations des différents niveaux en rive gauche.

Ensemble lithologique	Coupe C'5	Coupe C5	Sondage R6	Coupe de référence C4	Sondage R1
Grès supérieurs		10m		13.60m	
Mudstones + grès intermédiaires		16.20m	carottage trop faible	11.25m	carottage trop faible
Grès en gros bancs	14m	17.30m		18.70m	
Mudstones inférieures	non observées	non observées	12m	non observées	9m

AMONT

AXE DU BARRAGE

AVAL

Les variations d'épaisseurs de chaque côté de l'Atbara apparaissent dans le tableau suivant :

	Rive gauche	Rive droite
Grès supérieurs	14 m	11 m
Mudstone + grès intermédiaires	14 - 16 m	8 - 10 m
Grès en gros bancs	19 m	17 m

5.22 LA STRUCTURE DU SITE

Nous distinguons deux échelles :

- . l'échelle "régionale" englobant les terrains situés aux alentours du site ;
- . l'échelle du "site" c'est-à-dire la zone d'emprise de l'ouvrage lui-même.

5.221 La structure régionale

La région de Rumela est une zone très fracturée comme en témoignent les nombreux dykes de basalte et les changements de direction de l'Atbara.

Vers l'aval, la rivière laisse à sa droite son ancienne vallée remblayée et change de direction, empruntant une nouvelle zone de fractures.

. Au large rive droite

- vers l'amont :

La série gréseuse est toujours présente bien que réduite aux gros bancs et à la base des mudstones.

Certes, les conditions morphologiques suggèrent un abaissement, une sorte de large entaille mais cela n'est pas suffisant pour justifier l'entrée d'une ancienne vallée, actuellement remblayée.

- vers l'Est :

La série s'enfonce sous le Karab et rien n'affleure avant d'atteindre la rive gauche de la Setit.

- plus en aval :

Entre les deux vallées remblayées, les grès taillés à pic, encadrent une importante accumulation de graviers. Ces dépôts font penser à un remblayage d'un ancien bras de l'Atbara mais, ni le prolongement, ni l'entrée de ce bras n'ont été retrouvés.

. Au large rive gauche

- vers l'amont :

La série s'élargit beaucoup, les mudstones et les grès intermédiaires s'étalent, les gros bancs n'apparaissent que le long de la rivière.

- vers l'aval :

L'extension horizontale des mudstones et des grès intermédiaires est très réduite.

L'ensemble des séries gréseuses est plus massif et forme les falaises abruptes des gorges d'Abu Reida.

5.222 La structure du site (Fig. 30, 31, 32 et 33, p. 106, 107, 109 et 111)

Les couches de grès et de mudstones sont horizontales, mais plusieurs directions de fractures convergent au niveau du site et jouent un rôle non négligeable dans la structure de celui-ci.

La morphologie particulière de chaque rive nous oblige à les étudier séparément.

. Rive gauche (Fig. 30 et 31, p. 106 et 107)

C'est, pour schématiser, une sorte d'escalier dont le sous-bassement, constitué par les grès en gros bancs est coupé par un gros dyke qui, traversant l'Atbara, continue en rive droite où il disparaît.

Ce gros dyke est accompagné de nombreux petits dykes qui découpent toute la série. Chaque talus, correspondant à l'apparition des "mudstones" ou des grès supérieurs, est en fait soutenu par des filons de basalte.

Leur direction générale est environ N-05°. Ils s'infiltrent dans la série gréseuse, augmentant la fissuration, et partant, la perméabilité. Cependant, si les grès sont affectés par ces intrusions, les filons basaltiques ne semblent pas jouer directement le rôle de drain, car, au contact des grès, les joints sont nets, bien collés, avec parfois métamorphisme de contact (passage de grès aux quartzites), il n'y a pas eu décollement des bords après refroidissement.

Mais dans la mesure où aucun essai d'eau n'a été effectué, il est difficile de quantifier cette perméabilité.

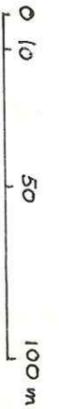
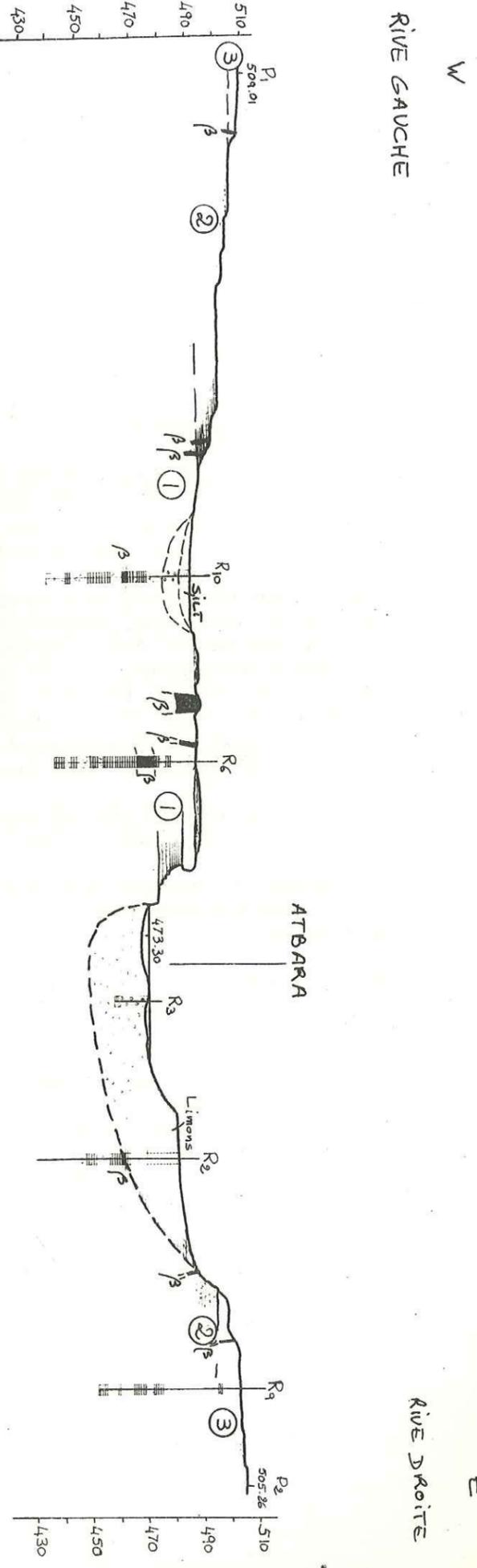
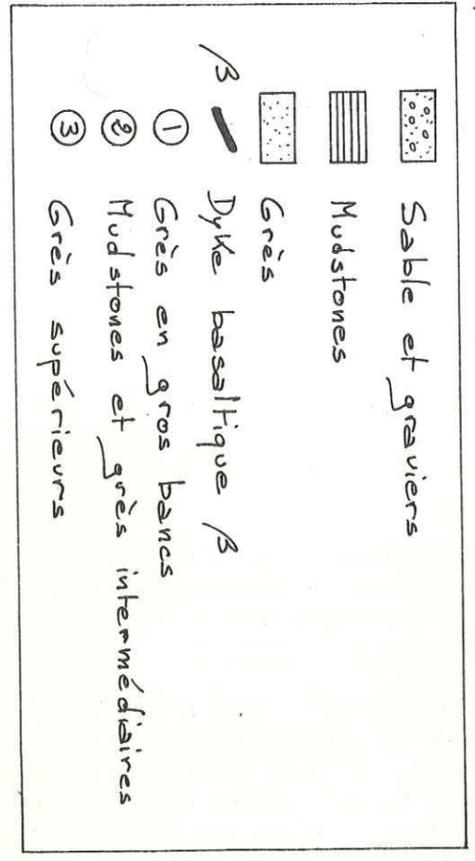
On peut néanmoins penser que celle-ci pourra être élevée, jusqu'à atteindre même la perte totale, si les fractures sont ouvertes.

Un élément intéressant est que, à l'inverse du site de Burdana, aucune perte d'eau n'a été enregistrée au cours des sondages.

Au pied du talus de "mudstone", vers le sondage R<sub>10</sub>, un dépôt superficiel de silt, sable et graviers, épais d'environ 8 m, indique une zone érodée dont l'origine peut être une faille. Ce point sera évidemment très important à préciser, car les conditions morphologiques se prêtent à l'implantation de l'évacuateur de crue.

. Rive droite (Fig. 32, p. 109)

L'observation de la série en bordure de l'Atbara est gênée

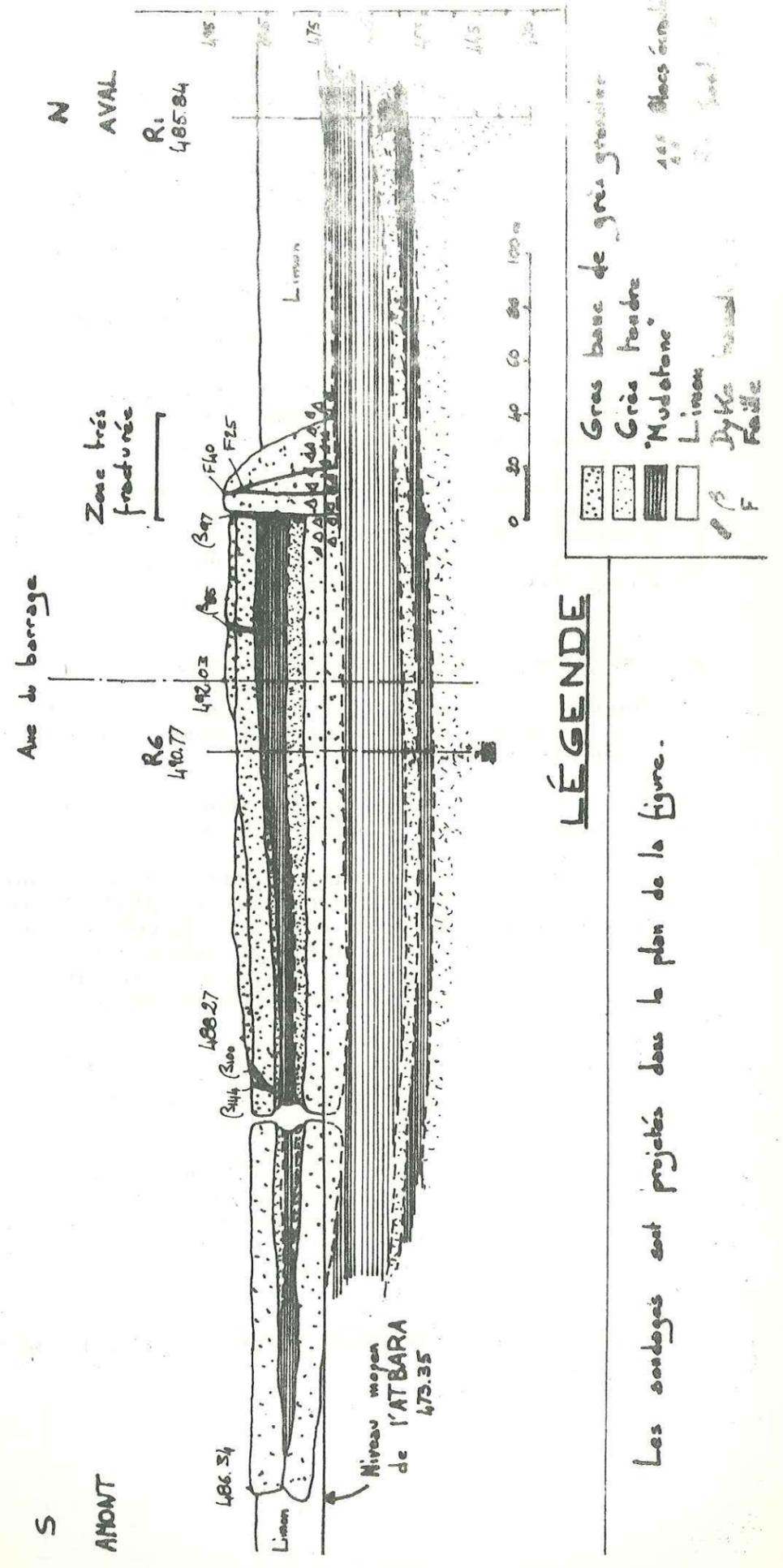


Coupe géologique du site de RUMELA



Coupe géologique de la rive gauche de la rivière Atbara

Echelle 1/2.000<sup>e</sup>



par les limons de crue et les éboulis qui couvrent le versant.

Les éboulis masquent les dykes et les failles associées dont la direction est parallèle à la rivière.

Les grès supérieurs constituent le plateau sommital.

Plus en amont, les différents termes de la série apparaissent mieux et nous remarquons ici encore le rôle important joué par les filons basaltiques.

La structure de cette rive ressemble à un bloc horizontal, lardé de dykes basaltiques orientés le plus souvent parallèlement à l'Atbara.

La bordure occidentale, cassée par les fractures, forme une falaise alors que la bordure orientale disparaît sous le Karab. L'existence d'une discontinuité importante à ce niveau a été décelée par géophysique mais un sondage de vérification serait nécessaire.

• Dans la rivière (Fig. 33, p.111)

Nous retrouvons ici le problème de l'épaisseur des alluvions, car, comme à Burdana, aucun sondage n'a pu atteindre le bed-rock.

Seuls les résultats géophysiques peuvent nous donner des indications sur la structure géologique.

Les profils géophysiques, effectués en amont et en aval de l'axe, montrent l'existence d'un plateau recouvert d'environ 7 m de galets et graviers, coupé par des failles ou des dykes et, au milieu du site, au niveau de l'axe, une fosse en marches d'escalier, remplie de graviers, profonde de 35 m au maximum et longue d'environ 200 m.

Le fait que le sondage le plus profond ( $R_3$ ), au milieu de la rivière, ait été interrompu à la cote 460 après n'avoir traversé que des graviers, laisse supposer l'existence de cette fosse.

De même, le sondage  $R_2$  ne touche la série nubienne, au niveau des "mudstones" inférieures qu'à la cote 462. Nous pouvons donc déjà admettre un minimum de remplissage de 10 à 11 m et il est probable qu'il faille compter avec une épaisseur d'une vingtaine de mètres, comme pour toutes les rivières de la région.

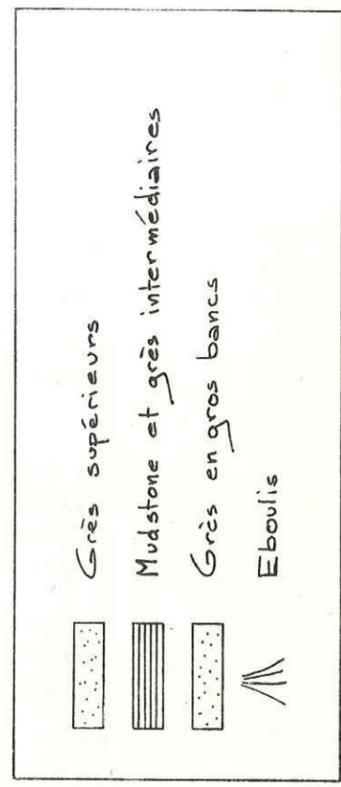
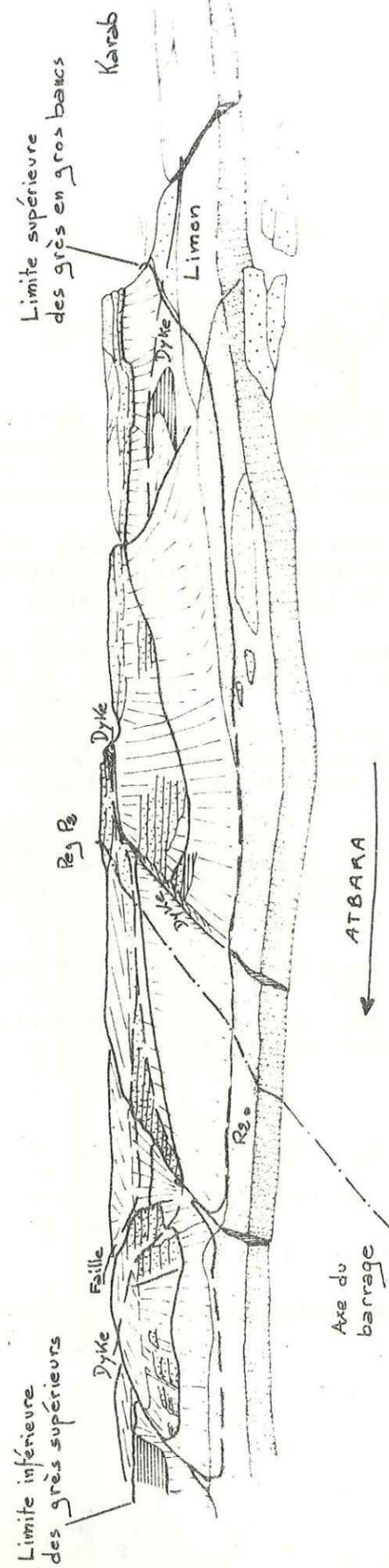
Cependant, ces profils géophysiques appellent quelques remarques :

32

Panorama de la rive droite (vue de la rive gauche)

S  
Amont

N  
Aval



KUMELA

- a. la vitesse de 2.500 m/s est attribuée à des grès ; or, comme nous l'avons fait remarquer plus haut, le soubassement des gros bancs est constitué de mudstone (Fig. 31, p.107), fait d'ailleurs confirmé par le sondage R<sub>2</sub>, proche des profils.

Nous attribuons donc cette vitesse à la série nubienne (mudstone et grès) par opposition au remplissage alluvial et non à des grès, au sens strict.

- b. Les fractures passent rarement, en surface, d'une rive sur l'autre.

Les profils montrent l'existence de failles importantes dont le prolongement n'a pas été retrouvé sur les rives.

- c. La structure d'ensemble du site est tabulaire. Si la structure du fond de la rivière présente l'allure d'un graben fracturé, celui-ci sera très étroit car le sondage R<sub>2</sub> confirme la régularité structurale.

La zone très fracturée qui termine la falaise des gros bancs, en rive gauche, indique l'important désordre provoqué par le passage du gros dyke.

Nous savons que ce dyke ressort en rive droite et donc chemine à travers l'Atbara.

Nous pouvons donc supposer que cette zone fracturée existe dans la rivière mais, sans pouvoir préciser ni son extension, ni son rôle exact dans la structure du bed-rock.

Bien que le dyke passe, dans ce cas, hors de la zone d'emprise du barrage lui-même, il détermine les conditions structurales en amont.

Il est indispensable de vérifier l'existence de ce graben et de préciser la cote du bed-rock directement en aval de l'axe car, malgré les dykes et les failles, la structure est tabulaire.

Etude de la fracturation (Fig. 24, p. 91)

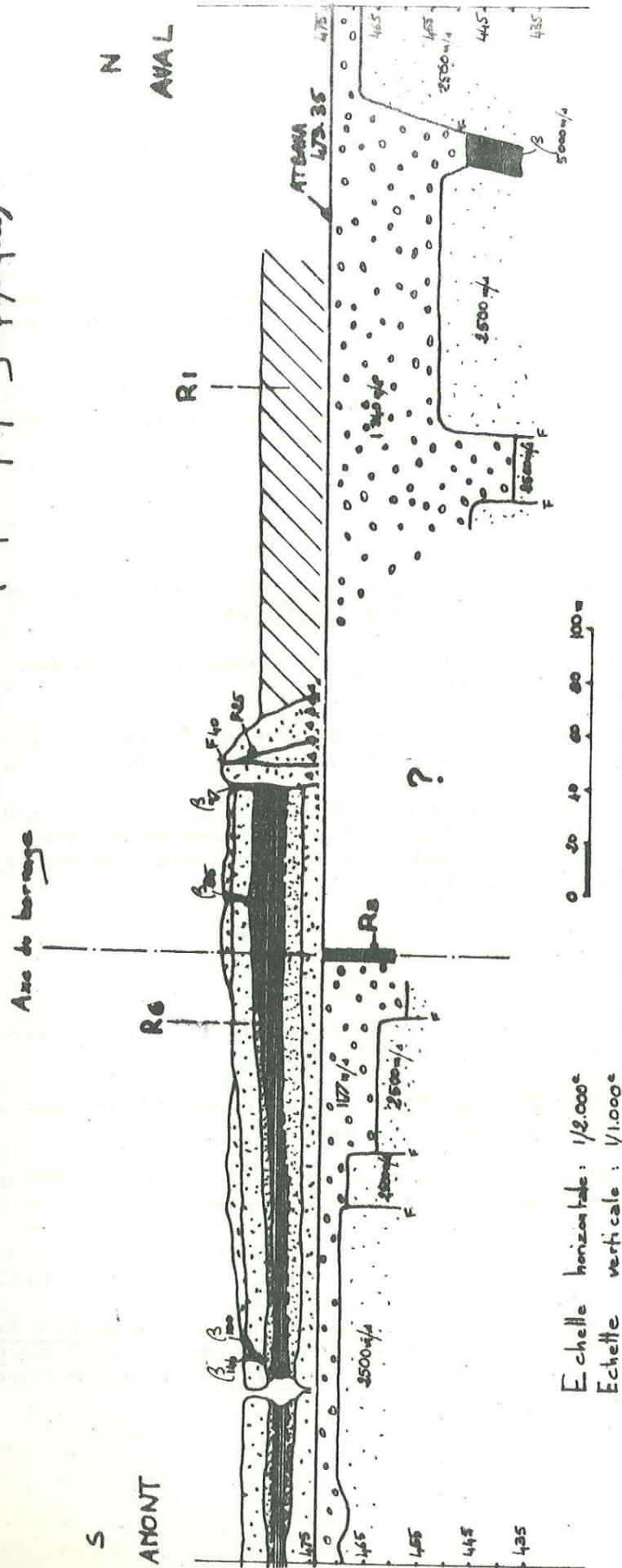
La fracturation est générale sur tout le site et l'étude détaillée de celle-ci permet de préciser les orientations principales des discontinuités.

A Rumela, ces orientations principales sont N 170°, N 145°,

RUMELA

Coupe géologique au milieu de la rivière (d'après profils géophysiques)

33



**LÉGENDE**

- Limon
- Galets et graviers
- Grès
- Mudstone
- Dyke basaltique
- Faille
- Blocs écaillés
- Sondage

Les rive gauche est reportée dans le plan de la figure.

N 45° ; les orientations annexes ont pour direction N 05°, N 55°, N 160°.

Remarquons que les directions parallèles à la rivière sont les plus nombreuses et favorisent certainement les circulations.

Le maillage des blocs est variable suivant les terrains rencontrés. Les blocs sont plus gros dans les gros bancs que dans les grès intermédiaires. La maille moyenne est d'environ 40 cm x 30 cm x 25 cm.

La densité de fracturation n'a pu être confrontée à l'indice R.Q.D. mesuré sur les carottes de sondages en raison du faible pourcentage obtenu par ceux-ci.

### 5.3 LA FASHAGA (Fig. 15 et 34, p. 74 et 113)

Cette région comprise entre l'Atbara et la Setit est une zone de ravinements creusés dans le Karab.

Le Karab masque tout et les Grès de Nubie n'affleurent qu'à proximité des rivières.

Le plateau de Cotton-soil est bien développé vers l'amont mais seuls quelques vestiges apparaissent en aval de l'axe.

En raison du recouvrement total du Karab, nous nous appuyerons sur les profils géophysiques et les sondages, pour déterminer la structure du bed-rock et localiser les nombreuses fractures qui l'affectent.

### 5.31 INTERPRETATION

La figure 15, p. 74, montre que les profils géophysiques ont été effectués suivant deux lignes :

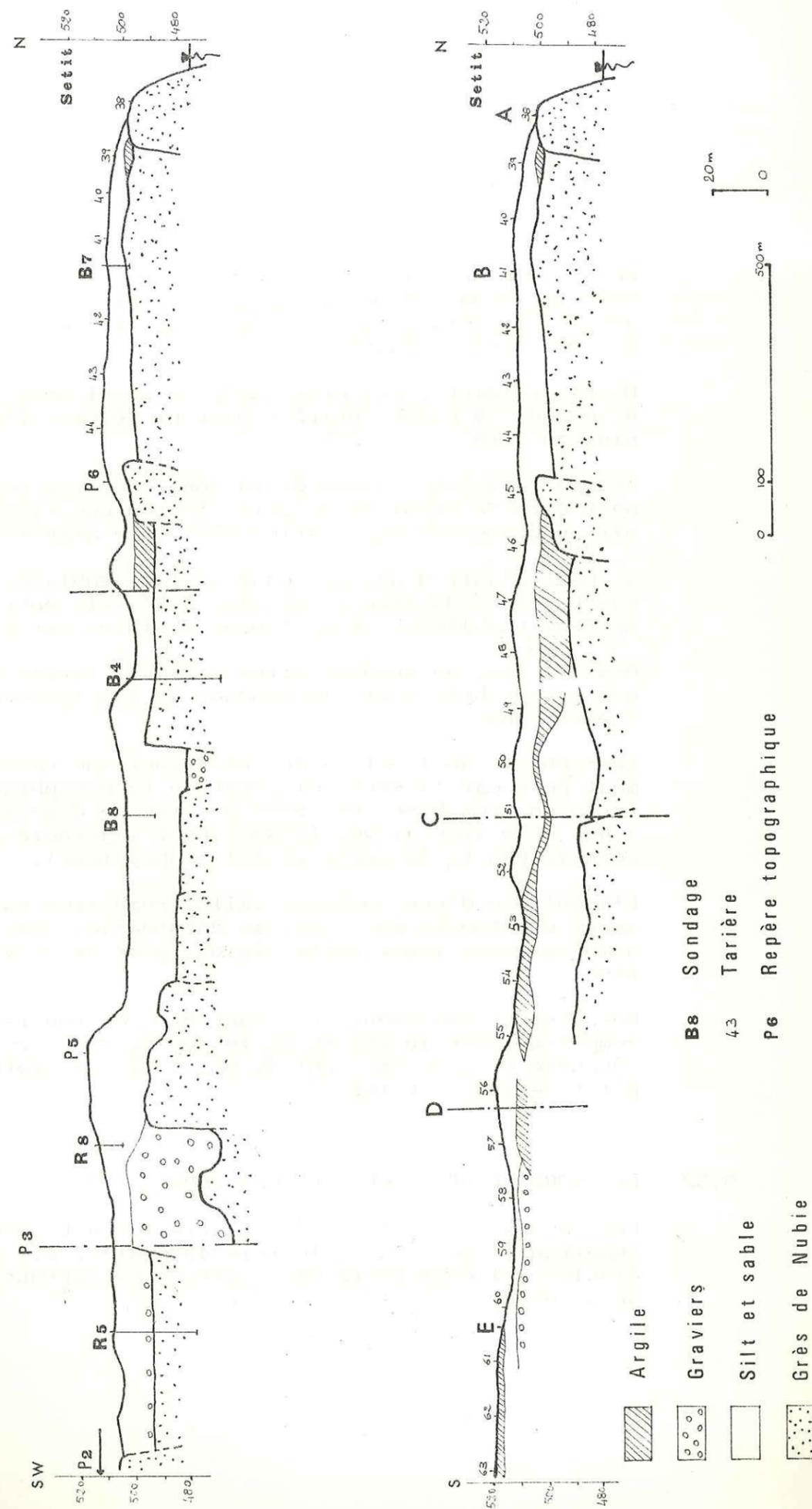
- . la première suit le tracé de la future digue centrale reliant les deux sites de barrage ;
- . la seconde suit le tracé de la digue prévue pour empêcher toute communication entre les réservoirs.

Par ailleurs, certains sondages, soit à rotation, soit à la tarière ont permis de préciser certains points des profils.

La structure générale (Fig. 34, p.113) montre des grès fracturés avec de petits horsts et grabens, recouverts d'une couche superficielle d'une dizaine de mètres d'épaisseur en moyenne.

### Interprétation de la géologie de la Fashaga

d'après profils géophysiques



Cette couche superficielle est généralement constituée de silt ou de sable fin devenant plus grossier en profondeur.

Seul, le sondage R<sub>5</sub> présente une couche de 7 m de sable grossier bouillant puis 8 m de graviers. Ces dépôts de matériaux détritiques grossiers résultent de la formation des grabens, consécutifs aux grandes fractures affectant la série nubienne (cf. Burdana).

Nous avons pu suivre ces grandes fractures à travers la Fashaga, depuis Kubur jusqu'à la Setit et depuis Rumela jusqu'à la Setit, car elles sont généralement soulignées par des dykes basaltiques.

Malheureusement, ces dykes disparaissent sous le Karab au niveau de la digue centrale pour ne réapparaître que bien plus au Nord.

L'important remplissage de la zone comprise entre R<sub>8</sub> et R<sub>5</sub> peut être le résultat de cette tectonique cassante tertiaire mais une seconde explication peut être avancée.

Il peut s'agir d'une ancienne vallée remblayée dont le débouché est peut-être situé plus à l'aval, entre les deux vallées remblayées actuellement visibles sur l'Atbara.

Dans ce cas, un sondage situé à l'aval aurait dû recouper cet ancien bras ; or, le sondage R<sub>7</sub> n'a traversé que des sables fins.

Le problème de l'entrée de cette ancienne vallée est également posé car la seule disposition topographique favorable (grès en gros bancs en amont du site de Rumela) est encore à une cote trop élevée ( $\approx 480$ ) pour rejoindre la cote 466 vers le peg P<sub>3</sub> (d'après profil géophysique).

L'hypothèse d'une ancienne vallée remblayée nous paraît assez peu fondée mais les cas d'épigénies sont suffisamment nombreux dans toute cette région, pour qu'on y prête attention.

Des études complémentaires vont être entreprises dans la zone comprise entre le peg P<sub>5</sub> et le peg P<sub>2</sub> et elles permettront de résoudre ce problème tant du point de vue géotechnique que du point de vue structural.

## 5.32 LE PROBLEME DES POCHEs DE GRAVIERS

Les sables grossiers et les graviers constituent un problème important, car, jouant le rôle de drains, ils sont préjudiciables à l'étanchéité de l'ouvrage et surtout à la stabilité de la digue.

Ainsi, l'épaisse poche de graviers et de sable grossier existant au niveau des sondages R<sub>8</sub> et R<sub>5</sub> devra être parfaitement circonscrite et traitée ensuite spécialement.

La faille limitant à l'ouest cette poche de graviers, est celle qui borde les derniers affleurements de grès en rive droite de l'Atbara.

En raison du problème soulevé par cette poche, deux sondages R<sub>7</sub> et R<sub>11</sub> ont été effectués de part et d'autre du tracé de la digue afin de reconnaître l'existence d'un épais niveau de graviers perméables.

Ces sondages n'ont traversé que des sables fins ou des silts ce qui indique l'absence d'une extension souterraine.

Les zones graveleuses de Kubur qui avaient fait craindre ce prolongement ne sont en réalité, que des placages superficiels dus aux terrasses emboîtées.

CHAPITRE 6

MOYENS D'INVESTIGATION

- 6.1 Les sondages
- 6.2 Les sondages à la tarière
- 6.3 La géophysique
- 6.4 Les puits
- 6.5 Les tranchées

La campagne de reconnaissance mise en oeuvre avait pour objectifs l'étude des sites et du soubassement des digues et la recherche de matériaux de construction.

Les travaux ont consisté en 25 sondages totalisant 1105.5 m de perforation (avec essais d'eau), 73 sondages à la tarière, des profils géophysiques, des essais de perméabilité "in situ", 75 puits et 2 tranchées.

#### 6.1 LES SONDAGES (Fig. 15, p. 74, 17, p.77 et 26, p. 94)

Ils ont été exécutés au niveau des sites et dans la Fashaga, et leur profondeur maximale atteignait 50 m.

Ces sondages auraient dû fournir des renseignements intéressants mais, malheureusement, les résultats obtenus sont maigres. En effet, la plupart d'entre eux montrent un pourcentage de carottage faible, souvent inférieur à 10 % et il est difficile dans ces conditions, de reconstituer la coupe des terrains rencontrés. De plus, l'absence d'une machine à percussion sur le chantier n'a pas permis de traverser les alluvions.

En ce qui concerne les essais d'eau, aucune mesure de la perméabilité réelle des terrains n'a pu être obtenue avec la méthode employée.

Pour éclairer ce qui précède, nous allons décrire les techniques utilisées.

#### 6.11 LE CAROTTAGE

Ces sondages furent exécutés à rotation ; l'avancement était hydraulique ; le liquide d'injection était soit de l'eau claire, soit de la boue. Le carottier était un carottier double de trois pouces donnant en principe des carottes de 56 mm de diamètre, ce qui est un peu faible.

En fait, le type de carottier double employé n'était guère qu'un carottier simple amélioré. La chemise interne, fixe, était solidaire du tube carottier lui-même. Le seul avantage était qu'elle mettait la carotte à l'abri de la circulation d'eau. Par contre, le coincement d'un fragment de carotte entraînait l'usure des morceaux voisins comme dans un carottier simple.

Dans ces conditions, le pourcentage de carottage était très souvent médiocre, voire même catastrophique.

Ainsi, le sondage B 24, par exemple, n'a pratiquement remonté aucune carotte sur les 18 premiers mètres, c'est-à-dire pour la hauteur de la falaise voisine. Les indications géologiques tirées de ce sondage sont fantaisistes et ne correspondent absolument pas à la coupe naturelle observable à peu de distance.

L'utilité de la plupart des forages exécutés à des fins de reconnaissance géologique est donc nulle et, les résultats fournis induisent en erreur quant à la coupe géologique réelle des terrains traversés.

Pour essayer de reconstituer la coupe des terrains sous-jacents, il faut donc tenir compte d'un ensemble de renseignements fournis par tous les sondages plutôt que s'en tenir aux résultats d'un seul.

#### 6.12 LES ESSAIS D'EAU

La méthode utilisée consiste à forer jusqu'à une certaine profondeur, puis à descendre une crépine d'un mètre cinquante par laquelle se fera l'injection mais, sans l'isoler par des bouchons étanches.

Le sommet du forage est bouché avec du ciment et, lorsque celui-ci est sec, on peut procéder à l'injection.

L'essai d'eau a donc lieu normalement mais la partie injectée ne correspond pas à la longueur de la crépine, puisqu'elle n'est pas isolée, mais à toute la longueur du forage.

Il est donc très difficile de localiser ainsi une zone perméable car le résultat de l'essai d'eau n'est alors qu'une sorte de moyenne non représentative des qualités des terrains rencontrés.

Nous avons pu ainsi noter que le sondage B 24, par exemple, présentait une perte totale à 16.5 m mais un essai d'eau a cependant pu être réalisé à 19.5 m, sans perte totale.

En conclusion, la méthode utilisée pour ces essais est aberrante et les résultats sont inutilisables.

#### 6.2 LES SONDAGES A TARIERE (Fig. 15, p. 74, 34, p.113 et 41, p.149)

65 sondages à la tarière ont été exécutés le long du tracé des endiguements de Burdana (flanc Nord et flanc Sud) pour reconnaître le soubassement des digues.

Ces sondages étaient de faible profondeur (20 m au maximum) et forés uniquement dans les formations meubles.

La tarière utilisée permettait d'atteindre une profondeur de 30 m et ce, dans un temps relativement bref. Il était possible d'effectuer deux à trois sondages par jour selon les terrains rencontrés.

Cette machine a été employée, en outre, pour la reconnaissance des zones graveleuses de la région de Kubur et huit sondages de 5 m ont été réalisés dans cette région.

#### 6.3 LA GEOPHYSIQUE (Fig. 15, p. 74, 8 et 8 bis, p. 36 et 37)

Les objectifs de la campagne géophysique étaient :

- l'étude des sites de barrage et, en particulier, l'épaisseur des alluvions dans le lit de la rivière ;
- la reconnaissance du tracé des digues.

Pour cela, des profils ont été réalisés soit par la méthode électrique, soit par la méthode sismique ; la méthode la plus largement utilisée étant la sismique réfraction qui a donné de bons résultats ainsi que cela a pu être vérifié sur certains points précis.

#### 6.31 PROFIL GEOPHYSIQUE ELECTRIQUE

Il a été tiré depuis le peg P<sub>2</sub> de Rumela jusqu'au site de Burdana (rive gauche).

Il indique les grandes lignes de la géologie de la Fashaga, c'est-à-dire l'existence de grandes failles découpant les Grès de Nubie, mais, dans le détail, ses conclusions se révèlent très inexactes.

Il montre en effet, des grès affleurant à la surface alors que la couverture superficielle atteint 10 m en moyenne, ou, il fait une distinction entre grès sec et grès humide alors qu'aucune surface de nappe n'est tracée ...

Donc, dans l'ensemble, les renseignements fournis par ce profil sont sujets à caution.

#### 6.32 PROFILS GEOPHYSIQUES SISMIQUES

Il n'en est pas du tout de même avec les profils sismiques qui

donnent d'excellents résultats, résultats confirmés par les sondages B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>, R<sub>5</sub> et les sondages à la tarière.

L'emploi de l'explosif se révèle très efficace sauf, lorsque la couche superficielle est gorgée d'eau ce qui est le cas des alluvions du lit de la rivière, au site de Burdana.

A cet endroit, une couche de 5 à 6 m de sable saturé recouvre les graviers et galets du fond de la Setit et, au moment de l'explosion, les ondes sismiques sont dissipées par le mélange sable-eau qui entre en vibration et elles ne peuvent atteindre les galets sous-jacents.

En ce qui concerne la vitesse des ondes sismiques dans les différentes formations, les résultats des profils donnent, en moyenne :

• sable fin et silt (couche superficielle)	350 m/s
• sable grossier et graviers	525-650 m/s
• graviers	1000-1200 m/s
• grès	2500-3300 m/s
• dyke basaltique	4500-5000 m/s

Nous avons pu constater que la vitesse varie beaucoup dans les grès, surtout en fonction de leur altération ; elle passe de 2500 m/s pour des grès sains, à 1500-1300 m/s et même 900 m/s pour des grès très altérés.

#### 6.4 LES PUIITS

La recherche systématique de matériaux de construction des digues nécessitait le creusement de 200 puits. Faute de temps et de moyens, 36 puits seulement ont été creusés dans la Fashaga et en rive droite de la Setit.

En ce qui concerne la recherche de matériaux graveleux, 31 puits ont été réalisés dans les zones d'emprunt de Kubur et de Zakaria et 8 puits ont été exécutés dans le lit de la Setit, à Burdana, pour la recherche d'agrégats de béton.

#### 6.5 LES TRANCHEES

Deux tranchées de 5 m de long et de 2 m de profondeur ont été creusées au Jebel Aklayit, afin de reconnaître les qualités de ce granite en profondeur.

Nous avons pu constater qu'il était altéré mais que cette altération n'empêchait pas son utilisation comme matériau d'enrochements.

## CHAPITRE 7

### MATERIAUX DE CONSTRUCTION

- 7.1 Caractéristiques géotechniques des formations superficielles.
- 7.2 Matériaux de construction : gisements et cubatures.

## 7.1 CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

Les matériaux utilisés pour la construction de l'ouvrage proviennent essentiellement des formations superficielles (graviers, silt, argile) et il est donc nécessaire de connaître le plus correctement possible les propriétés géotechniques de ces matériaux.

### 7.11 LA GRANULOMETRIE (Fig. 35, p.126)

La granulométrie associée aux limites d'Atterberg, permet d'appréhender les propriétés mécaniques des différentes formations.

Nous avons prélevé des échantillons de Cotton-soil, de Karab et de sable (sondage R<sub>5</sub>, dans la Fashaga) qui ont été analysés au moyen des méthodes granulométriques classiques (cf. annexe 6).

La figure 35, p.126, montre clairement les résultats obtenus :

- le Cotton-soil est très argileux (proportion d'argile variant de 60 % à 90 %) ;
- le Karab est essentiellement silteux (proportion de silt variant de 35 % à 48 %) ;
- les poches sableuses de la Fashaga sont constituées d'une forte proportion de sable fin à moyen.

### 7.12 LES LIMITES D'ATTERBERG (Fig. 36, p.127)

Elles marquent le changement de consistance de l'échantillon, en fonction de sa teneur en eau.

Ce changement d'état est mesuré par :

- une limite de plasticité (W<sub>p</sub> ou LP) entre l'état solide et l'état plastique ;
- une limite de liquidité (W<sub>L</sub> ou LL) entre l'état plastique et l'état liquide.

La différence entre ces deux limites est l'indice de plasticité I<sub>p</sub>, qui mesure l'étendue de la zone pour laquelle le matériau devient facilement déformable.

Ces essais ont été effectués sur 14 échantillons tamisés (< 400 μ), au moyen de l'appareil normalisé de CASAGRANDE et selon la méthode utilisée par le Laboratoire des Ponts et Chaussées.



Le tableau suivant donne les résultats des essais pour des échantillons de Cotton-soil et de Karab.

LIMITES D'ATTERBERG						
Formation	N°	Profondeur (m)	LL %	PL %	Ip %	Limite de retrait
Karab	AZ1	0.5	26.12	16.48	9.64	
Cotton-soil	AZ2	0.5	50.93	25.28	25.65	
Karab	AZ3	0.5	40.63	24.79	15.84	
Karab	AZ4	0.5	34.34	23.83	10.51	
Cotton-soil	AZ5	0.5	57.65	31.10	26.55	
Cotton-soil	AZ8	0.5	60.16	27.84	32.32	
Cotton-soil	AZ9	0.5	64.28	31.13	33.15	
Cotton-soil	43	0.5	66	30	36	13.05
Cotton-soil	48	0.5	61	31	30	14.33
Cotton-soil	49	0.5	78	32	46	11.84
Karab	50	0.5	57	29	28	19.96
Cotton-soil	51	0.5	93	36	57	13.71
Karab	53	0.5	51	28	23	19.51
Cotton-soil	54	0.5	65	28	37	12.9

Le diagramme de plasticité de CASAGRANDE (Fig. 36, p.127) permet de mieux visualiser les différences existant entre les deux formations étudiées. Nous remarquons en effet, que la ligne représentant l'indice de plasticité 25 est la limite séparant ces deux formations.

Le Cotton-soil fait partie des argiles grasses à plasticité élevée (CH dans la classification USCS), alors que le Karab est un mélange sable-argile, de plasticité faible à moyenne (SC-CL dans la classification USCS) (classification USCS in J. VERDEYEN et al. 1968).

En ce qui concerne les perméabilités, celles-ci sont de l'ordre de  $10^{-9}$  -  $10^{-10}$  m/s pour le Cotton-soil et de  $10^{-6}$  -  $10^{-7}$  m/s pour le Karab.

### 7.13 ANALYSES DES MINÉRAUX ARGILEUX AUX RAYONS X (Fig. 37, p.130)

L'examen des valeurs des limites d'Atterberg montre une différence notable entre les valeurs d'indice de plasticité du Cotton-soil et du Karab.

Ceci s'explique :

- . d'une part, par la plus forte proportion d'argile contenue dans le Cotton-soil ;
- . d'autre part, par une composition minéralogique différente de la phase argileuse.

Il nous a paru intéressant de comparer la nature et la proportion des minéraux argileux de chaque formation, en analysant trois échantillons de Cotton-soil et un échantillon de Karab par la méthode de diffraction des rayons X.

Les analyses ont porté sur les échantillons suivants :

	N° de l'échantillon	Indice de plasticité (Ip)
. Cotton-soil	(43)	36
	(54)	37
	(49 (très plastique))	46
. Karab	53	23

La figure 37, p. , présente les diffractogrammes simplifiés de l'échantillon de Karab (53) et d'un échantillon de Cotton-soil (43). Ces courbes permettent une étude qualitative mais non quantitative ; cependant, nous essaierons de donner, un peu plus loin, les pourcentages de chaque minéral argileux contenu dans les échantillons.

Nous avons en effet calculé les rapports des différents minéraux argileux d'après leur hauteur de pic respective, sans aucune correction et également d'après leur surface de pic ; ces deux méthodes nous donnant un chiffre moyen.

Signalons cependant que ces rapports peuvent être faussés par le fait que certains minéraux diffractent mieux, à quantité égale ; c'est en particulier le cas de la kaolinite.

Nous estimons que, par cette méthode, l'erreur commise sur chaque pourcentage varie de 5 % à 10 %.

Nous allons maintenant aborder l'interprétation des courbes obtenues.

#### 7.131 Cotton-soil

Tous les échantillons analysés (43, 49, 54) présentent :

- . de la chlorite avec un pic principal légèrement décalé

Echantillon 53

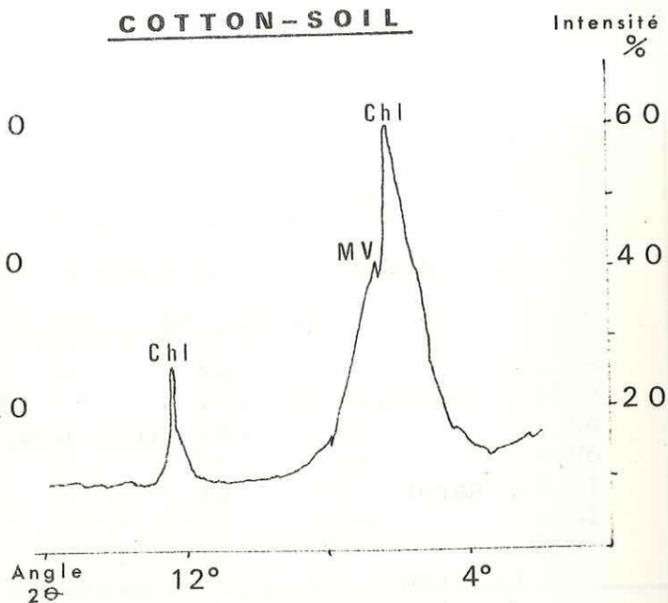
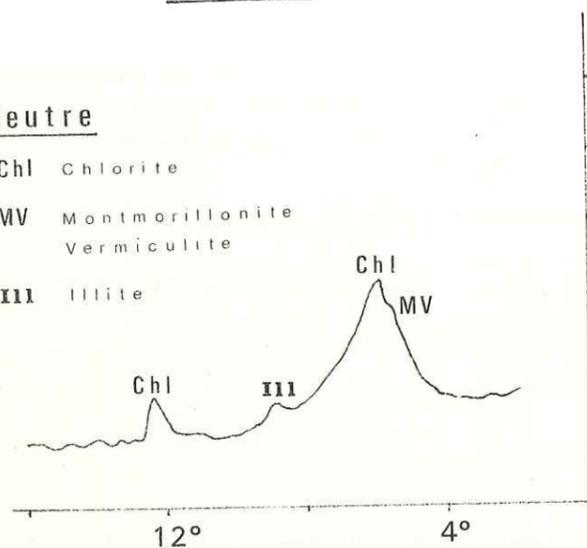
Echantillon 43

KARAB

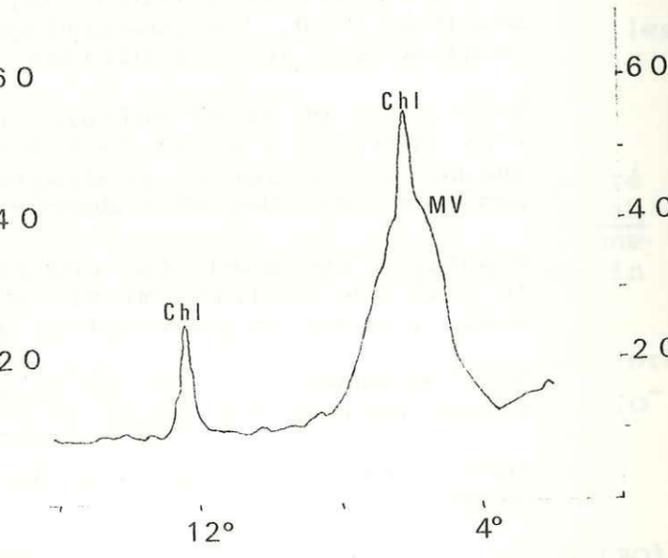
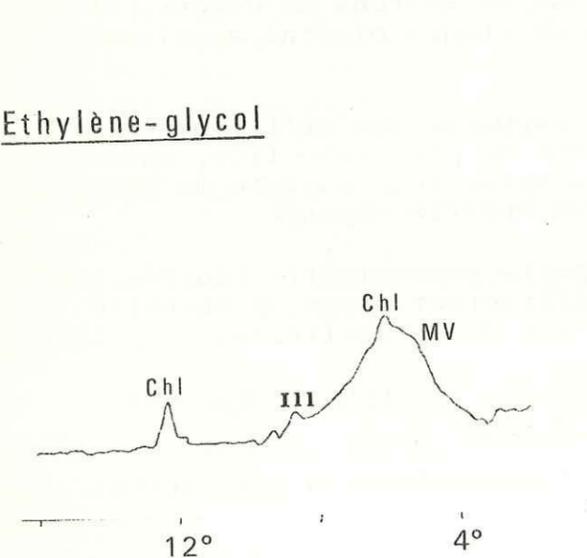
COTTON-SOIL

Neutre

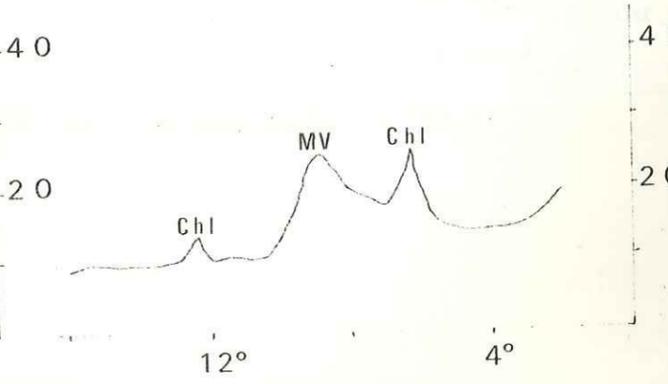
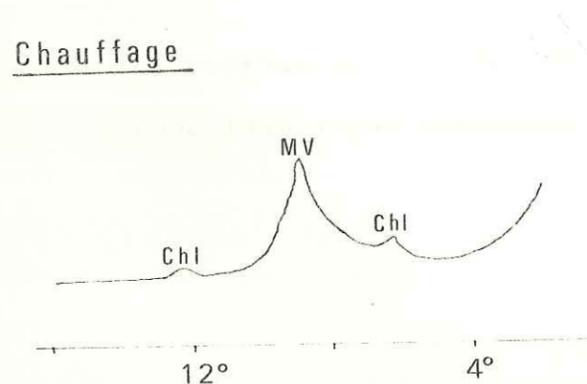
Chl Chlorite  
 MV Montmorillonite  
 Vermiculite  
 Ill Illite



Ethylène-glycol



Chauffage



à  $14.36 \text{ \AA}$  ; les pics annexes sont nets ( $7,18 \text{ \AA}$  ;  $4,77 \text{ \AA}$  ;  $3,58 \text{ \AA}$ ).

- une forte proportion d'un mélange constitué de vermiculite ( $14 \text{ \AA}$ ) prédominante, de montmorillonite ( $14 \text{ \AA}$ ) d'un interstratifié montmorillonite-vermiculite et probablement d'interstratifiés illite-montmorillonite, illite-chlorite, montmorillonite-chlorite et vermiculite-chlorite.
- de la kaolinite en très faible quantité apparaissant avec les pics secondaires de la chlorite.

En ce qui concerne les minéraux du mélange, il faut remarquer que le gonflement à l'éthylène-glycol est peu important ce qui indique une faible teneur en montmorillonite pure, par contre, un léger pic existe à  $14 \text{ \AA}$ , indice de l'importance de la vermiculite, minéral non gonflant.

L'interstratifié montmorillonite-vermiculite est présent.

L'illite est pratiquement inexistante car elle ne présente pas de pic net à  $10 \text{ \AA}$ , cependant, le chauffage montre une zone intermédiaire entre les pics à  $14 \text{ \AA}$  (chlorite) et les pics à  $10 \text{ \AA}$  (montmorillonite, vermiculite, illite), qui correspond très probablement à un interstratifié illite-chlorite.

Les interstratifiés montmorillonite-chlorite, vermiculite-chlorite et illite-montmorillonite peuvent exister en raison des pics à  $14 \text{ \AA}$  et à  $10 \text{ \AA}$  qui sont communs à tous ces minéraux, mais leur présence n'a pu être confirmée.

Les proportions des différents minéraux argileux sont données dans le tableau suivant :

MINERAUX	%
Illite	0-5
Chlorite + kaolinite (très faible)	10-15
Vermiculite + Montmorillonite + Interstratifiés	85

Par ailleurs, nous avons remarqué que l'échantillon 49, bien qu'ayant une teneur en montmorillonite et vermiculite sensiblement égale aux échantillons 43 et 54, était moins riche en chlorite que ces derniers.

La chlorite étant un minéral phylliteux peu gonflant, ceci explique, à notre sens, les différences d'indices de plasticité entre les échantillons d'une même formation car la présence de chlorite réduit les propriétés plastiques de la montmorillonite.

Le tableau ci-dessous, montre les variations d'indice de plasticité en fonction de la composition minéralogique du matériau.

Echantillon	Minéraux constitutifs	Ip
43	Vermiculite + Montmorillonite + Interstratifiés + Chlorite	36
54	Vermiculite + Montmorillonite + Interstratifiés + Chlorite	37
49	Vermiculite + Montmorillonite + Interstratifiés + Chlorite (faible)	46

7.132 Karab

Comme précédemment, nous retrouvons dans l'échantillon 53 les principaux minéraux argileux contenus dans le Cotton-soil.

La chlorite est en quantité moindre, les pics sont moins bien individualisés mais le pic principal est encore décalé aux environs de  $14.36 \text{ \AA}$ .

Le mélange formé de vermiculite, de montmorillonite et des interstratifiés occupe toujours une place très importante mais, si la vermiculite est encore prépondérante, la teneur en montmorillonite s'est accrue (gonflement à l'éthylène-glycol). Par contre, la liaison basse existant entre les pics  $14 \text{ \AA}$  et  $10 \text{ \AA}$  indique que l'interstratifié illite + chlorite est réduit.

La présence d'illite est attestée par un pic net à  $10 \text{ \AA}$  mais son pourcentage est très faible ; il en est de même pour la kaolinite qui est encore présente.

Nous avons essayé d'évaluer dans le tableau suivant, les proportions des différents minéraux :

MINERAUX	%
Illite	5
Chlorite	5-10
Kaolinite	0-5
Vermiculite + Montmorillonite + Interstratifiés	80-85

Remarquons que, comme pour l'échantillon 49, sa faible teneur

en chlorite devrait lui conférer un indice de plasticité élevé, or, c'est le plus faible de tous ( $I_p = 23$ ).

Nous avons vu (8.1) que la fraction argileuse est de 60 à 90 % pour le Cotton-soil alors qu'elle atteint à peine 40 % pour le Karab. Une proportion considérable de silt et sable fin intervient donc dans les mesures des limites d'Atterberg du Karab et cette fraction plus grossière entraîne forcément une réduction de l'indice de plasticité.

Par ailleurs, et quoiqu'elle joue un rôle mineur dans les limites d'Atterberg, nous pouvons également rappeler le rôle de la structure de l'illite.

L'illite est constituée d'une superposition de micas de très petite taille qui, en ne permettant pas à l'eau de pénétrer dans les feuillets, l'empêchent de gonfler. Il est certain qu'en s'additionnant, même en faible quantité, à la chlorite (minéral phylliteux), l'illite tend à réduire la plasticité du matériau.

7.14 LE COMPACTAGE

Les qualités géotechniques des formations superficielles et en particulier leur comportement lors du compactage, détermineront leur utilisation lors de la construction du barrage.

Les résultats d'essais Proctor en notre possession, sont malheureusement très peu nombreux (quatre seulement) et ne concernent que des échantillons de Karab.

Pour le Cotton-soil, bien que l'absence de résultats expérimentaux soit un sérieux handicap, nous essayerons cependant de prévoir son comportement lors du compactage.

Les résultats des essais Proctor, effectués sur des échantillons de Karab au Laboratoire de Mécanique des Sols de Grenoble, montrent que :

- le poids spécifique maximal du sol sec, ou "densité sèche" ( $\gamma_d \text{ max}$ ), est compris entre  $1.38 \text{ g/cm}^3$  et  $1.66 \text{ g/cm}^3$  ;
- la teneur en eau optimale ( $W \% \text{ opt.}$ ) varie de 21.4 % à 28.75 %.

Le ravinement existant à l'état naturel ne manquera certainement pas d'apparaître si les digues sont construites uniquement avec ce matériau dont les caractéristiques sont assez mauvaises (en particulier le poids spécifique du sol sec).

Pour éviter cet inconvénient, il paraît nécessaire de construire

re les endiguements avec un mélange cohérent silt-argile (Karab-Cotton-soil), dans les proportions optimales déterminées au laboratoire.

La principale difficulté du compactage est de maintenir en permanence la teneur en eau optimale, Si elle oscille entre 21 % et 28 % pour un terrain silteux, on peut estimer que cette variation sera plus réduite pour un terrain argileux.

Le Cotton-soil aura un comportement très "pointu", c'est-à-dire que sa teneur en eau sera très stricte et nécessitera donc une surveillance constante, si l'on veut éviter la dessiccation et la formation de fentes de retrait ou la transformation du chantier en un immense borbier.

En se référant au tableau synthétique relatif à l'aptitude des différents sols au compactage (G. ARQUIE, 1970), le Karab et le Cotton-soil présentent les caractéristiques suivantes :

	Sol de fondation quand l'action du gel n'est pas à craindre	Possibilité de tassements et de gonflements	Caractéristiques drainantes	Engins de compactage	Densité sèche moyenne (g/cm <sup>3</sup> )
Limons Karab (SC-CL) LL ≤ 50	Médiocre à passable	Faible à moyenne	Médiocres à pratiquement imperméables	Rouleaux à pieds de mouton à pneus	1.44 à 2.08
Argiles Cotton-soil (CH) LL > 50	Médiocre à passable	Elevée	Pratiquement imperméables	Rouleaux à pieds de mouton à pneus ; étroite surveillance W %	1.44 à 1.84

Signalons qu'une amélioration très nette des caractéristiques des matériaux fins, peut être obtenue en ajoutant un faible pourcentage de chaux vive (environ 5 %) ; cette technique est employée pour la construction de routes et de pistes, sur des limons ou des sols tropicaux (G. ARQUIE, 1970 - G.E. EKODECK, 1975).

En ce qui concerne les engins de compactage, on pourra utiliser :

- le rouleau à pieds de mouton et ses dérivés (tamper), qui ont été créés pour compacter les sols fins et qui leur sont bien adaptés ;

- les compacteurs à pneus qui sont également adaptés à ces sols, mais pour lesquels des problèmes de traficabilité peuvent se poser (enlèvement).

En conclusion, les indications que nous avons pu fournir ne sauraient remplacer une étude sérieuse basée sur des essais Proctor et surtout sur d'indispensables essais de compactage en vraie grandeur.

#### 7.15 CONCLUSION

Les qualités géotechniques permettent de classer grossièrement les formations étudiées en :

- une formation argileuse : le Cotton-soil ;
- une formation silteuse : le Karab.

Lors de la construction de l'ouvrage, il semble évident que le Cotton-soil, imperméable, pourra être utilisé pour la construction du noyau argileux et le Karab, pour les endiguements.

Cependant, ces formations qui sont très étendues, posent un problème qualitatif car, les variations de plasticité sont importantes et nécessitent une zonéographie correcte.

#### 7.2 MATERIAUX DE CONSTRUCTION : GISEMENTS ET CUBATURES

La disponibilité en matériaux de construction et leur proximité du site influent beaucoup sur le prix de revient de l'ouvrage, car le transport coûte cher.

Il est donc nécessaire de rechercher systématiquement les zones d'emprunt possibles en tenant compte du volume des matériaux, de leurs qualités géotechniques, de leurs facilités d'exploitation et de leur éloignement des sites.

Il est bien évident que pouvoir réunir ces quatre conditions est rare et qu'il faut souvent choisir au détriment d'un de ces facteurs.

Nous allons passer en revue les matériaux de construction disponibles dans la région.

#### 7.21 LE COTTON-SOIL

Terrain très argileux, d'indice de plasticité supérieur à 25, il forme les plateaux du paysage, en rive gauche de l'Atbara, au sud de la Fashaga et en rive droite de la Setit. La quantité de matériau disponible est considérable mais les qualités géotechniques varient beaucoup (7.1).

Le Cotton-soil est la seule formation argileuse de la région et pourra être employé pour constituer le noyau des barrages. Dans le cas de la construction de digues à noyau, il pourrait également constituer le noyau de celles-ci.

#### 7.22 LE KARAB

Ce terrain est très répandu dans la région, surtout dans la Fashaga, et aucun problème de quantité ne se pose.

Nous avons pu constater que des zones sableuses existent çà et là et une sérieuse étude de mécanique des sols est en cours, afin de préciser les qualités mécaniques du Karab, et de localiser les zones d'isoplasticité.

Le matériel présentant les meilleures caractéristiques sera alors utilisé pour la construction des endiguements.

Pour éviter une érosion trop importante, ces digues devront être protégées.

#### 7.23 LES MATERIAUX GRAVELEUX

Ils pourront être utilisés pour les recharges amont et aval des barrages.

##### 7.231 En bordure de l'Atbara

###### a. Kubur

Les réserves les plus connues sont les accumulations de graviers existant de chaque côté de l'Atbara au niveau du village de Kubur, en amont du site de Rumela.

En rive gauche, les dépôts recouvrent la série nubienne et sont le plus souvent superficiels.

En rive droite, les graviers ne constituent pas de gros amas facilement excavables car ils se répartissent le long des khors en formant de petites terrasses emboîtées. Leur épaisseur est en moyenne de 3 à 4 mètres mais elle peut parfois dépasser 10 mètres. Leur extension horizontale n'est malheureusement pas constante.

Les dépôts étant plus épais en rive droite qu'en rive gauche, les conditions d'exploitation y sont plus favorables en dépit d'un relief plus raviné.

###### b. Rumela

A l'aval du site, deux gisements intéressants existent :

- . en rive gauche, sous le village de Rumela, des graviers épais de 6 à 7 mètres, reposent directement sur les Grès de Nubie ;
- . en rive droite, entre les deux vallées remblayées, une épaisse accumulation de graviers, encadrée par des grès taillés à pic, forme une falaise de plus de 10 mètres, mais l'extension du dépôt vers l'Est est masquée par le Karab.

Dans les deux cas, l'accès est difficile (gorges), mais ces gisements peuvent fournir un appoint substantiel.

###### c. Sofi

Plus en amont, en face du village de Sofi, en rive droite, une petite réserve de graviers pourrait être utilisée. Ce gisement est cependant assez éloigné du site.

##### 7.232 En bordure de la Setit

Une importante zone graveleuse formant de petits mamelons, existe en amont du site de Burdana, près du village de Zakaria, en rive droite.

Les investigations menées dans cette région se sont limitées à la partie basse et on peut espérer de meilleurs résultats lors des prochaines campagnes.

##### 7.233 Conclusions

Les investigations effectuées permettent d'estimer les réserves des zones de Kubur et de Zakaria, à 2.7 millions de m<sup>3</sup>.

La prospection de l'ensemble des gisements répertoriés devrait permettre d'atteindre un chiffre supérieur (6 millions de m<sup>3</sup> sont nécessaires) cependant, même si le volume de matériau existe, l'exploitation ne sera pas facile, en raison de la faible épaisseur et de l'extension réduite de chaque gisement.

#### 7.24 LES ALLUVIONS DU LIT DES RIVIERES

Les alluvions sont essentiellement constituées de galets et de graviers de basalte et leur utilisation pour agrégat de béton est à retenir. En effet, ces matériaux ne contiennent qu'une faible proportion d'argile et ne nécessite pratiquement aucun lavage.

Bien qu'aucune évaluation précise n'ait été faite, il ne fait aucun doute que de très grandes quantités sont disponibles tant sur la Setit que sur l'Atbara et ce, à proximité même des sites.

#### 7.25 MATERIAUX D'ENROCHEMENTS

Le granite du Jebel Aklayit peut fournir des enrochements de bonne qualité, mais son altération devra auparavant être étudiée.

Bien qu'une dégradation importante des enrochements soit peu probable à l'échelle des travaux comme pendant la durée de vie des barrages, il nous semble souhaitable d'effectuer des mesures d'altérabilité de la roche.

Ce granite, altéré en boules, a en effet subi divers épisodes tectoniques, ses minéraux ferromagnésiens sont très altérés et les variations thermiques et hygrométriques pourraient accélérer sa désagrégation.

En dépit de son altération, ce massif possède cependant de nombreux avantages : volume considérable (40 millions de m<sup>3</sup>), parois abruptes permettant l'ouverture d'un front de taille et relative proximité des sites (15 km de Burdana, 18 km de Rumela).

Le Jebel Wad Ummar, relief basaltique, pourrait également fournir des enrochements de bonne qualité mais sa morphologie trop plate, son volume plus faible (10 millions de m<sup>3</sup> environ) et surtout son éloignement des sites empêchent une exploitation rentable.

## CHAPITRE 8

### CARACTERISTIQUES DES OUVRAGES

- 8.1 Choix du type de barrage
- 8.2 Caractéristiques des barrages
- 8.3 Les réservoirs

### 8.1 CHOIX DU TYPE DE BARRAGE

Le principe d'un barrage double étant retenu, il est important de savoir quel type d'ouvrage peut être envisagé suivant les conditions de stabilité et d'étanchéité.

#### 8.11 QUALITES GEOTECHNIQUES DES FONDATIONS

La qualité médiocre des grès ajoutée à la fracturation des sites constitue le problème primordial car il ne saurait être question de construire un ouvrage en béton sur une assise aussi friable.

Les analyses effectuées au Laboratoire de Mécanique des Sols de Grenoble, sur des échantillons prélevés dans le sondage B<sub>10</sub>, permettent en effet de constater leur faible résistance à la compression simple (Rc) et leur grande déformabilité (E).

Burdana B <sub>10</sub>	Teneur en eau W%	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Rc (bars)	Module E (bars)
2129	0.92	2.26	35.01	1800
2130	1.17	2.35	73.75	6500
2131	3.03	2.15	27.30	1430

D'autre part, la forte épaisseur des alluvions non consolidées du lit des rivières ne peut que renforcer l'argument précédent et empêcher tout-à-fait la réalisation d'un ouvrage en béton.

#### 8.12 ETANCHEITE

L'agencement géométrique des discontinuités du bed-rock favorise l'établissement de circulations au sein des appuis de l'ouvrage.

Cependant, le rôle de ces fractures n'est pas connu en profondeur et il est probable qu'elles ont tendance à se refermer.

Seuls des essais d'eau bien conduits pourraient quantifier ces circulations et indiquer leur évolution en profondeur.

En ce qui concerne les alluvions, l'étanchéité ne pourra être obtenue que par une coupure étanche du type paroi moulée.

### 8.13 RECHERCHE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Les matériaux argileux (Cotton-soil) disponibles en abondance au voisinage du barrage, peuvent convenir à la réalisation d'un noyau étanche mais non à l'édification d'une digue en terre homogène.

Les matériaux graveleux n'existent pas en grande quantité et sont disséminés dans toute la région (Kubur, Rumela, Zakaria, Sofi), ce qui risque de rendre l'exploitation difficile.

Par contre, l'exploitation des alluvions de rivière est facile et ces matériaux conviennent parfaitement pour la fabrication de béton.

En ce qui concerne les enrochements, une carrière ouverte dans le Jebel Aklayit (granite) peut fournir des matériaux de bonne qualité, en quantité suffisante.

### 8.14 TYPE DE BARRAGE

L'examen des conditions géologiques et géotechniques nous a montré qu'un ouvrage en béton n'est pas réalisable. Seul, un ouvrage souple peut supporter des tassements différentiels et permettre ainsi de conserver une partie des terrains meubles sous le barrage.

La solution finalement adoptée pour chaque site, est celle d'un barrage souple en enrochements, prolongé par des digues en terre.

### 8.2 CARACTERISTIQUES DES BARRAGES

L'ouvrage sera un barrage double avec digue centrale, dont la longueur totale atteindra 11 km.

A la cote maximale 520, la capacité totale des réservoirs avoisinera 4 milliards de m<sup>3</sup>; cependant, le transport solide étant très important, l'utilisation de la capacité maximale entraînerait, par suite du comblement des retenues, la diminution annuelle de la quantité d'eau fournie pour l'irrigation.

Or, la mise en valeur de la région exige la fourniture d'un volume d'eau constant et ce, pendant une très longue période, afin d'assurer la rentabilité des exploitations agricoles.

Le système de Rumela et Burdana est donc un compromis entre le développement de l'irrigation, la production d'électricité et le contrôle de la sédimentation, pendant une période d'environ 100 ans.

Seul Rumela sera équipé pour la production d'électricité; la production électrique moyenne annuelle a été évaluée à  $80 \times 10^6$  Kwh à la fin du projet.

Si les critères économiques influent fortement sur la détermination des caractéristiques de l'ouvrage, les critères physiques jouent également un rôle non négligeable.

Outre la sédimentation, un des principaux facteurs physiques à considérer est le problème des crues. En effet, les débits des crues millénaires ont été évalués à 11.000 m<sup>3</sup>/s pour la Setit et à 6.000 m<sup>3</sup>/s pour l'Atbara. Les évacuateurs de crues ont donc dû être dimensionnés en conséquence, ce qui a une grosse incidence sur le projet de génie civil, donc sur les reconnaissances.

### 8.21 LE BARRAGE DE BURDANA

#### 8.211 Conception du barrage (Fig. 38, p.144 et 39, p.145)

La construction d'un barrage en enrochements de 46.5 m de haut (au-dessus du lit de la rivière) et de 900 m de longueur en crête, permet de créer un réservoir de  $1.080 \times 10^6$  m<sup>3</sup> pour un niveau de retenue maximum, à la cote 520.

La crête de l'ouvrage est située à la cote 523.5.

Le noyau argileux est incliné vers l'amont afin de mieux assurer la stabilité de l'ouvrage et de diminuer l'importance de la recharge aval.

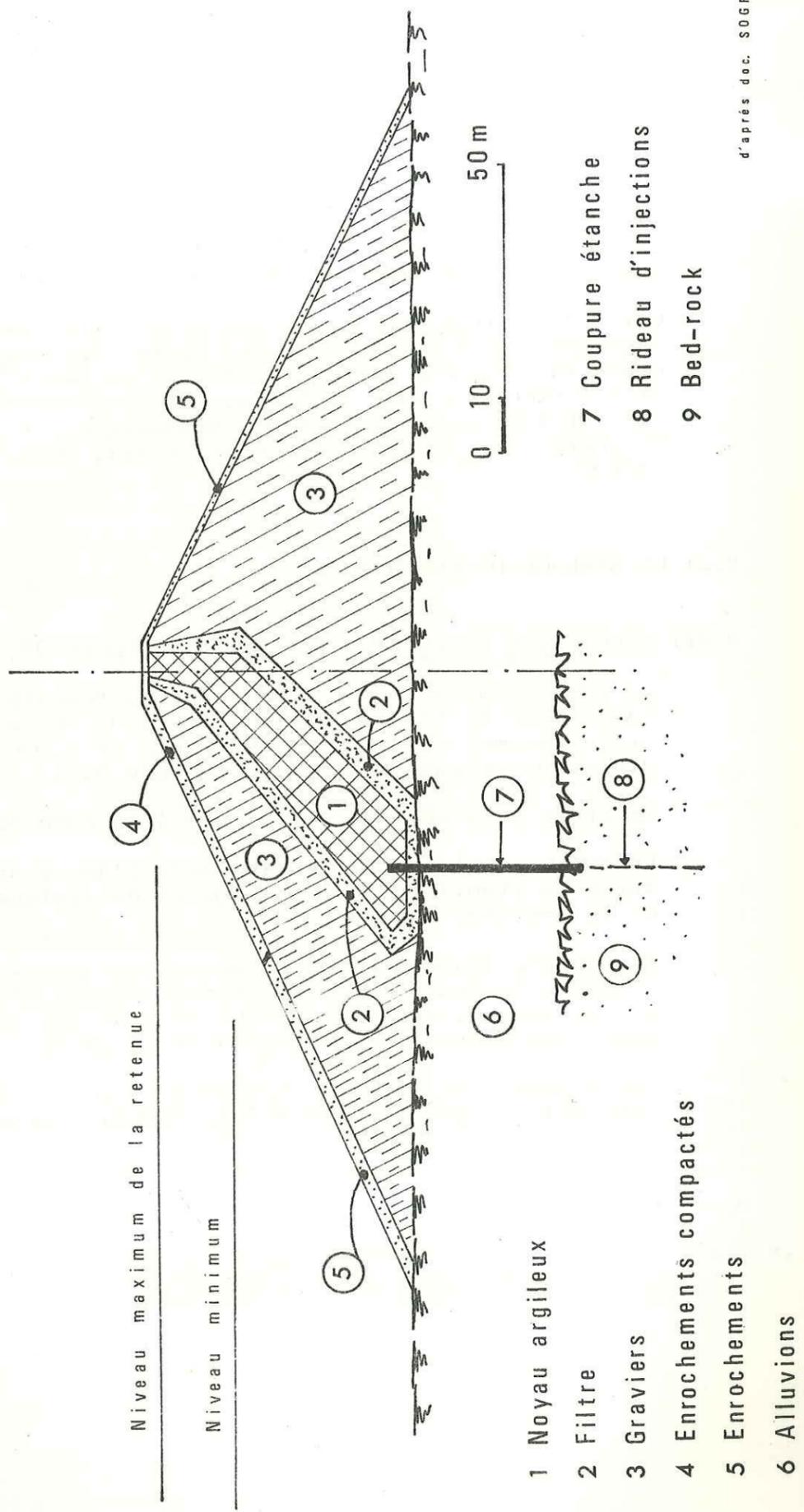
La coupure étanche est assurée par des parois moulées qui rejoignent le bed-rock. D'importants voiles d'injection sont prévus sous la coupure étanche et dans les appuis, afin de prévenir des fuites importantes dans la série gréseuse.

Les digues sont en terre homogène; leur crête est située à la cote 524, ce qui leur donne une hauteur maximale de 23 m.

#### 8.212 Evacuateurs de crues (Fig. 40, p.147)

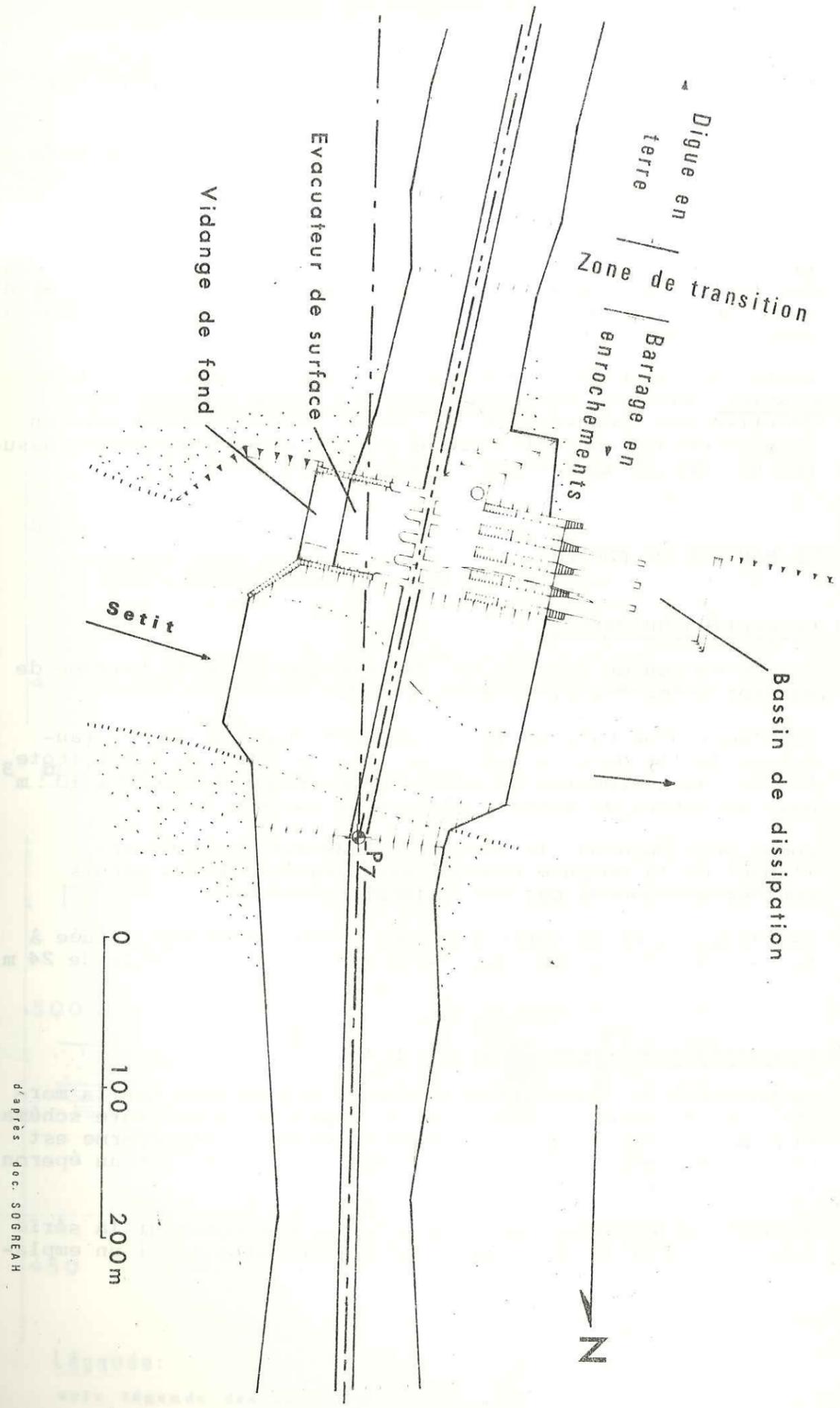
Le système d'évacuation des crues est conçu pour laisser passer la crue millénaire soit  $11.000$  m<sup>3</sup>/s.

Coupe schématique du barrage de Burdana



d'après doc. SOGREAH

Plan schématique du barrage de Burdana



d'après doc. SOGREAH

Il a été placé en rive gauche car l'entrée de l'évacuateur peut bénéficier de la morphologie favorable constituée par un petit khor.

Ce système d'évacuation se compose d'un évacuateur de surface et de quatre tunnels pour la vidange de fond, la position de ces ouvrages bétonnés étant superposée afin d'utiliser le même bassin de dissipation.

Il faut ici remarquer que cette réalisation se heurtera à des difficultés géologiques. Ce bassin de dissipation est en effet situé après les derniers affleurements de grès, juste dans la zone d'effondrement aval couverte par des limons.

Cette zone correspond à une fosse remplie d'environ 25 m de graviers qui sont très sensibles à l'affouillement. Afin d'éviter cet inconvénient, le bassin de dissipation sera un ouvrage bétonné dont la stabilité sera vraisemblablement assurée par des pieux, ancrés si possible au bed-rock.

8.22 LE BARRAGE DE RUMELA

8.221 Conception du barrage

La conception du barrage est la même que celle du barrage de Burdana (Fig. 38, p.144 et 39, p.145).

Il s'agit d'un barrage en enrochements haut de 51.5 m (au-dessus du lit de la rivière) et long de 800 m en crête (cote 525.0), qui permettra de créer un réservoir de 2.620 x 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> pour un niveau de retenue maximum, à la cote 520.

Comme pour Burdana, le noyau argileux est incliné vers l'amont et la coupure étanche est assurée par des parois moulées prolongées par des injections.

Les digues sont en terre homogène ; leur crête est située à la cote 525.5, ce qui leur donne une hauteur maximale de 24 m.

8.222 Evacuateurs de crues (Fig. 40, p.147)

La position de l'évacuateur de crues est imposée par la morphologie du site. En effet, la rive gauche se présente schématiquement comme un escalier dont la première plateforme est peu élevée, alors que la rive droite est formée par un éperon rocheux massif.

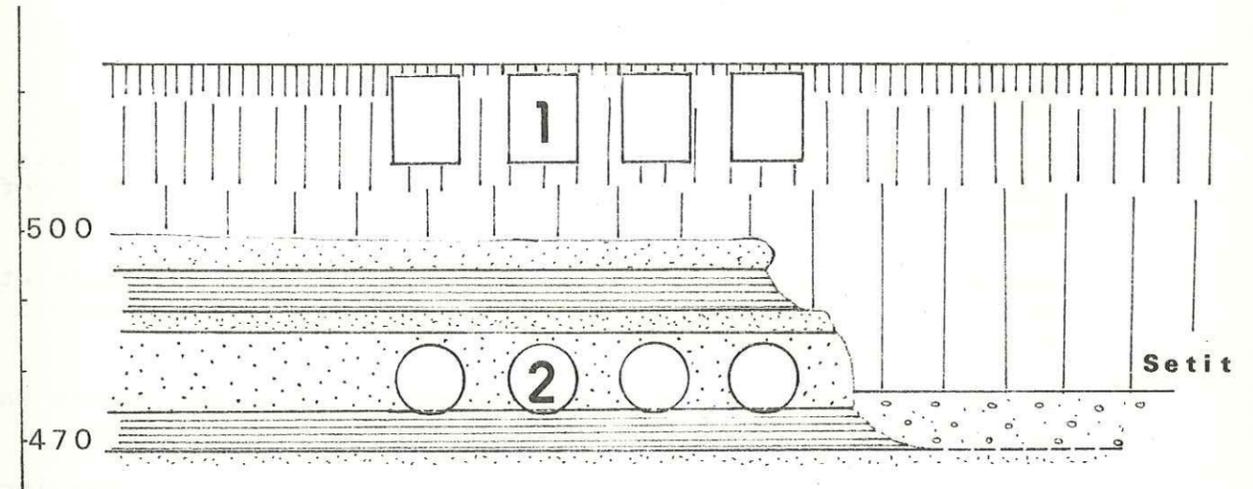
En amont rive gauche, un khor entaille profondément la série gréseuse (grès en gros bancs) et il constitue ainsi un empla-

Emplacement des évacuateurs de crues

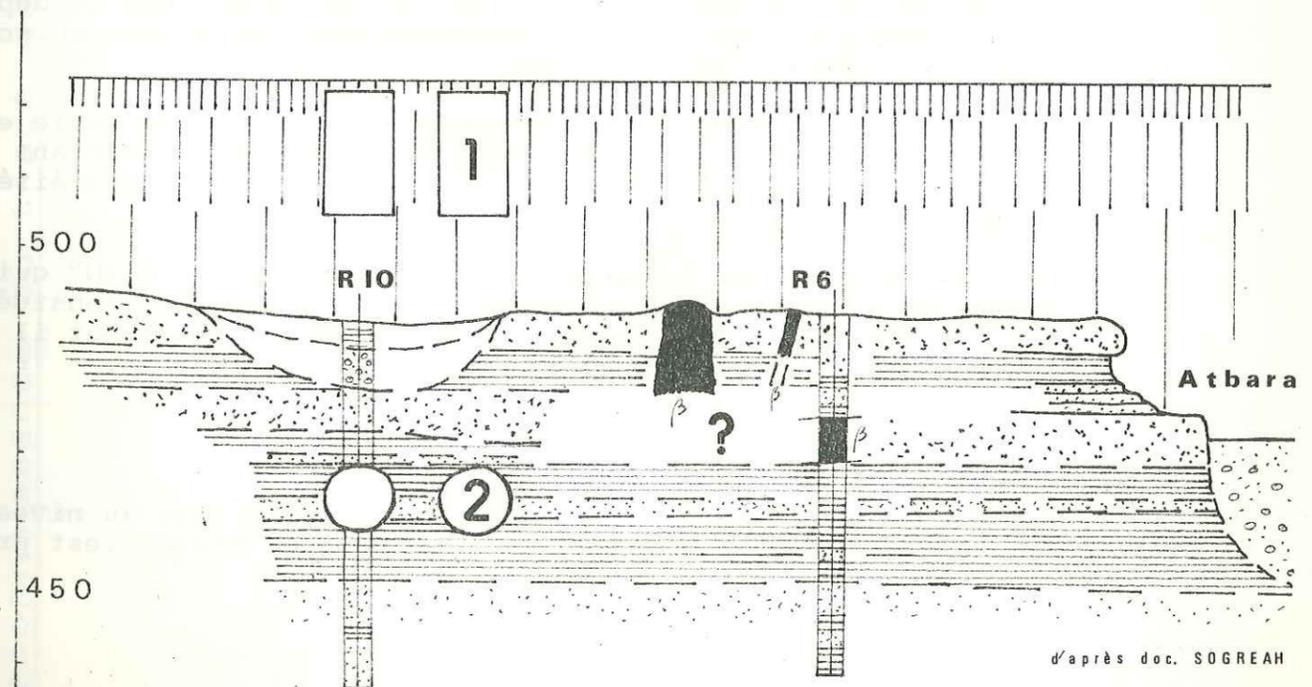
- 1 Evacuateur de surface
- 2 Vidange de fond (tunnels)

Coupes au niveau de l'axe des barrages

BURDANA rive gauche



RUMELA rive gauche



Légende:

voir légende des sites



d'après doc. SOGREA

cement idéal pour l'entrée de l'évacuateur.

Le système d'évacuation des crues est prévu pour laisser passer la crue millénaire soit  $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$  et se compose d'un évacuateur de surface et de deux tunnels pour la vidange de fond.

Ces ouvrages sont superposés afin d'utiliser le même bassin de dissipation qui sera construit à cheval sur les grès et les alluvions du lit de la rivière (20 m d'épaisseur environ), ce qui impose une conception et une réalisation soignées.

8.23 LES DIGUES (Fig. 41, p.149)

8.231 Reconnaitances effectuées

Le tracé des digues a été reconnu par géophysique dans la Fashaga et en rive droite de Burdana, sous la forme de profils longitudinaux.

Ces profils ont été complétés en rive gauche (flanc sud) et en rive droite (flanc nord) de Burdana, par des sondages à la tarière espacés de 100 m.

Les profils montrent des grès fracturés, déjà mentionnés dans la Fashaga (5.3), recouverts de silts et de sables fins.

Les matériaux grossiers (sable grossier, graviers) sont localisés à la surface des grès ; mais, par endroits, les sondages ont rencontré un niveau argileux dont il serait intéressant de connaître l'épaisseur, l'extension et la perméabilité.

Il est malheureusement probable qu'en raison du type de dépôt très irrégulier des couches superficielles, ce niveau ne soit pas homogène mais lenticulaire.

L'existence de dépôts épais de sable grossier ou de sable et graviers constitue un risque important, car, en favorisant les circulations, ils provoquent une diminution de l'étanchéité et de la stabilité.

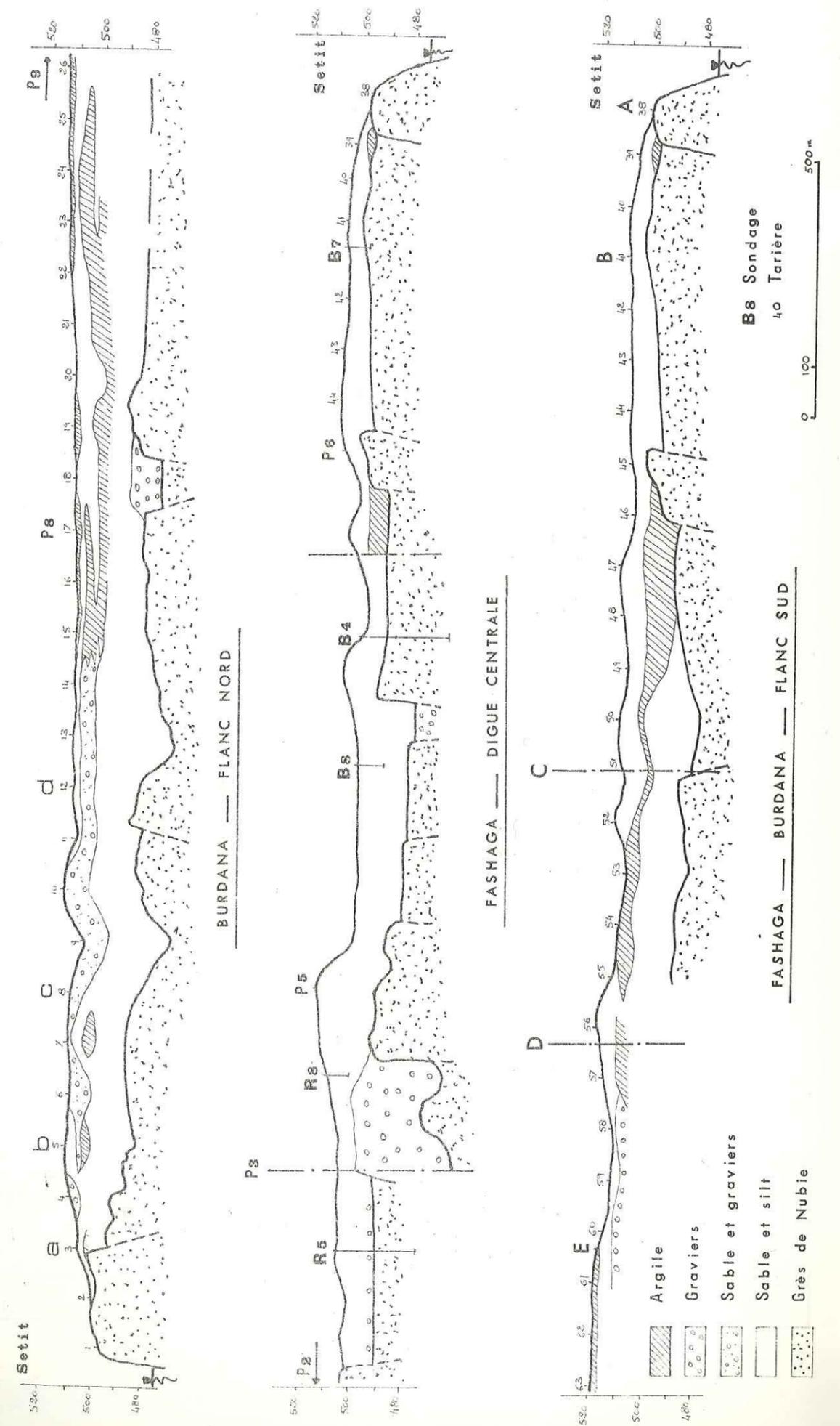
En rive droite, par exemple, au-delà de la faille N 50° qui passe vers le sondage 3, le remplissage sableux est considérable. Au sondage 7, la tarière s'est arrêtée à 22.5 m et il est probable qu'elle a rencontré le bed-rock à ce niveau.

8.232 Conception des digues

Le problème principal étant celui des circulations au niveau des dépôts sableux et graveleux, une coupure étanche est prévue

Reconnaissance du tracé des digues

d'après profils géophysiques



dans le cas où le risque de fuite serait trop important.

Si les résultats de mécanique des sols ne permettent pas d'envisager la construction d'une digue homogène, en employant les matériaux les plus argileux du Karab, celle-ci sera remplacée par une digue à noyau de même conception que les barrages.

Afin d'éviter une érosion trop intense, il sera nécessaire de protéger ces digues, par un tapis végétal par exemple et, à l'amont, par un rip-rap.

### 8.3 LES RESERVOIRS

Précisons qu'il n'existe actuellement aucune carte détaillée des retenues.

La capacité totale des deux réservoirs approche 4 milliards de m<sup>3</sup> à la cote maximale 520 ; à ce niveau, la longueur des retenues est comparable à celle du barrage de Khashm El Girba, à l'aval, c'est-à-dire 60 km environ.

Les principales questions qui se posent pour les retenues sont d'une part les possibilités de fuites et d'autre part, dans notre région, l'ensablement et le comblement des réservoirs.

### 8.31 LES POSSIBILITES DE FUITES

Le problème des grandes retenues est celui que R. BARBIER appelle "le risque théorique de fuites", c'est-à-dire la longueur de percolation éventuelle qui sépare la future retenue d'autres points bas divergents de même cote, correspondant soit à d'autres rivières, soit à de grands affluents de la même rivière qui débouchent à l'aval du barrage et peuvent donc le contourner".

Or, la topographie de la région est un vaste plateau possédant deux rivières très encaissées, l'Atbara et la Setit.

Ce risque théorique de fuites ne peut donc exister que d'une vallée vers l'autre (avec d'ailleurs récupération des fuites éventuelles à Khashm El Girba), et les distances de percolation sont suffisamment grandes pour estimer que toute fuite de ce genre est pratiquement impossible.

A ce risque théorique, il faut associer le "risque réel" qui est naturellement fonction de la perméabilité des terrains intéressés et de la hauteur des ouvrages (gradient hydraulique). Au niveau des terrains de couverture (Cotton-soil et

Karab), à l'échelle de la retenue, ce risque est pratiquement inexistant. Par contre, il existe au niveau des sites et surtout dans la Fashaga où les accumulations de sable et de graviers peuvent atteindre de grandes dimensions.

Cependant, les reconnaissances ultérieures auront localisé précisément ces zones perméables qui seront alors traitées spécialement (coupure étanche, injections).

En ce qui concerne le bed-rock, on peut estimer qu'à l'échelle de la retenue, tout risque de fuite est à écarter.

Il n'en est évidemment pas de même au niveau des sites où les grès fracturés nécessiteront d'importantes injections.

### 8.32 L'ENSABLEMENT

L'ensablement est le problème majeur des retenues de cette région car les rivières transportent beaucoup de matériaux meubles qui proviennent en majorité de l'érosion des formations superficielles telles que le Karab et pour une plus faible part, des massifs éthiopiens.

Les prélèvements effectués sur les deux rivières permettent d'évaluer le volume total de sédiment transporté à environ 50 millions de tonnes par an dont 35 millions de tonnes pour la Setit.

Ces apports énormes ne permettent pas d'utiliser la capacité totale des retenues car, en raison du comblement de celles-ci, la quantité d'eau fournie pour l'irrigation diminuerait chaque année, ce qui nuirait beaucoup à la mise en valeur de la région.

Pour assurer une exploitation de 100 ans, il a donc été décidé de réduire la capacité des retenues afin de toujours conserver le même volume utile, malgré les apports annuels.

Ainsi à Burdana, la cote d'exploitation du réservoir sera 514.5, au début, et elle atteindra 520, un siècle plus tard. A Rumela, la cote d'exploitation du réservoir sera 517.5 au départ et 521.5 au bout d'un siècle.

Le tableau suivant récapitule les caractéristiques hydrauliques des deux réservoirs :

Capacité du réservoir	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	
	RUMELA	BURDANA
Capacité totale à la cote 520	2.620	1.080
Volume utile	entre 517.5 et 508.5 1.300	entre 514.5 et 508.5 300
Volume mort à la cote 508.5	900	320

Une communication naturelle existe entre les deux réservoirs, dans la Fashaga mais les réservoirs de Rumela et de Burdana ne peuvent pas être reliés car le contrôle de la sédimentation dans ce dernier nécessite que celui-ci opère indépendamment de Rumela. C'est pourquoi, une digue est prévue au milieu de la Fashaga (Burdana-Flanc sud) pour empêcher toute communication.

### 8.33 STABILITE DES RIVES

Les risques de glissements éventuels sur les rives ne peuvent se développer que dans le Karab, car le Cotton-soil, quoique très argileux, a une morphologie trop horizontale pour permettre le démarrage de tels mouvements.

Les glissements affectant le Karab seront très localisés et, en raison de son relief raviné et de sa faible épaisseur, ils ne devraient entraîner qu'un faible volume de matériau.

Les villages situés à l'aval ne seront pas menacés, car :

- d'une part, ils sont installés à la limite du Cotton-soil et du Karab, à une cote nettement supérieure à celle du lit de la rivière ;
- d'autre part, le volume de matériau déplacé étant négligeable par rapport au volume de la retenue, le risque de voir se former une immense vague submergeant le barrage et détruisant les villages, est pratiquement inexistant.

## CHAPITRE 9

### PEDOLOGIE

#### 9.1 Analyses chimiques

#### 9.2 Utilisation agricole

Nous avons vu précédemment que les deux principaux types de sol rencontrés dans la région sont le Cotton-soil et le Karab.

Après avoir étudié leurs qualités géotechniques et leur utilisation comme matériaux de construction, il nous a paru souhaitable d'étudier ces formations telles qu'elles se présentent sur le terrain c'est-à-dire en tant que sols.

Pour cela, nous avons regroupé dans un paragraphe les différentes analyses pédologiques effectuées, ces analyses étant suivies d'un commentaire sur l'utilisation agricole de chaque formation.

### 9.1 ANALYSES CHIMIQUES

Le tableau suivant résume les analyses effectuées au Laboratoire. Elles ont permis de compléter les observations déjà recueillies sur le terrain.

SOL	COTTON-SOIL			KARAB		
	49	51	54	50	52	53
ECHANTILLON N°						
(1) pH	8.30	8	8.70	8	8.25	7.30
(2) Calcimétrie CaCO <sub>3</sub> %	0	0	0	0	6	0
Dolomimétrie CaMg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> %	0	0	0	1.5	4.5	5
(3) Matière organique %	1.23	0.48	0.7	0.26	0.26	0.61
(4) C organique %	0.72	0.28	0.41	0.15	0.15	0.35
(5) N total %	0.056	0.019	0.028	0.014	0.015	0.014
C/N %	12.8	14.7	14.6	10.7	10	25
Complexe absorbant m.eq. %						
(6) Bases échangeables { Ca	2.29	Filtration impossible	0.80	1.99	2.19	8.58
{ K	0.20		0.15	0.2	0.15	0.46
(7) { Na	18.26		10.43	26.0	1.73	1.66
(8) Cl	0		0	0.56	0	1.60
(9) SO <sub>4</sub>	3.33		1.76	9.16	1.66	15.82
Texture Type	ARGILEUSE			ARGILEUSE		
	A	A	A	La		Laf

#### Méthodes analytiques utilisées

- (1) Méthode électrométrique
- (2) Manocalcimètre Berger type SNPA

- (3) Méthode Anne
- (4) Méthode Kjeldahl
- (5) M.O = % C x 1.72
- (6) Complexométrie avec EDTA
- (7) Photométrie de flamme
- (8) AgNO<sub>3</sub>
- (9) Méthode turbidimétrique

m. eq. % : milli-équivalent pour 100 g de terre.

### 9.11 LE COTTON-SOIL

Au Soudan, son extension est considérable : 400.000 km<sup>2</sup> soit 1/6e de la superficie totale.

Son nom vient du fait que ce sol se prête généralement bien à la culture du coton.

Par sa composition physico-chimique et ses caractéristiques générales, il répond parfaitement au groupe des "sols argileux foncés des régions tropicales et subtropicales" que R. DUDAL (F.A.O. 1967) décrit comme suit :

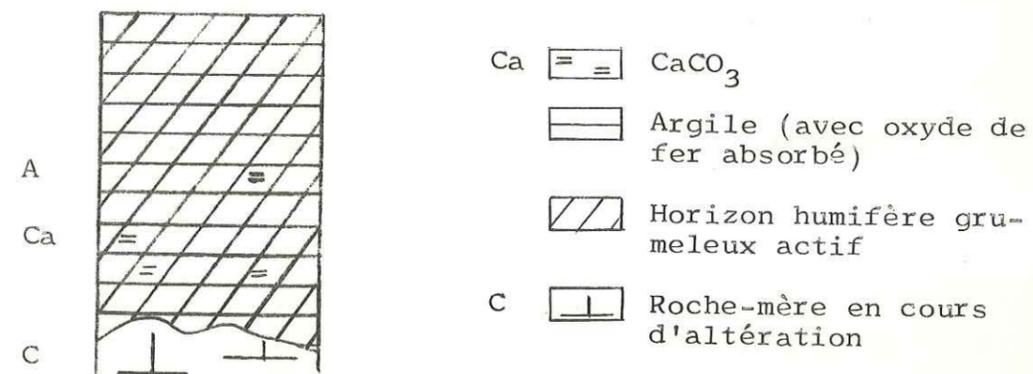
"Ces sols sont pour la plupart de couleur sombre..."

"En dépit de leur couleur foncée, ces sols sont en général pauvres en matière organique, tant en ce qui concerne les horizons de surface que les horizons profonds. Les textures sont en général de type argileux sur tout le profil. La teneur élevée en argile confère à ces sols une grande plasticité et une grande adhésivité quand ils sont humides, alors que secs, ils sont durs et impénétrables. La caractéristique la plus importante et la plus évidente est leur capacité de gonflement et de retrait selon les variations de leur teneur en eau".

Les échantillons analysés répondent parfaitement à toutes ces conditions et nous avons indiqué plus haut (7.12 et 7.13) que les propriétés de gonflement sont dues à la présence de montmorillonite.

Il a été montré récemment que la couleur sombre des argiles noires tropicales est imputable à la formation d'un complexe matière organique-argile, et non à la teneur en matière organique. Ceci est d'ailleurs confirmé par nos analyses, dans lesquelles la teneur en matière organique n'excède pas 1.23 %.

Dans les régions où il se forme, le Cotton-soil présente un profil de type A-C, sans horizons distincts, la roche-mère étant généralement une roche basaltique (P. DUCHAUFOR, 1960).



Rappelons que dans notre secteur, le Cotton-soil est allochtone et qu'il n'est donc pas possible d'observer le niveau C.

Son épaisseur varie de 4 à 10 mètres et nous avons pu remarquer que de petites concrétions de gypse, coniques et lamelleuses, se forment non loin de la surface. En profondeur, par contre, nous n'avons pas trouvé les concrétions de CaCO<sub>3</sub> dont la présence ne constitue pas d'ailleurs une caractéristique absolue des sols argileux foncés.

Selon le type de classification choisie, la position du Cotton-soil varie. Nous avons adopté le système français (G. AUBERT et P. DUCHAUFOR, 1956) qui le situe dans la classe des sols calcimorphes hydromorphes (hydromorphie de surface), groupe des sols noirs tropicaux.

"Les dépôts superficiels gonflants" très bien étudiés par G.E. EKODECK (1975), au Nord-Cameroun présentent de nombreux points communs avec le Cotton-soil et appartiennent à la même classe de sol que celui-ci (cf. fig. 12, p. 66).

### 9.12 LE KARAB

Ce terrain silteux, très raviné, s'étend le long de l'Atbara et de la Setit.

Il est de couleur brun clair à ocre, plastique, de texture argileuse, type limono-argileux et pauvre en matière organique.

C'est un sol allochtone formé à partir des dépôts deltaïques des rivières.

Des nodules de calcaire parsèment sa surface et les analyses révèlent même la présence de dolomie. Le Karab n'étant pas d'origine marine, la dolomie peut être supposée d'origine secondaire par transformation d'un sédiment originellement calcaire.

Selon la classification de G. AUBERT et P. DUCHAUFOR (1956), le Karab fait partie de la catégorie des sols calcimorphes hydromorphes alluviaux.

## 9.2 UTILISATION AGRICOLE

### 9.21 LE COTTON-SOIL

A l'état naturel, les relations existant entre la teneur en argile et les précipitations jouent un grand rôle dans la physiologie de la végétation.

La figure 42, p.159, montre en effet qu'il existe une limite entre les Acacias et les espèces à feuilles caduques ; nous remarquons en particulier que dans notre région, la prédominance des Acacias sur le Cotton-soil est conditionnée par sa teneur en argile (60 à 90 %) et par la pluviométrie (550-600 mm).

En ce qui concerne les cultures, le Cotton-soil est principalement utilisé, dans notre région, pour la culture sans irrigation du sorgho (durra), céréale de base au Soudan, très résistante à la sécheresse, du millet et du sésame.

Les caractéristiques de ce sol argileux présentent de nombreux obstacles à la réalisation d'un bon labour pratiqué généralement à la houette et à la pioche ; cependant, avec l'augmentation de la mécanisation, il convient de prendre garde au danger de tassement dû au passage de matériel lourd.

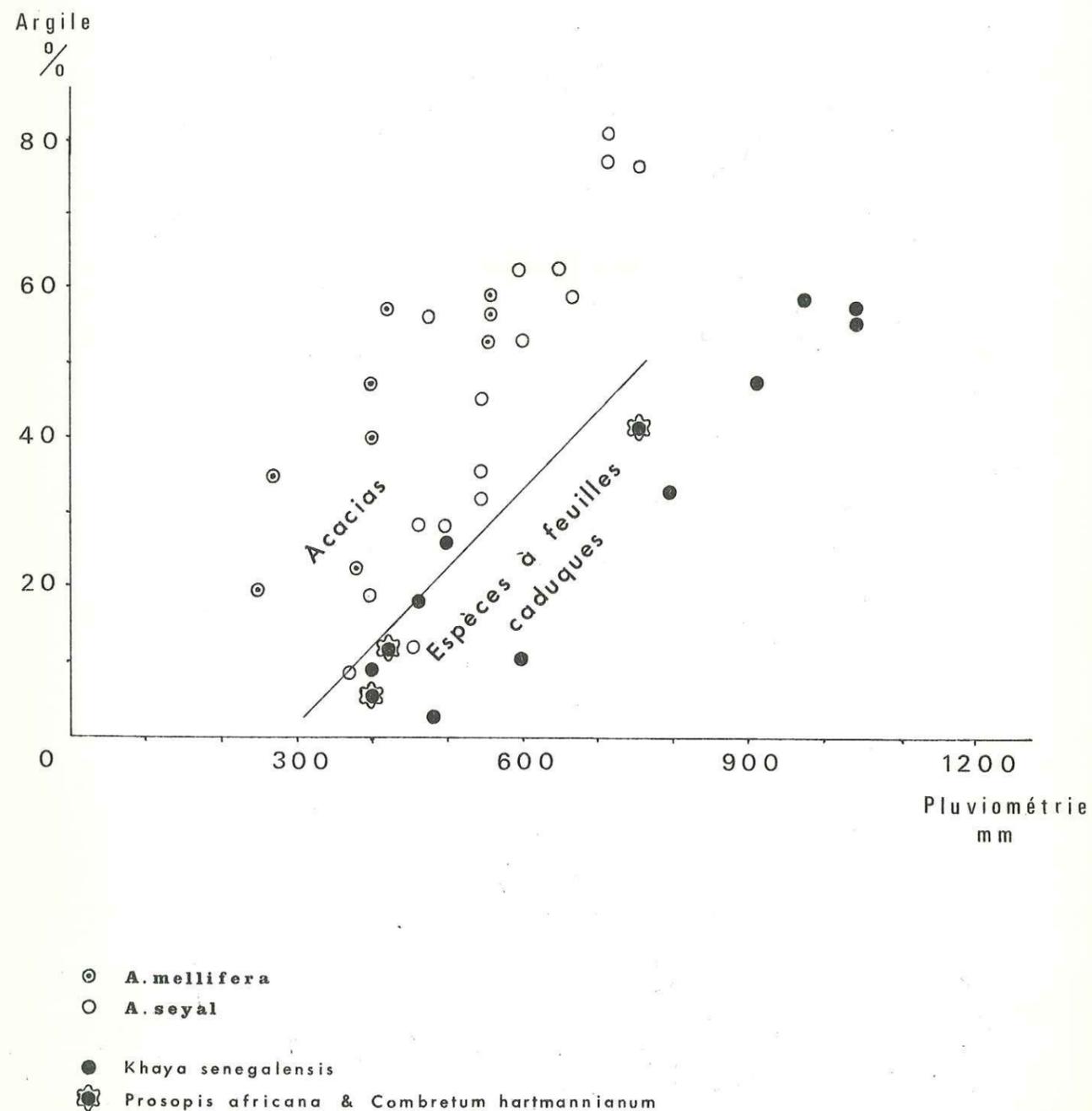
Par ailleurs, sa texture argileuse et sa très faible perméabilité empêchent un bon drainage ce qui, à long terme, peut entraîner un problème de salinisation du sol.

Le deuxième mode d'utilisation du Cotton-soil est constitué par le pâturage, qui est malheureusement trop intensif dans notre région.

L'aménagement envisagé permettra l'irrigation d'un périmètre d'environ 160.000 hectares de Cotton-soil. Afin de choisir les techniques de mise en valeur de ces terres, les spécialistes devront se pencher sur les nombreux problèmes que posent :

- les conditions de drainage ;
- les possibilités de mécanisation ;
- le choix des techniques culturales ;
- les risques de salinisation ;
- l'utilisation rationnelle des engrais ;
- les facteurs socio-économiques.

## Importance de la texture du sol et de la pluviométrie sur la répartition des Acacias et des espèces à feuilles caduques au Soudan



9.22 LE KARAB

Sa pauvreté en matière organique et son relief très raviné ne permettent aucune culture et, on peut d'ailleurs remarquer, qu'à l'état naturel, il ne fournit que de maigres pâturages.

CONCLUSION

Au terme de cette étude, il est possible de tirer un certain nombre d'enseignements sur la conduite d'études géologiques de sites de barrage dans un pays disposant de peu de moyens et de plus, en région semi-aride.

J'aimerais rappeler ici aux géologues travaillant en Europe, que si leur travail est parfois difficile, les difficultés rencontrées sont rarement d'ordre majeur comme c'est le cas dans certains pays en voie de développement.

Pour ma part, la campagne de reconnaissance des sites de barrage ayant apporté peu de résultats, j'ai dû élargir le sujet d'étude de ce mémoire, et, délaissant quelque peu, par la force des choses, la géologie du Génie Civil, je me suis orienté, grâce à la sédimentologie et à la pétrographie, vers l'étude de la géologie régionale du confluent Atbara-Setit.

#### DIFFICULTES RENCONTREES

- L'absence de carte topographique à grande échelle représente le handicap le plus sérieux pour ce type de projet car les levés géologiques des sites ne peuvent être envisagés qu'à l'échelle du 1/1.000e ou du 1/2.000e.

Nous avons pallié à ce manque de carte topographique en effectuant des levés sur des photographies aériennes agrandies.

Ces photographies étant déjà anciennes, le repérage s'est révélé parfois délicat car des arbres indiqués avaient notamment quelquefois disparu.

En ce qui concerne le repérage topographique de certains points, nous avons dû procéder à des mesures au clisimètre et au décamètre à partir des quelques lignes de nivellement et des quelques points cotés existants, l'altitude pouvant être mesurée avec un altimètre de précision, ou par nivellement au clisimètre.

L'emploi de ces moyens sommaires nous a cependant permis de réaliser des cartes géologiques au 1/2.000e pour le site de Burdana (1), 1/3.200e pour le site de Rumela (1), 1/7.100e pour la Fashaga et la zone des sites et 1/40.000e pour la géologie régionale du confluent Atbara-Setit.

Nous avons été ainsi amenés à définir des ensembles n'ayant qu'une signification locale (ex. : Grès en gros bancs) mais qui peuvent néanmoins être replacés dans le contexte de la géologie régionale très sommairement connue jusqu'ici.

---

(1) Ces cartes, en unique exemplaire, ont été remises à la SOGREA Grenoble.

- Les investigations

L'insuffisance des moyens mis à la disposition du projet et surtout leur inadéquation aux terrains rencontrés, en particulier pour les sondages, ont empêché la réalisation d'études géotechniques sérieuses.

Fort heureusement, l'expérience aidant, les prochaines campagnes de reconnaissance (sondages, essais d'eau) bénéficieront d'un matériel plus important et plus approprié, qui permettra d'obtenir de meilleurs résultats.

• Résultats négatifs

• Sondages

Le faible pourcentage de carottage obtenu s'explique par l'emploi d'un carottier simple, légèrement amélioré, dans lequel circulait de l'eau sous une pression trop forte.

De plus, la vitesse d'avancement était beaucoup trop élevée ce qui a contribué également à transformer les carottes de grès en sable.

L'utilisation d'une sondeuse à rotation est peu adaptée pour forer dans le lit des rivières ; l'emploi d'une sondeuse à percussion est préférable pour traverser une vingtaine de mètres de graviers et galets basaltiques.

• Essais d'eau

La méthode utilisée a été décrite précédemment (6;12) et nous avons mentionné que les résultats en étaient malheureusement inutilisables.

• Puits

Le nombre des puits creusés pour la recherche de matériaux a été insuffisant et n'a pas permis de prospecter l'ensemble des zones favorables.

• Résultats positifs

Si certains moyens d'investigation ont fourni peu de résultats, d'autres ont, par contre, donné satisfaction.

• Géophysique

La sismique-réfraction fournit d'excellents résultats dans les terrains non saturés.

• Tarière

La tarière est un outil d'investigation rapide et efficace. Dans certains cas de reconnaissance de surface, elle peut être remplacée par une pelle mécanique, voire même par un bulldozer.

ETUDE DE LA GEOLOGIE REGIONALE

Notre étude a porté sur la description et la datation des différentes formations de cette région.

- Le Basement Complex est représenté par un inselberg granitique d'âge Précambrien.

- Les Grès de Gedaref

Nous avons pu montrer (analyses sédimentologiques, exoscopie) que ce sont de vastes dépôts deltaïques côtiers épandus sur une surface plane et sous un climat tropical.

Ces grès étaient auparavant considérés comme Jurassique, mais la découverte de bois fossiles d'Angiospermes permet de leur attribuer un âge Crétacé Supérieur (post-Albien), ce qui paraît correspondre à l'âge Cénomaniens-Turonien des Grès de Nubie.

Il en résulte que, pour nous, les Grès de Gedaref sont en réalité les Grès de Nubie.

- Les basaltes de la région se répartissent en deux groupes :

• les dykes, d'âge Burdigalien (21 millions d'années par K-Ar), à structure doléritique, se rattachent à une série sous-saturée de type basanite et sont proches, du point de vue pétrographique, des crinanites des environs de Gedaref ;

• les coulées, plus compactes, d'âge Pontien (10 millions d'années par K-Ar), se rattachent à une série basaltique.

- Les formations superficielles quaternaires sont représentées par :

• le Karab, terrain silteux, très raviné, qui nous a fourni des fossiles Lamellibranches d'eau douce appartenant au genre Etheria (Etheria elliptica Lamarck).

Ces fossiles donnent à cette formation un âge Pleistocène.

• le Cotton-soil, terrain très argileux, appartient au groupe des argiles noires tropicales. Son dépôt étant postérieur à celui du Karab et par analogie avec les argiles de la Gezira, le Cotton-soil est daté du Pleistocène supérieur.

CONCLUSION

Le principal enseignement retiré de l'étude de sites de barrage dans ces conditions particulières (manque de cartes et de moyens) est qu'au stade des études préliminaires, la géologie de terrain conserve un rôle fondamental.

L'étude d'un projet de barrage est menée selon un programme rigoureux et pour le respecter, il est nécessaire de posséder, à ce stade, le maximum d'informations géologiques pour commencer à projeter les premiers dessins des ouvrages.

Si les investigations ne sont pas effectuées en temps voulu, ou si leurs résultats sont inutilisables, il est alors indispensable d'exploiter pleinement toutes les données de terrain que seule la géologie "classique" peut fournir.

Elle permet, en particulier, de connaître la géométrie des couches constituant l'assise de fondation, de localiser les principales fractures ou d'apprécier la qualité géotechnique des différentes formations.

Une telle démarche reste néanmoins qualitative et, lors de la prochaine étape du projet, la nécessité de quantifier et de vérifier ces données entraînera la réalisation d'un important programme de reconnaissances relayant logiquement l'étude géologique préliminaire.

A N N E X E S

## DONNEES CLIMATIQUES

Gedaref 1941-1970  
(14°2'N; 35°24'E; 600 m)

	Précipitations (mm) total moyen	Températures (°C)				Insolation (5 ans)		Nébulosité (octas)	Evaporation (mm) total moyen	Température du sol à 12 h (°C) 1974				Vents (10 ans)	
		Moyenne des maxima	Maxima absolus	Moyenne des minima	Minima absolus	Durée journalière (h)	% insolation théorique			1 cm	10 cm	50 cm	100 cm	Direction prédomin.	Vitesse (km/h)
Janvier	TR	34,9	40,1	17,3	9,6	9,9	87	1,7	179	-	33,3	29,1	30,2	N	13
Février	TR	36,1	42,1	18,2	9,6	10,3	88	1,7	184	53,3	38,8	29,6	29,4	N	13
Mars	1	38,7	44,1	21,2	12,3	9,8	81	2,4	213	51,2	43,3	31,2	31,0	NNW	13
Avril	4	40,2	44,3	23,6	15,2	9,9	80	2,9	246	59,4	47,1	33,4	32,3	N	13
Mai	27	40,0	45,1	24,6	17,6	10,0	79	3,7	274	48,8	42,7	34,0	33,4	S	13
Juin	86	37,1	43,5	23,0	18,3	9,7	73	4,1	192	38,4	33,7	31,7	32,4	S	15
Juillet	154	32,8	40,0	21,5	17,9	7,5	58	4,9	141	34,0	31,8	29,0	30,6	S	13
Août	188	31,1	37,3	20,9	15,4	7,7	61	5,0	140	36,1	34,1	29,0	29,8	S	13
Septembre	92	33,1	38,7	21,2	16,7	8,6	70	4,2	124	36,2	36,9	30,3	31,4	S	13
Octobre	24	36,5	39,8	21,7	18,0	9,2	78	4,2	154	50,8	42,3	32,1	31,5	S	9
Novembre	3	36,9	40,2	21,0	14,7	10,1	87	2,7	174	44,7	38,8	31,3	31,7	N	11
Décembre	0	35,1	40,1	18,2	9,0	10,3	91	1,5	177	46,7	37,9	29,8	30,6	N	13
Total	579								2 198						
Moyenne		36,0		21,0		9,4	78	3,3	-		38,3	30,8	31,1	-	-

## Annexe 2

## DONNEES CLIMATIQUES

Es Showak 1973  
(14°23N; 35°51E, 510 m)

	Précipitations (mm) total mensuel	Températures (°C)		Insolation		Nébulosité (noctas)	Evaporation (mm) total mensuel	Température du sol à 12 h (°C)				Vents Direction prédomin.	
		Maximum	Minimum	Durée journalière (h)	% insolation théorique			1 cm	10 cm	50 cm	100 cm		
Janvier													
Février													
Mars													
Avril													
Mai	Max Min 15,0 0	40,2	25,6	9,5	77	4,4	-	51,0	43,7	37,7	36,2	S	
Juin	45,6	39,7	25,6	9,7	77	4,5	-	52,1	41,7	36,8	35,9	SW	
Juillet	183,0	36,9	22,4	7,7	60	6,5	-	43,4	37,1	34,7	35,1	S	
Août	201,0	33,8	21,2	8,6	68	6,4	-	43,7	35,6	32,7	33,4	S	
Septembre	137,7	34,2	20,9	9,0	74	5,3	-	48,0	38,5	34,5	34,3	S	
Octobre	37,7	37,1	20,1	9,2	78	4,7	-	50,2	38,8	34,6	34,4	S	
Novembre	TR	37,1	17,8	10,4	91	1,3	-	49,7	37,1	33,7	34,1	N	
Décembre	-	35,9	14,4	10,4	92	0,4	-	48,0	34,5	31,2	32,6	N	
Total	619												

## Annexe 3

## DONNEES CLIMATIQUES

Es Showak 1974  
(14°23N; 35°51E; 510m)

	Précipitations (mm) total mensuel	Températures (°C)		Insolation		Nébulosité (octas)	Evaporation (mm) total mensuel	Température du sol à 12 h (°C)				Vents Direction prédomin.
		Maximum	Minimum	Durée journalière (h)	% insolation théorique			1 cm	10 cm	50 cm	100 cm	
Janvier	-	33,5	13,2	9,9	87	2,2	145	44,7	31,6	29,7	31,2	N
Février	-	37,4	14,6	10,1	86	1,7	152	53,8	35,5	30,8	31,1	N
Mars	-	37,7	15,7	10,2	85	1,1	189	55,5	36,3	31,9	32,4	N
Avril	TR	42,3	21,9	10,6	86	1,8	209	60,7	44,1	35,5	34,0	N
Mai	14,7	40,0	25,2	9,7	75	4,5	203	57,1	43,1	36,9	35,5	S
Juin	93,2	37,6	22,2	10,0	77	4,6	205	54,2	39,7	36,2	35,6	S
Juillet	149,5	32,6	21,2	7,7	60	6,7	179	44,1	33,1	32,2	33,5	S
Août	205,1	32,0	21,2	7,6	60	5,8	177	42,9	33,0	31,5	32,4	S
Septembre	20,4	34,9	21,3	9,1	75	4,6	151	53,9	36,7	33,6	33,1	S
Octobre	42,6	38,3	21,2	10,0	87	4,2	158	55,8	35,6	34,5	34,1	S
Novembre	TR	37,7	17,8	10,6	93	0,3	155	51,9	36,7	32,9	33,5	N
Décembre	-	34,5	15,0	10,1	89	2,5	146	47,9	33,6	30,9	32,0	N
Total	526						2 069					
Moyenne		36,5	19,2	9,6	80	3,3		51,8	36,5	33,0	33,2	

1973 P &gt; 629 mm

	J	F	M	A	M	J	Ju	A	S	O	N	D
1						0,2		35,0		Tr		
2								1,9				
3								5,2	1,4			
4								93,8	75,1			
5						2,4		Tr	Tr			
6								22,9	20,9			
7								Tr				
8						4,2		6,3	26,4	1,3		
9								3,7	1,8	33,2		
10									5,8			
11								Tr				
12							14,2	Tr				
13								Tr				
14							4,0					
15												
16							14,8		13,3			
17							1,2					
18												
19							17,6					
20												
21							2,5					
22							3,9		0,9			
23						3,0						
24						Tr						
25						Tr		1,4	Tr	3,2		
26								Tr				
27						1,2				12,3		
28						9,6		9,7				
29						2,8						
30						22,2						
31								61,2	0,3			
T						15	45,6	183	137	37,7	-	-

AUCUNE

DONNEE

P = 526 mm 1974

	J	F	M	A	M	J	Ju	A	S	O	N	D
1							13,7	23,0	9,2			
2												
3						9,0				1,8	Tr	
4												
5						1,0		Tr	8,0	38,0		
6								Tr				
7						0,2						
8						Tr	8,8		1,5			
9						Tr		2,7				
10						2,3		52,1				
11								0,4				
12						16,8		0,8				
13						1,2		4,2				
14						Tr		Tr				
15						1,4		3,6		2,8		
16								19,3				
17						1,0		16,3	0,2			
18								11,0				
19						5,7						
20								3,8				
21						1,9		14,3				
22								0,3				
23								10,8				
24						Tr		1,0				
25						1,1		16,3				
26						5,8		0,4				
27						3,9		22,6	1,5			
28						14,2		19,8				
29								13,0				
30						10,3		Tr				
31						14,8						
T						5,0		16,5				
						0,9		0,3				
						14,7	93,2	1495	205,1	20,4	42,6	-

## REPARTITION JOURNALIERE DES PRECIPITATIONS

\* 15 mm : maximum journalier du mois de mai ; seule donnée fournie

## ANNEXE 5

LISTE DES ECHANTILLONS ETUDIES  
ET LOCALISATION DES FOSSILESA) ROCHES ERUPTIVES

## 1. GRANITE

5 Jebel Aklayit (14°24' N, 35°56' E)

## 2. BASALTE

1B Jebel à 5 km d'Es Showak, à gauche, en se dirigeant vers Gedaref (14°25' N, 35°47' E) ?

3 Dyke - Zakaria

4 Dyke - Zakaria

7 Dyke - Setit rive gauche en aval de Burdana

8 Jebel Wad Ummar (14°22' N, 36°05' E)

9 Dyke dans le Karab en amont d'Abuda

12 Dyke - Atbara rive droite en amont de Kubur

13 Dyke - Atbara rive gauche - site de Rumela

30 Dyke - Atbara rive gauche - site de Rumela (14°14'15"N, 35°55' E)

36 Dyke des gorges d'Abu Reida - Atbara

B) GRES1. RUMELA RIVE GAUCHE - COUPE C<sub>4</sub>

18	} Grès en gros bancs
19	
20	
21	
21	

47 Grès intermédiaire

46 Mudstone

44 ] Grès supérieurs

45 ]

2. RUMELA RIVE DROITE - COUPES C<sub>6</sub> ET C<sub>7</sub>

35 Grès ferrugineux sur grès en gros bancs

38 Mudstone

28 Grès supérieurs

3. GORGES D'ABU REIDA EN AVAL DE RUMELA

39 Mudstone noire

41 Grès ferrugineux dans les mudstones noires

4. BURDANA RIVE DROITE - COUPE C<sub>1</sub>

23 ] Grès en gros banc

24 ]

25 ] Mudstone

26 ]

27 Grès supérieurs

5. BURDANA RIVE GAUCHE - COUPE C<sub>1</sub>

31 Grès en gros banc

32 Mudstone

33 Grès supérieurs

C) TERRAINS SUPERFICIELS

43 Cotton-soil - Rive gauche de l'Atbara

48 Cotton-soil - Fashaga

49 Cotton-soil - Fashaga

50 Karab - Fashaga

51 Cotton-soil

53 Karab - Burdana rive gauche

54 Cotton-soil - Route Burdana-Es Showak

AZ<sub>1</sub> Karab - Setit rive droite

AZ<sub>2</sub> Cotton-soil - Setit rive droite

AZ<sub>3</sub> Karab entre la Setit et l'Atbara (Fashaga)

AZ<sub>4</sub> Karab - Fashaga

AZ<sub>5</sub> Cotton-soil - Fashaga

AZ<sub>6</sub> Sable grossier - Sondage R<sub>5</sub> Fashaga

AZ<sub>7</sub> Sable fin, proche du AZ<sub>6</sub>

AZ<sub>8</sub> Cotton-soil - Rive gauche de l'Atbara

AZ<sub>9</sub> Cotton-soil - Rive gauche de l'Atbara

LOCALISATION DES FOSSILES

BOIS FOSSILES :

14°13'30" N	35°55' E
14°14' N	35°55' E
14°15'05" N	35°54'20" E

FOSSILES : ETHERIA ELLIPTICA LAMARCK

14°14'15" N	35°55'10" E	14°21' N	35°51' E
14°15'20" N	35°55'30" E	14°23' N	35°52' E

METHODES D'ANALYSES SEDIMENTOLOGIQUES

A) GRANULOMETRIE

La technique employée dépend du degré d'induration du sédiment et de la taille des éléments.

- Pour les grès indurés, nous avons utilisé le tamisage virtuel linéaire sur lame mince de roche.
- Pour les sédiments meubles, le tamisage classique sur tamis Afnor, au-dessus de 40µ, puis la méthode densimétrique pour la fraction inférieure à 40µ.
- La nomenclature utilisée est celle de A. CAILLEUX (1954) adoptée par les Ponts et Chaussées :

Gravier	:	2 - 20 mm
Sable grossier	:	0.2 - 2 mm
Sable fin	:	20 - 200µ
Silt	:	2 - 20µ
Argile	:	< 2µ

Expression des résultats

- 1) La courbe de fréquence simple fournit les valeurs du mode principal et des modes secondaires.
- 2) La courbe cumulative permet de calculer les fractiles Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub> (Q<sub>1</sub> = 25 % ; Q<sub>2</sub> = 50 % ; Q<sub>3</sub> = 75 %).

A partir des fractiles, nous avons calculé les paramètres suivants :

- Sorting-index

$$So = \sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}}$$

- QdΨ de KRUMBEIN (1963)      QdΨ =  $\frac{(Q_1 \times Q_3)}{2}$

- Hétérométrie de CAILLEUX (1954) He

- Asymétrie      As =  $\frac{(Q_1 \times Q_3)}{Q_2^2}$

Notions de classement et de triage

- Le classement est donné par la pente de la courbe : plus elle est forte, plus le sédiment est bien classé et inversement.
- Le triage est déterminé par la linéarité de la courbe :
  - si c'est une droite, le sédiment est bien trié ;
  - des inflexions traduisent un mélange, c'est-à-dire un mauvais mélange.

L'interprétation sédimentologique peut être la suivante : le classement dépend de l'agent de dépôt final, alors que le triage dépend du nombre d'apports.

3) La courbe canonique de RIVIERE

Nous avons remarqué que la courbe canonique de RIVIERE et l'asymétrie évoluent dans le même sens :

- à une asymétrie positive, correspond une courbe à faciès hyperbolique (dépôts de décantation) ;
- à une asymétrie négative, correspond une courbe à faciès parabolique (sédiment peu évolué).

4) Le diagramme de DOEGLAS (1968)

Il permet de représenter les caractéristiques de toutes les courbes granulométriques avec les fractiles Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub> et Q<sub>3</sub> (Fig. 11, p. 45).

B) MORPHOSCOPIE ET MORPHOMETRIE DES GRAINS DE QUARTZ

- Etude morphoscopique

On attribue à chaque grain une valeur d'usure (croissant de 0 à 10) d'après la charte de W.C. KRUMBEIN et L.L. SLOSS (1963) pour l'estimation visuelle de la forme des grains :

- grains non usés (N U) (valeur d'usure 0 à 2)
- grains à coins arrondis (C A) (valeur d'usure 3 et 4)
- grains arrondis (A R) (valeur d'usure 5 et 6)
- grains ovoïdes (O V) (valeur d'usure 7 à 9)
- grains sphériques (Sph) (valeur d'usure 10)

Indice d'usure :

$$I_n = \frac{\% \text{ des grains dont l'indice d'usure est supérieur à 5}}{\% \text{ des grains dont l'indice d'usure est égal ou supérieur à 5}}$$

- Etude morphométrique

Indice d'émoussé de CAILLEUX :  $I = \frac{2r}{L} \times 1.000$

C) EXOSCOPIE DES GRAINS DE QUARTZ (H.J. OERTLI 1970, L. LE RIBAUT 1974)

Cette méthode nouvelle est basée sur l'analyse de la surface des grains de quartz au microscope électronique à balayage (scanning).

Traces observables :

- Les traces d'action mécanique sont localisées sur les arêtes et les faces planes (sauf dépressions). Elles sont :
  - soit en forme de croissant (acquise lors d'un brassage aquatique) ;
  - soit en forme de V (acquise au cours d'un transport éolien).

- Les traces d'action chimique se produisent dans tous les milieux.

On distingue : - les traces de dissolution ;  
- les traces de dépôts.

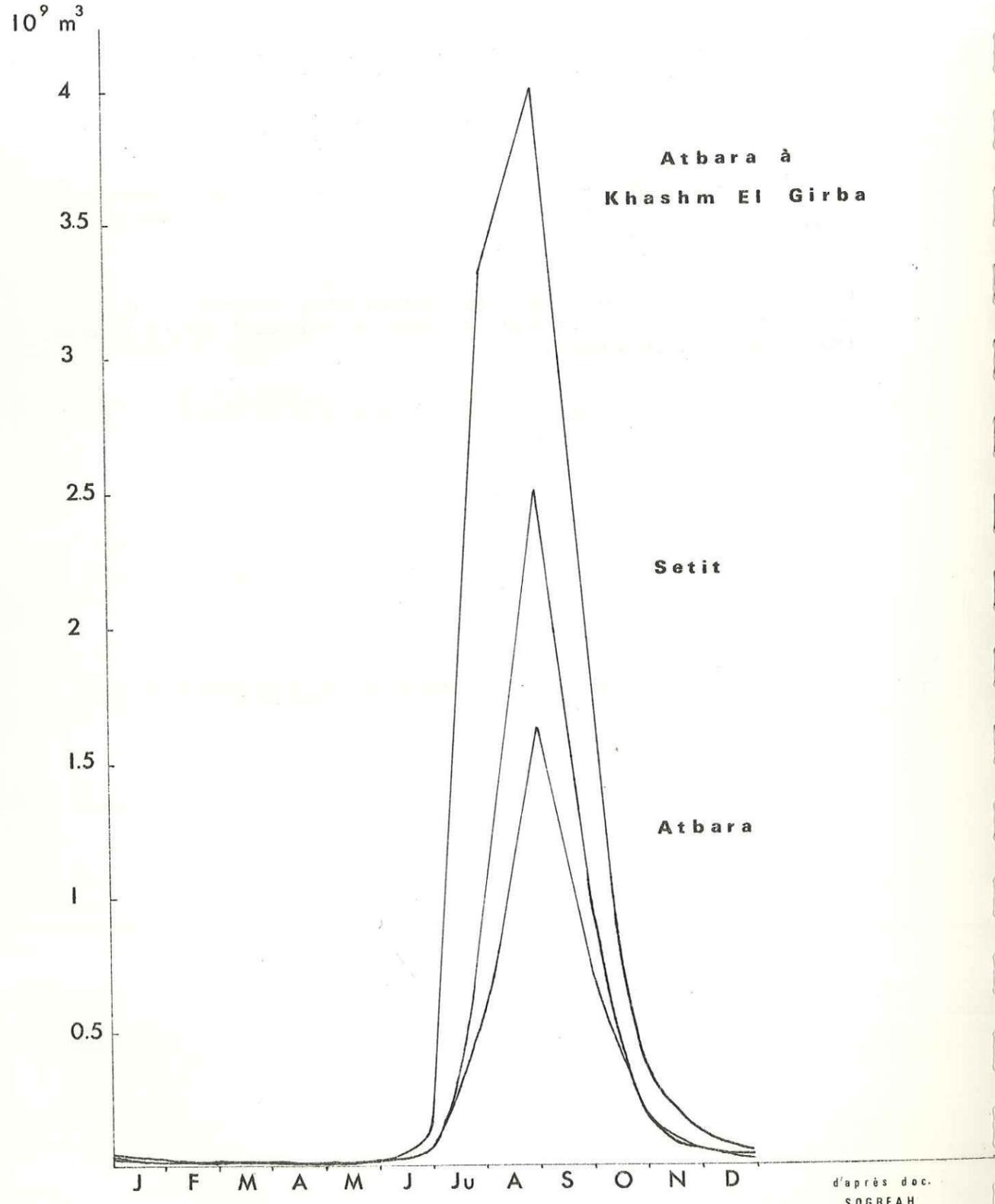
L'observation de ces différentes traces permet de reconstituer l'histoire des grains à évolution complexe :

- les traces sur les arêtes représentent le dernier stade évolutif ;
- les faces planes moins exposées au chocs et aux dissolutions que les arêtes, conservent les caractères hérités d'une action précédente.

Dans les dépressions, les caractères très anciens sont conservés. Les nourrissages récents y laissent leurs traces (micro-milieu confiné).

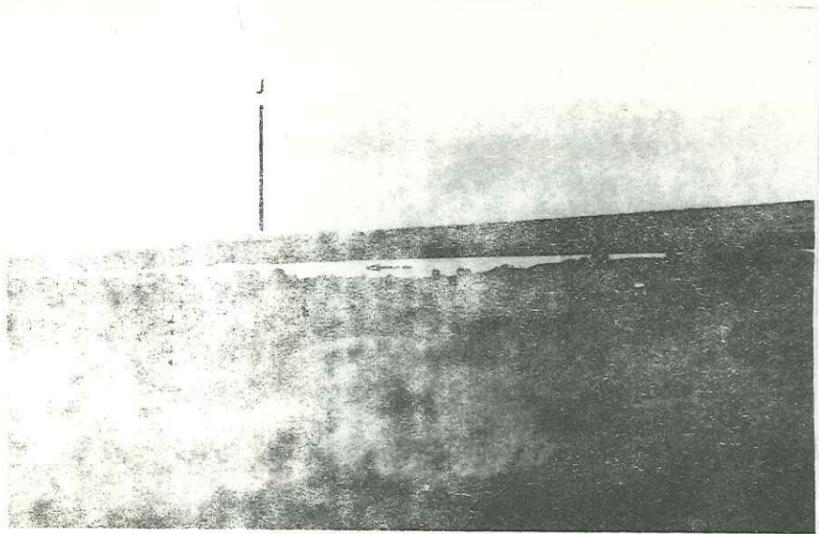
ANNEXE 7

Apport mensuel  
des rivières

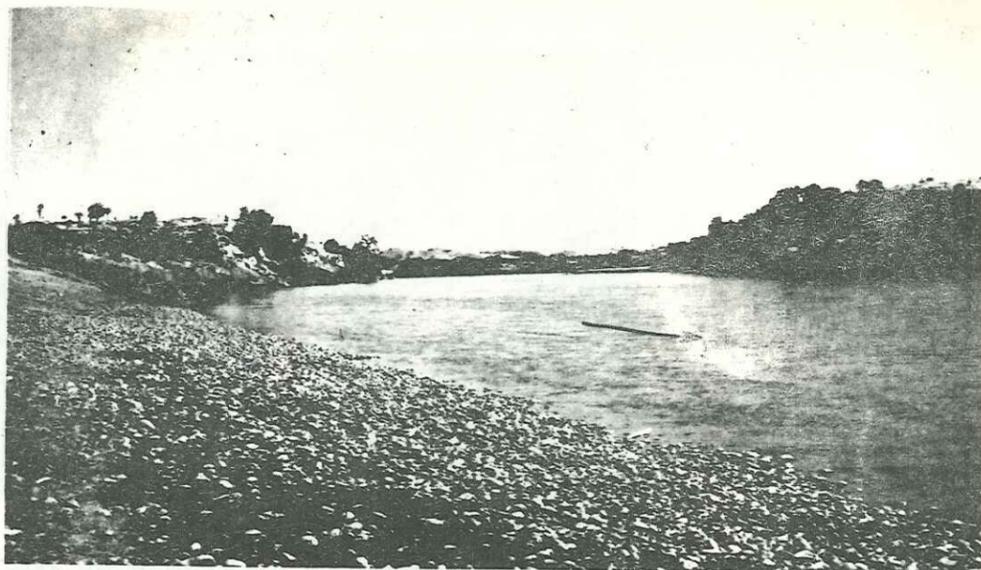


PHOTOGRAPHIES

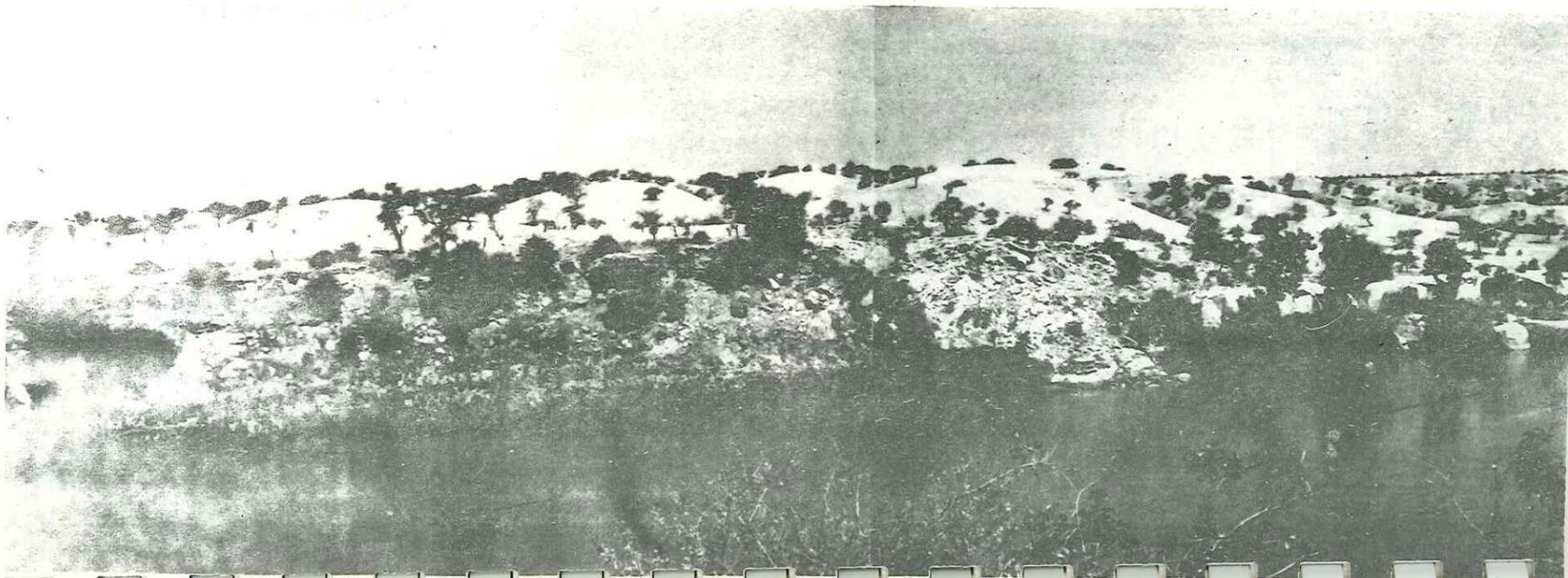
d'après doc.  
SOGREAH



1

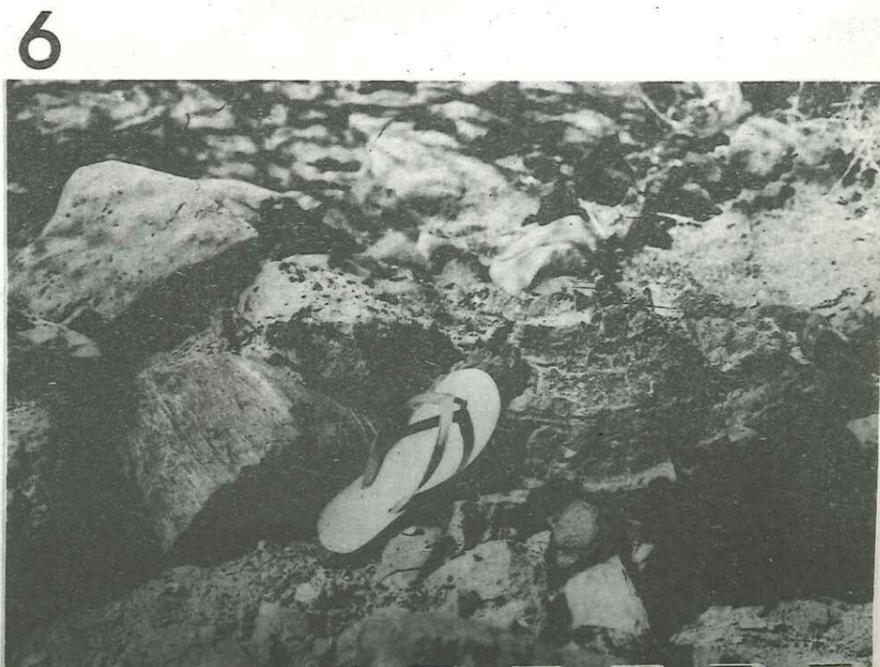
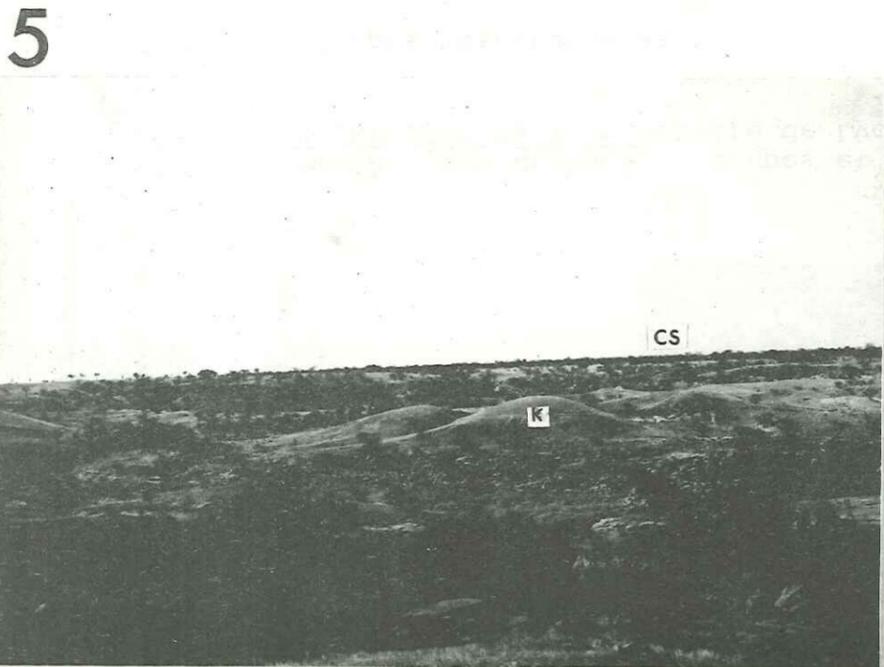


2

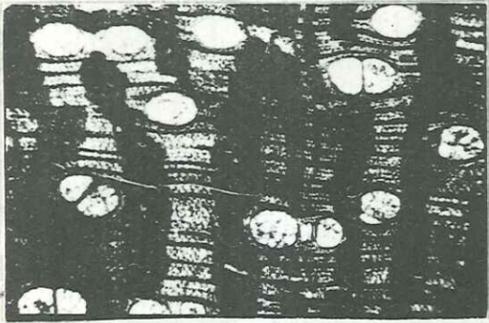


3

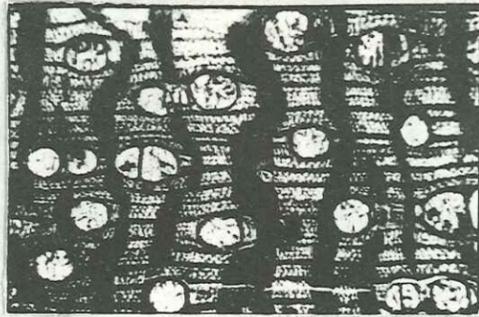
1. Vue générale du Karab aux environs d'Es Showak. A l'arrière-plan à gauche, le Jebel Aklayit (J).
2. Site de Burdana, vu de l'aval.
3. Site de Burdana : rive droite. Au premier plan, à droite, les blocs écroulés correspondent à la présence d'une faille.



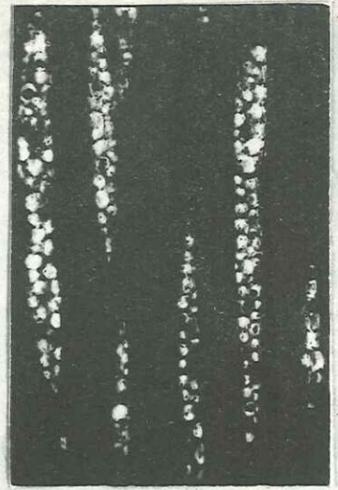
- 4. Site de Rumela.
- 5. Site de Rumela : rive gauche. K = Karab ; CS = Cotton-soil.
- 6. Bois fossiles dans un khor. Rive gauche de Rumela.



7

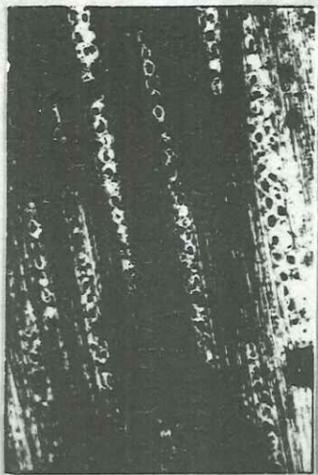


8

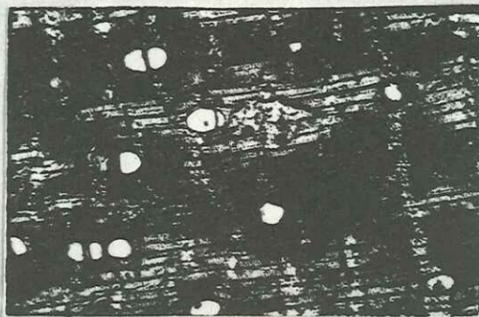


9

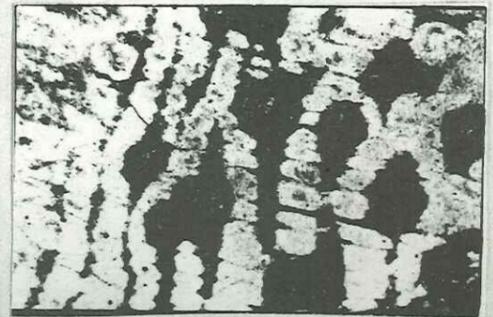
10



11



12

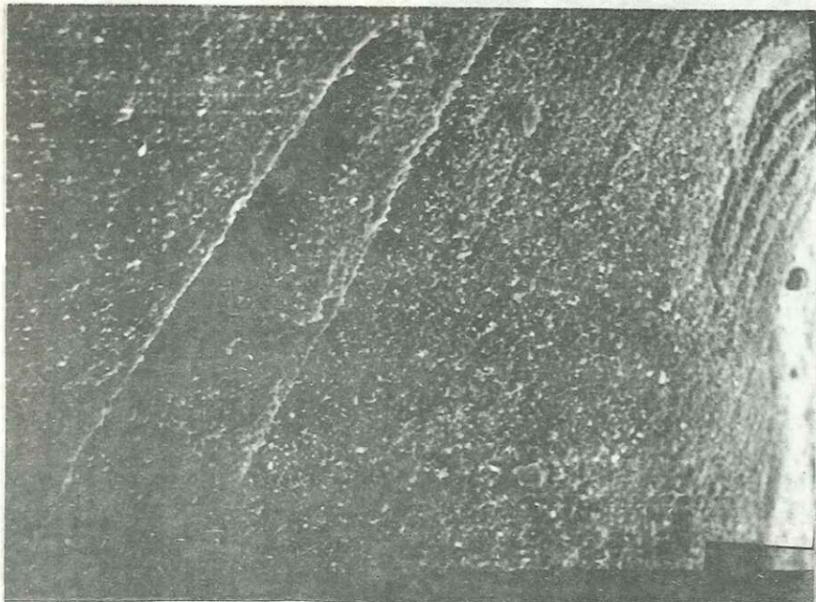


Bois silicifiés (âge Crétacé) : coupes et identifications effectuées par le Professeur LÉMOIGNE de l'Université de Lyon.

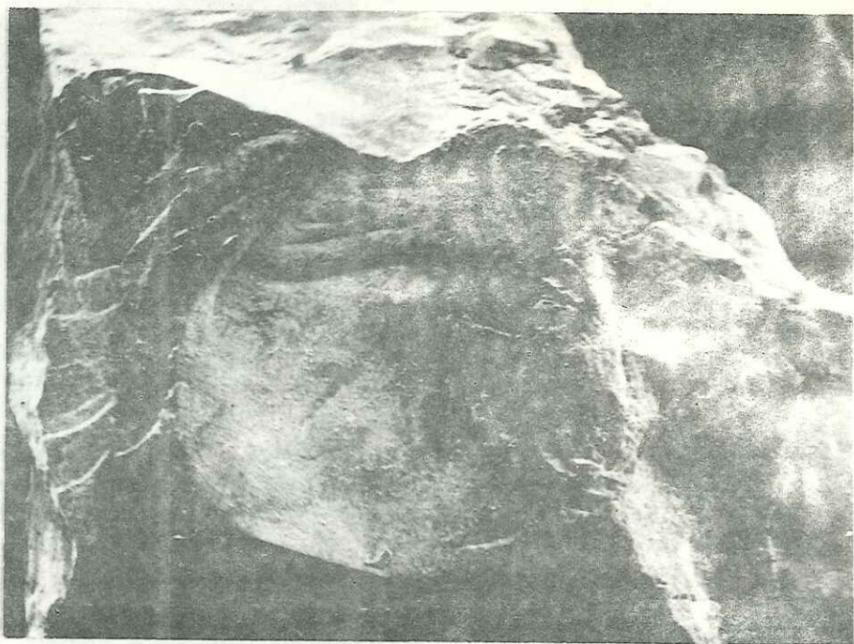
- 186 -

- |         |                                  |   |                |
|---------|----------------------------------|---|----------------|
| 7 et 8. | Coupes transversales             | } | SAPINDACEES ?  |
| 9.      | Coupe longitudinale tangentielle |   |                |
| 10.     | Coupe longitudinale tangentielle | } | MELIACEES ?    |
| 11.     | Coupe transversale               |   |                |
| 12.     | Coupe transversale               |   | LEGUMINEUSES ? |

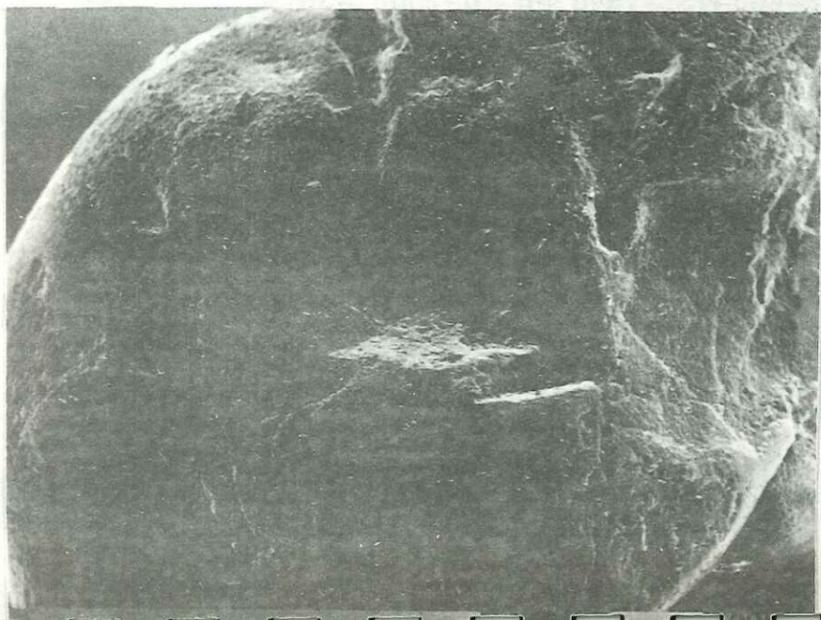
13



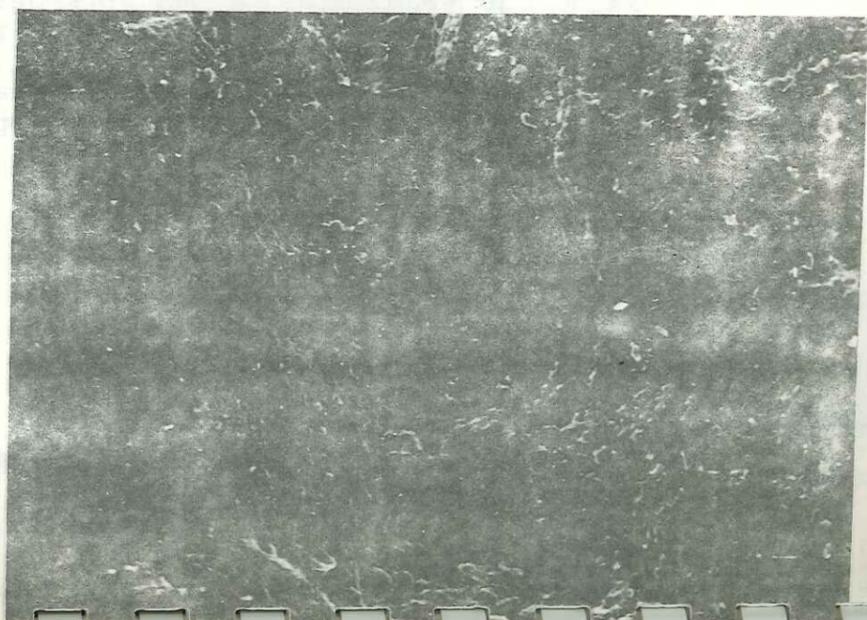
14



15



16

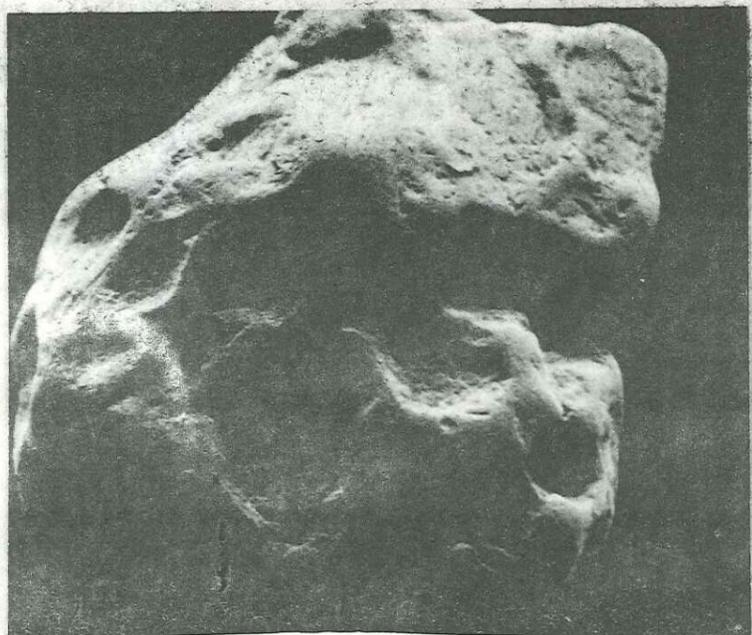


Exoscopie :

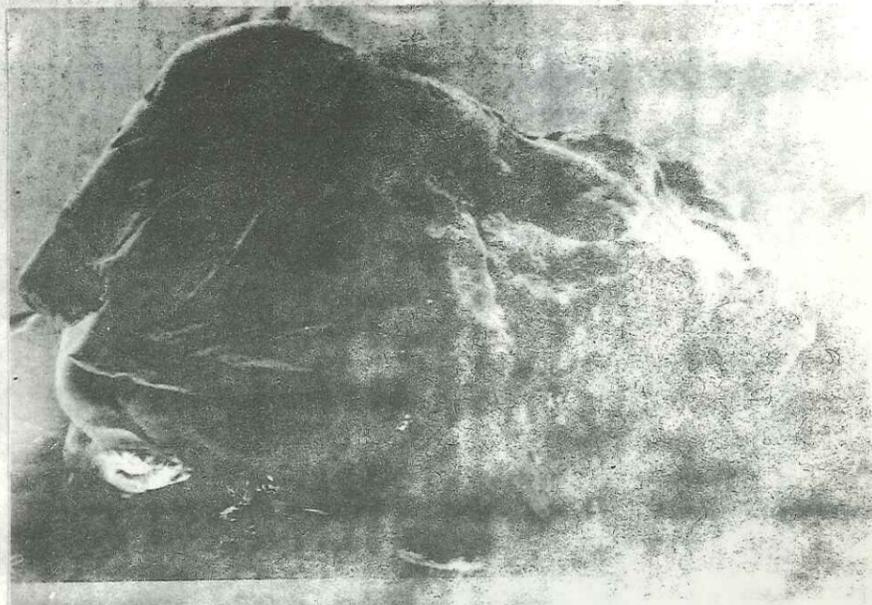
13. Détail d'un grain de l'échantillon 18. Stries profondes : signe d'un épisode aquatique de haute énergie.
14. Grain anguleux de l'échantillon 19. Cassures, arrachements et stries sur les faces : épisode aquatique de haute énergie.
15. Echantillon 46 : grain poli montrant des traces de chocs rectilignes, des cassures sur les faces et des trous dans les dépressions : épisode éolien suivi d'un épisode de polissage aquatique de basse énergie puis d'une évolution pédologique.
16. Détail de la photo 15 : trous de dissolution et dépôts de silice dus à l'évolution pédologique finale.



17



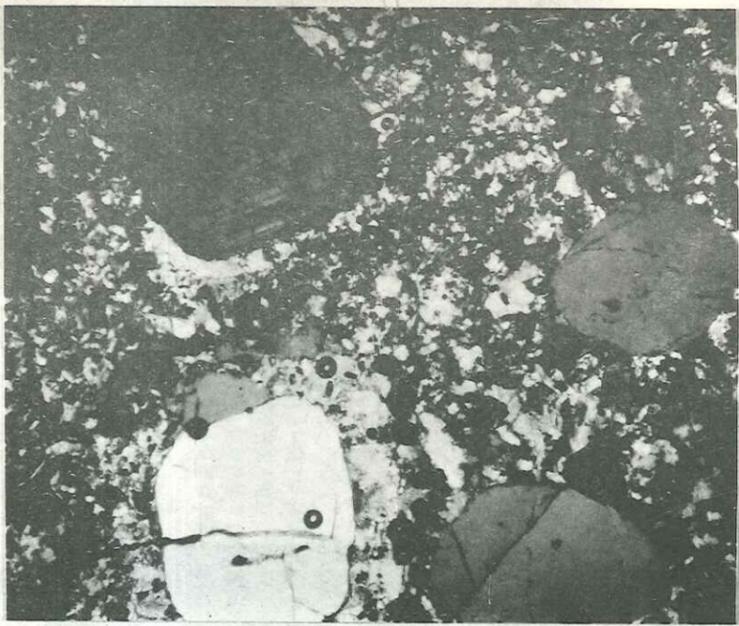
18



19

17. Echantillon 46 : grain poli montrant de nombreuses traces de chocs rectilignes indiquant un épisode éolien important.
18. Echantillon 44 : les gros trous sont l'héritage d'un épisode aquatique ancien, de haute énergie. Les traces de chocs rectilignes et le polissage indiquent une éolisation importante, suivie d'un épisode aquatique de basse énergie.
19. Echantillon 45 : grain ayant subi une évolution fluviatile ancienne (traces en arc de cercle), un polissage aquatique de basse énergie puis un nouvel épisode aquatique de haute énergie (grain cassé).

20



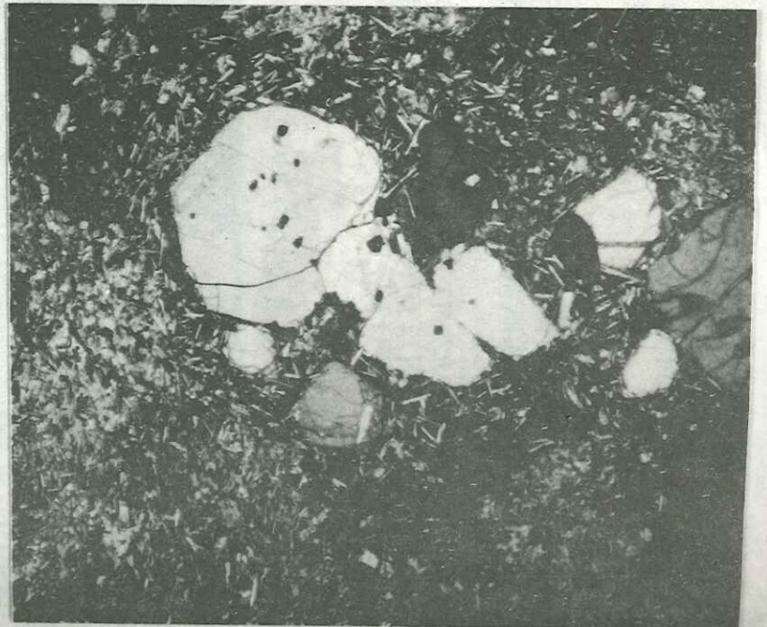
21



22



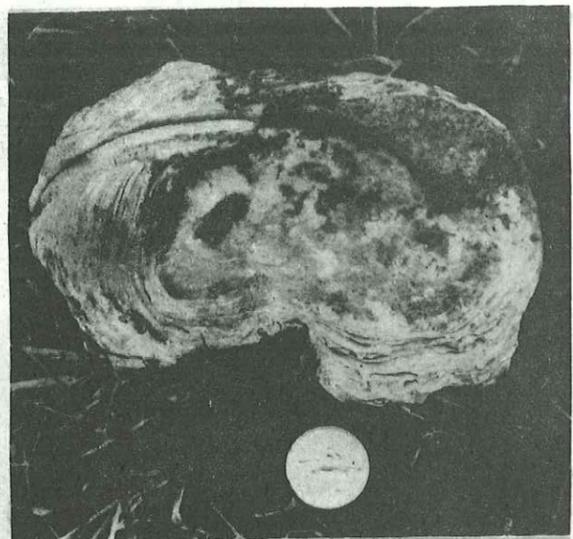
23



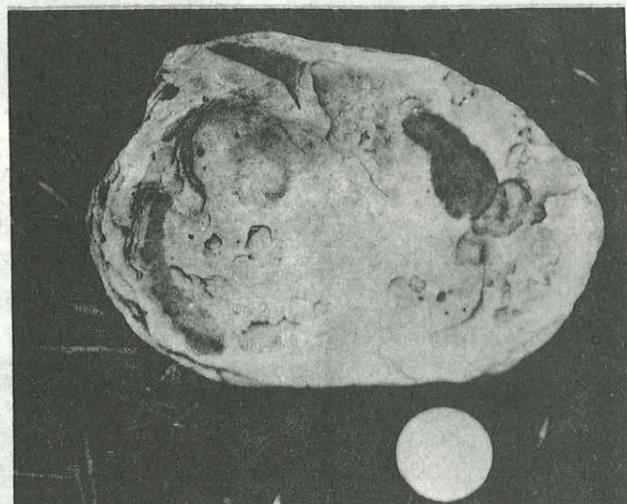
Lames minces :

20. Granite du Jebel Aklayit. LM5. Restites de granite à grain moyen (quartz, microcline) imbibées par un granite à grain fin. L.Px5.
21. Granite du Jebel Aklayit. LM5a. Pegmatites graphiques dans les plages feldspathiques. L.Px20.
22. Basalte doléritique. LM1B. Cristaux d'olivine et d'augite enserrés par les lattes feldspathiques. L.Px5.
23. Basalte. LM9. Phénocristaux d'olivine dans la pâte microlithique. L.Px5.

24



25



24 et 25. Deux spécimens d'*Etheria elliptica* Lamarck. Forme semilunata Lamarck, Lamellibranches d'eau douce, découverts dans le Karab.

Pléistocène inférieur → actuel.

BIBLIOGRAPHIE

ABU BAKR ES SADIK S., DROGUE C. 1975 - Alimentation en eau de Port-Soudan et problèmes posés par l'inventaire des ressources hydriques du littoral soudanais de la Mer Rouge. 3e réunion annuelle des Sciences de la Terre, Univ. Sci. Tech. du Languedoc, Montpellier. 23-25 Avril, p. 1.

ABUL HAGGAG Y. 1961 - A contribution to the physiography of Northern Ethiopia. Univ. of London, The Athlone Press.

ANDREW G. 1948 - Geology of the Sudan. In TOTHILL : Agriculture in the Sudan, 84-128.

ANTOINE P. 1964 - Etudes géologiques pour l'aménagement du Litani. Thèse 3e cycle, Grenoble.

ANTOINE P., BARBIER R. 1973 - Géologie des barrages de faible hauteur et de leur retenue. Ann. ITBTP n° 312, Sols et fondations n° 101, 27-46.

ANTOINE P., CHIALVO J. 1974 - Etude géologique du site de barrage de Burdana. Avril 1974. Rapport inédit. Sogreah, Grenoble.

ARAMBOURG C., CHAVAILLON J., COPPENS Y., KOENIGUER J.C. 1969 - Sur quelques bois fossiles hétéroxylés de la série de Lubur (Turkana, Kenya). C.R.A.S., t. 268, p. 2867-2869.

ARNOLD C.A. 1968 - Current trends in Paleobotany. Earth Science Reviews. Vol. 4, n° 4, p. 283-309.

ARQUIE G. 1970 - Le compactage. Routes et pistes. Eyrolles Edit., Paris. 314 p.

AUBERT G., DUCHAUFOR P. 1956 - Projet de classification des sols. In C.R. 6° Congrès inter. Sc. du sol. Paris 5, 97, Vol E, 597-604.

AUBOIN J., BROUSSE R., LEHMAN J.P. 1968 - Précis de Géologie. 3t Masson, Paris.

- AUBREVILLE A. 1949 - Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Soc. Ed. Maritimes et coloniales, Paris, 352 p.
- AWAD G.H., RUSHDI S., DELANY F. 1966 - Lexique stratigraphique international. Vol. 4, Afrique, fasc. 46, C.N.R.S., 105 p.
- BARBIER R. 1960 - Khashm El Girba dam final geological report. R. 7520, Rapport inédit. Sogreah, Grenoble.
- BARBIER R. 1971 - Géologie et mécanique des roches dans l'étude des fondations de barrage. Rev. de l'Industrie minière, Numéro spécial. Juillet 1971.
- BARBIER R. 1973 - Rapport sur les conditions géologiques des divers sites de barrage envisagés sur les rivières Atbara et Setit (Rep. Dem. du Soudan). Juin 1973. Rapport inédit. Sogreah, Grenoble.
- BARBIER R. 1974 - La géologie au service des grands travaux. Centenaire Soc. Géol. Belgique. Colloque Géologie de l'Ingénieur Liège p. 77-111.
- BARBIER R., GIGNOUX M. 1955 - Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques. Masson, Paris. 343 p.
- BARBOUR K.M. 1961 - The Republic of the Sudan. A regional geography. Univ. of London Press., 292 p.
- BEAUCHAMP J., LEMOIGNE Y. 1974 - Présence d'un bassin de subsidence en Ethiopie centrale et essai de reconstitution paléogéographique de l'Ethiopie durant le Jurassique. B.S.G.F. (7), t. 16, n° 5, p. 563.
- BEUF S., BIJU-DUVAL B., DE CHARPAL O., ROGNON P., GARIEL O., BENNACEF A. 1971 - Les grès du Paléozoïque inférieur au Sahara, Publ. I.F.P., Col. Science et Technique du Pétrole, n° 18, Techni Paris, 464 p.
- BONNEFILLE R., CHAVAILLON J., COPPENS Y. 1970 - Résultats de la nouvelle mission de l'Omo (3e Campagne 1969). C.R.A.S., 16 Fev. 1970, t. 270, p. 924-927.

- BONNEFILLE R. 1970 - Premiers résultats concernant l'analyse pollinique d'échantillons du Pléistocène inférieur de l'Omo (Ethiopie). C.R.A.S., 20 Mai 1970, t. 270, p. 2430-2433.
- CAILLEUX A. 1954 - Limites dimensionnelles et noms des fractions granulométriques. B.S.G.F. (6), 4, p. 643-646.
- CAILLEUX A., TRICART J. 1959 - Initiation à l'étude des sables et des graviers. 3 t., C.D.U. ; Paris. 376 p.
- CHIALVO J. 1974 - Etude géologique du site de barrage de Rumela. Sept. 1974, Rapport inédit. Sogreah, Grenoble.
- CHIALVO N. 1975 - Contribution à l'étude écologique de la végétation du confluent Atbara-Setit. (Rep. Dem. du Soudan). Thèse 3e cycle, Grenoble.
- COPPENS Y., KOENIGUER J.C. 1967 - Sur les flores ligneuses disparues du Tchad et du Niger. C.R.A.S. t. 265, p. 1282-1285.
- DOEGLAS D. J. 1962 - A graphic approach to the interpretation of variations in the size frequency distribution of silty clays. Bull. groupe français des argiles. 13, p. 3-14.
- DOEGLAS D. J. 1968 - Grain-size indices, classification and environment. Sedimentology. 10 ; p. 83-100.
- DUBOURDIEU G. 1973 - Carte sismique du monde. Réalisation cartographique GEOTECHNIP-BEICIP, Rueil-Malmaison et Imprimerie moderne, Nantes.
- DUBOURDIEU G. 1974 - La théorie des pulsations internes de la Terre : compléments. Collège de France, Paris. 47 p.
- DUCHAUFOR P. 1960 - Précis de pédologie. Masson, Paris. 438 p.
- DUDA S.J. 1965 - Secular seismic energy release in the circum-Pacific belt. Tectonophysics. Vol. 2, n° 5, p. 409-452.
- EKODECK G.E. 1975 - Contribution à l'étude de la nature et du comportement géotechnique des dépôts superficiels gonflants du Nord Cameroun. Thèse 3e cycle. Grenoble. (à paraître).

- EL TAYEB M. SAEED 1969 - Ground-water appraisal of the Gash river basin at Kassala, Kassala Province. Bull. n° 17. May 1969. Geological Survey Dpt., Khartoum. 88 p.
- EL TAYEB M. SAEED 1972 - Hydrogeology of Kassala district, Kassala Province. Bull. n° 21. Sept. 1972. Geological and Mineral Resources Dpt., Khartoum. 109 p.
- ERHART H. 1964 - Le témoignage paléoclimatique de quelques formations paléopédiques dans leur rapport avec la sédimentologie. Geol. Rdsch. Dtsch. Bd 54, I, p. 15-23.
- F.A.O. 1967 - Sols argileux foncés des régions tropicales et subtropicales (préparé par R.DUDAL, sous la Direction de D. LUIS BRAMAO). Rome, Col. Progrès et mise en valeur. Agric. (83), 172 p.
- FAURE H. 1975 - Mouvement "absolu" de la plaque arabe depuis le Mésozoïque. 3<sup>e</sup> Réunion ann. des Sc. de la Terre. Univ. Sc. et Tec. du Languedoc, Montpellier, p. 147.
- FOLK R.L. 1966 - A review of grain size parameters. Sedimentology 6, p. 73-93.
- FULLAGAR P.D., RAGLAND P.C. 1975 - Chemical weathering and Rb-Sr whole rock ages. Geochimica and cosmochimica Acta. Vol. 39, p. 1245-52.
- \*GIRAUD A. 1974 - Etudes géologiques sur quelques sites de barrage (Essai méthodologique). Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Grenoble.
- GUTENBERG B., RICHTER C.F. 1953 - Géographie des tremblements de terre dynamiques de la croûte terrestre. Ann. Inst. Phys. Globe, Strasbourg, N.S., PT 3, Géophys. 5, p. 3-11.
- HARRISONN M. N., JACKSON J.K. 1958 - Ecological classification of the vegetation of the Sudan. Min. of Agr., Forest Dept., Forest Bull. (2), 45 p.
- HASABALLA A. H. O. 1971 - Report on geology and some aspects of engineering-geology of parts of river Atbara and Setit basins. Ministry of Industry and Mineral Resources. Geological Survey Dpt. Khartoum. Rapport inédit. 50 p. 1 carte h.t. 1/250.000.

- HASABALLA A.H.O., IDRIS M.I., OSMAN A.M., KHAIR O.M., HASAN A.H.A. 1974 - Geology of Burdana-Rumela dam sites and reservoirs on Setit and Atbara rivers at Lower Atbara. Geological and Mineral Resources Dpt. Khartoum. Rapport inédit.
- HAUGHTON S.H. 1938 - Lexicon de stratigraphie. Vol. 1, Africa. Edit. Murby and Co, London.
- HESS H.H., POLDERVAART A. 1968 - Basalts. The Poldervaart treatise on rocks of basaltic composition. Vol. 2. Interscience Publishers, New-York.
- HUCKRIEDE R. 1972 - Ein C 14 - Wert für den Pluvial-Kalk von Sodiri. Kordofan, Sudan. Geologica und Paleontologica, Marburg. p. 174-175.
- HUCKRIEDE R., VENZLAFF H. 1962 - Über ein pluvialzeitliche Mollusken fauna aus Kordofan (Sudan). Paläont. Zeitung, p. 93-109.
- INSTITUT DE MECANIQUE DE GRENOBLE, LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS 1974 - Rapport 7409 - Rapport inédit. - 12 Juillet 1974.
- JUNG J., BROUSSE R. 1959 - Classification modale des roches éruptives. Paris, Masson 122 p.
- KOENIGUER J.C. 1971 - Les bois hétéroxylés de l'oasis de Kirdimi (Tchad). 96<sup>e</sup> Congrès National des Sociétés Savantes, Toulouse Sciences, t. 5, p. 191-214.
- KOENIGUER J.C. 1974 - Les bois fossiles de Tamarix, d'Acacia et de Retama du Plio-Quaternaire Saharien. C.R.A.S. t. 278, Série D., p. 3069-72.
- KRINSLEY D.H., DOORNKAMP J.C. 1973 - Atlas of quartz sand surface textures. Cambridge University Press. London 91 p.
- KRUMBEIN W.C., SLOSS L.L. 1963 - Stratigraphy and sedimentation. 2<sup>e</sup> Ed. Freeman. San Francisco.
- KRYNINE D.P., JUDD W.R. 1957 - Principles of engineering geology and geotechnics. Mc Graw-Hill Book. New-York, 730 p.

- LACROIX A. 1933 - Classification des roches éruptives. In : les roches éruptives de l'Indochine. Bull. Serv. Geol. Indochine. 20, fasc. 3, pp. 15-36, 183-206.
- LEFRANC J.P. 1975 - Problèmes posés par les bois silicifiés du Sahara septentrional et les réponses qu'on peut y apporter. 3<sup>e</sup> Réunion ann. des Sciences de la Terre. Univ. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, p. 227.
- LETOURNEUR J., MICHEL R. 1971 - Géologie du Génie Civil. Coll. U., Armand Colin, Paris 728 p.
- LE RIBAULT L., TOURENQ J. 1972 - Mise en évidence de trois types d'apports détritiques dans les sables et argiles du Bourbonnais d'après l'examen de la surface des grains de quartz au microscope électronique à balayage. C.R.A.S., t. 274, Série D, p. 528.
- LE RIBAULT L. 1974 - L'exoscopie, méthode de détermination de l'histoire géologique des quartz détritiques. Rev. de Géogr. phys. et de géol. dyn., Vol. 16, fasc. 1, pp. 119-130.
- MAINGUET M. 1972 - Le modelé des grès. I.G.N. 2 t., 657 p.
- MAINGUET M. 1975 - La sédimentation éolienne au Sahara. Apports des images du satellite n° AA3 dans l'étude des manifestations au sol des courants éoliens. 3<sup>e</sup> Réunion ann. des Sciences de la Terre. Univ. Sc. et Tech. du Languedoc, Montpellier, p. 241.
- MILLOT G. 1964 - Géologie des argiles. Masson, Paris, 499 p.
- MILLOT G. 1967 - Signification des études récentes sur les roches argileuses dans l'interprétation des faciès sédimentaires (y compris les séries rouges). Sedimentology, 8, Elsevier Amsterdam, p. 259-280.
- MOHR P.A. 1971 - Ethiopian tertiary dyke swarms. Special report 339. Smithsonian Astrophysical Observatory. Cambridge. Massachusetts.
- MOOREHEAD A. 1960 - The White Nile. Penguin Books. 283 p.

- MOOREHEAD A. 1962 - The Blue Nile. New English Library, London. 318 p.
- OERTLI H.J. 1970 - Techniques photographiques dans les laboratoires de géologie pétrolière. Rev. de l'I.F.P., XXV, 10, p. 1169-1174.
- OMER M.K. 1969 - Etude géologique et géotechnique des formations superficielles des environs de Besançon (Doubs). Thèse 3<sup>e</sup> cycle. Besançon.
- PEGUY Ch. P. 1970 - Précis de climatologie. Masson, Paris. 468 p.
- PERRIAUX J. 1974 - Généralités sur les grès. Bull. Centre Rech. Pau. SNPA. 8, 1, p. 161-185.
- PETITJOHN F.J., POTTER P.E., SIEVER E. 1972 - Sand and Sandstone. Springer-Verlag, Berlin. 618 p.
- POMEYROL R. 1968 - Nubian Sandstone. Bull. Am. Ass. Petrol. Geol. 52, (4), 589-600.
- POWERS R.W., RAMIREZ I.F., REDMOND C.D., ELBERG E.L. 1966 - Geology of the Arabian Peninsula. Sedimentary geology of Saudi Arabia. Geol. Surv. Prof. Paper U.S.A. N° 560 D. Washington. 147 p.
- QURESHI I.R., SADIG A.A. 1967 - Earthquakes and associated faulting in Central Sudan. Nature. Vol. 215. N° 5098, p. 263-265.
- REINECK H.E., SINGH I.B. 1973 - Depositional sedimentary environments. Springer-Verlag, Berlin. 439 p.
- REMY J.C. 1971 - Influence de la constitution physique des sols sur leur comportement mécanique ; signification des limites d'Atterberg en matière de travail de sol. Ann. Agron. Vol. 22. N° 3, p. 267-290.
- ROTHER J.P. 1969 - The seismicity of the Earth. La séismicité du Globe 1953-65. UNESCO ; Paris. 336 p. 1 dépliant.

- RUXTON B.P. 1956 - An account of the geology of the Sennar and Gedaref area, in WHITEMAN : The geology of the Sudan Republic.
- RUXTON B.P., BERRY L. 1961 - Notes on faceted slopes, rock fans, and domes on granite in the East-Central Sudan. Am. J. Sci. 259, 194-206.
- SINGH S. 1954 - A study of the black cotton-soil with special references to their coloration. Journ. of Sc. London. V, (2), 289-299.
- SMITH J. 1949 - Distribution of tree species in the Sudan in relation to rainfall and soil texture. Min. Agric. Sudan Gov. Bulletin 4. Khartoum. 66 p.
- SOGREAH 1974 a - Upper Atbara Project. Preliminary Studies. Report on the comparative studies on the Burdana and Rumela dam sites. R. 11728, Rapport inédit. Sogreah, Grenoble.
- SOGREAH 1974 b - Upper Atbara Project. Preliminary Design Report. On the siltation control, sizing and operation of the finally selected Rumela-Burdana reservoirs for power generation and irrigation in conjunction with Khashm El Girba reservoir protection. R. 12040. Rapport inédit. Sogreah, Grenoble.
- STERENBERG J., VERDIER J. 1973 - Exemple d'étude de la stabilité des rives d'une retenue (Barrage Moulay-Youssef au site d'Aït-Aadel, Maroc). Ann. ITBTP N° 312, Sols et fondations n° 101, p. 50-60.
- STRECKEISEN A.L. 1967 - Classification and nomenclature of igneous rocks (Final Report of an Inquiry). N. Jb. Miner. Abh. 107, 2u.3, 144-240.
- SULEIMAN Y. 1968 - The hydrogeology of part of Eastern Sudan (Gedaref District). Bull. N° 16. Geological Survey Dpt. Khartoum. 52 p.
- TERZAGHI K., PELK R.B. 1965 - Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et au bâtiment. Dunod, Paris. 565 p.
- TOTHILL J.D. 1952 - Agriculture in the Sudan. 2° éd. Oxford Univ. Press, London. 974 p.
- VERDEYEN J., ROISIN V., NUYENS J. 1968 - La Mécanique des Sols. Dunod, Paris. 509 p.
- WHITEMAN A.J. 1970 - Nubian Group : origin and status. Bull. Am. Ass. Petrol. Geol. Vol. 54, n° 3. 522-528.
- WHITEMAN A.J. 1971 a - Nubian Sandstone paleoenvironment in Sudan : reply Bull. Am. Ass. Petrol. Geol. Vol. 55, n° 6. p. 884 et suiv.

WHITEMAN A.J. 1971 b - The geology of the Sudan Republic. Clarendon Press, Oxford. 290 p.

ZAMAN KHAN M. 1975 - Hydrogéologie du bassin versant du Moharlu. Hydrodynamique des massifs calcaires de la région de Chiraz (Iran). Thèse Doct. Sciences. Grenoble. 216 p.

Cartes :

Geological map of the Anglo-Egyptian Sudan, 1952 - 1/1 000 000. sheet 55 Khartoum. Geological Survey Dpt., Khartoum.

River Atbara Diversion Scheme. Khashm El Girba reservoir. 1/25 000. 5 & 6. Min. of Irrigation and Survey Dpt., Khartoum.

Photographies aériennes :

Es Showak left bank Upper Atbara and Khor of Tomat, right bank Setit-Atbara, quarry of granite. 1966 - 1/40 000. E9 : 119-125, D69 : 169-171. Survey Dpt, Khartoum.

VU

Grenoble, le

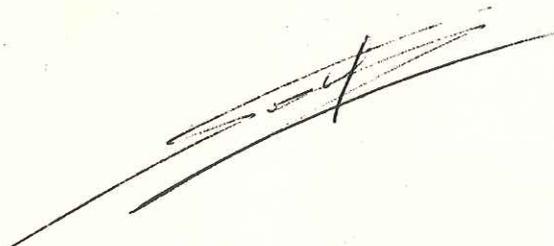
Le Président de la thèse

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'F. B.', written over a horizontal line.

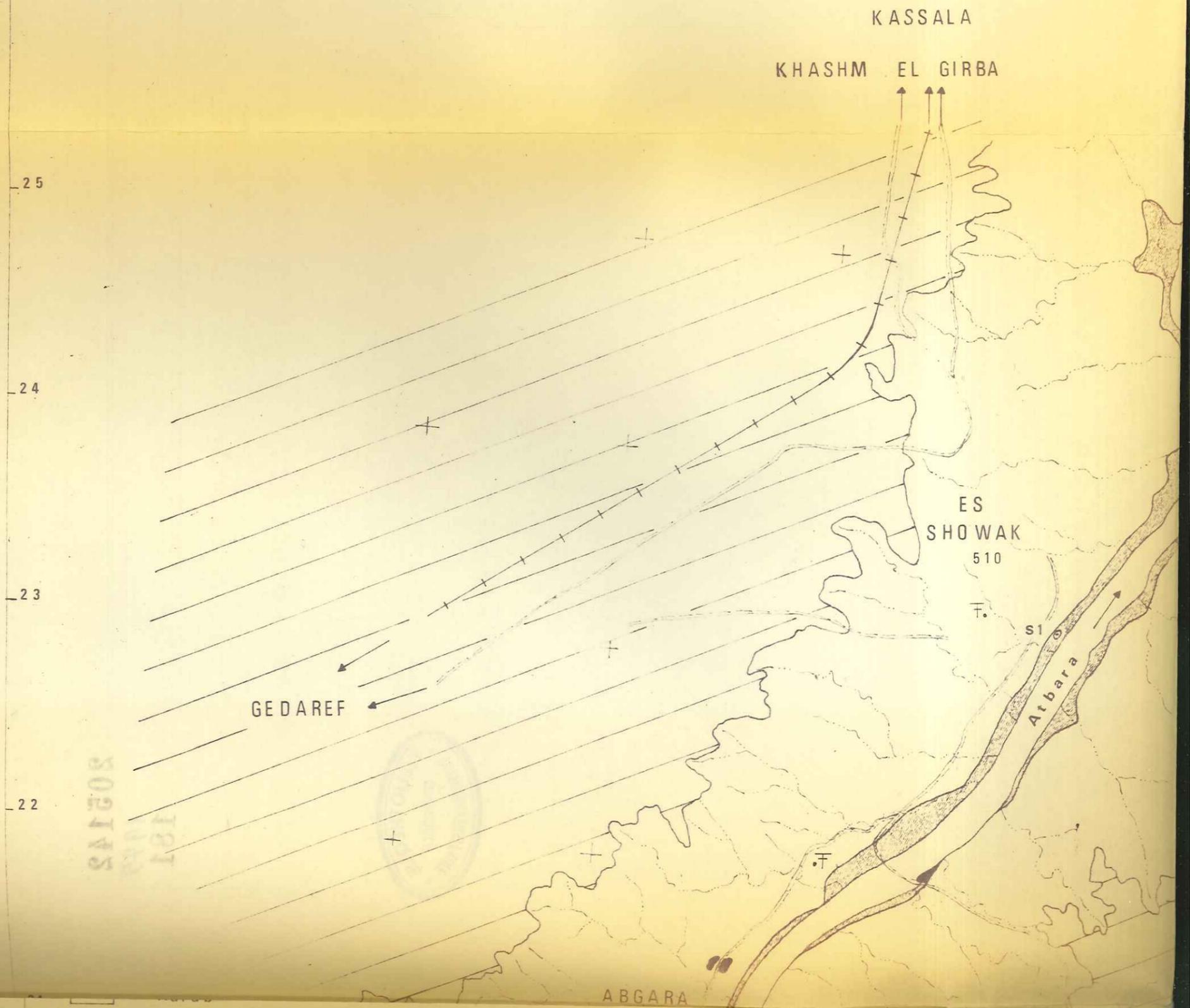
Vu, et permis d'imprimer,

Grenoble, le

Le Président de l'Université  
Scientifique et Médicale

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping, sweeping strokes.

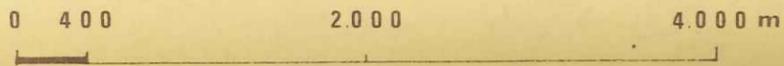
CARTE GEOLOGIQUE DU CONFLUENT  
GEOLOGICAL MAP OF THE ATBARA



# CONFLUENCE ATBARA - SETIT

## ATBARA - SETIT CONFLUENCE

ECHELLE :  
SCALE : 1/40.000



14° 20

19

18

17

16

15

14

35° 48

49

50

51

ARADEIBA

Atbara

Setit

TOMAT

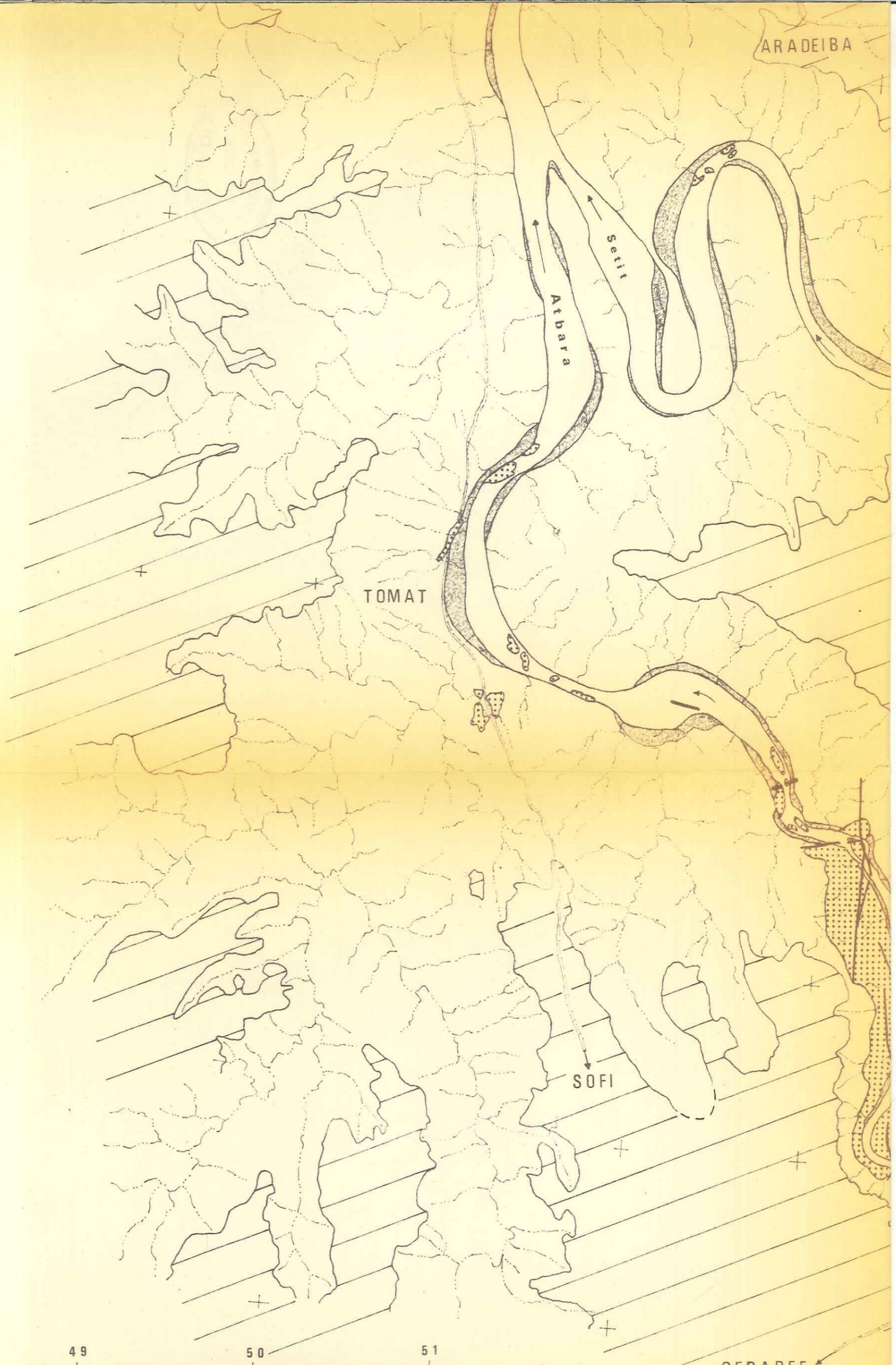
SOFI

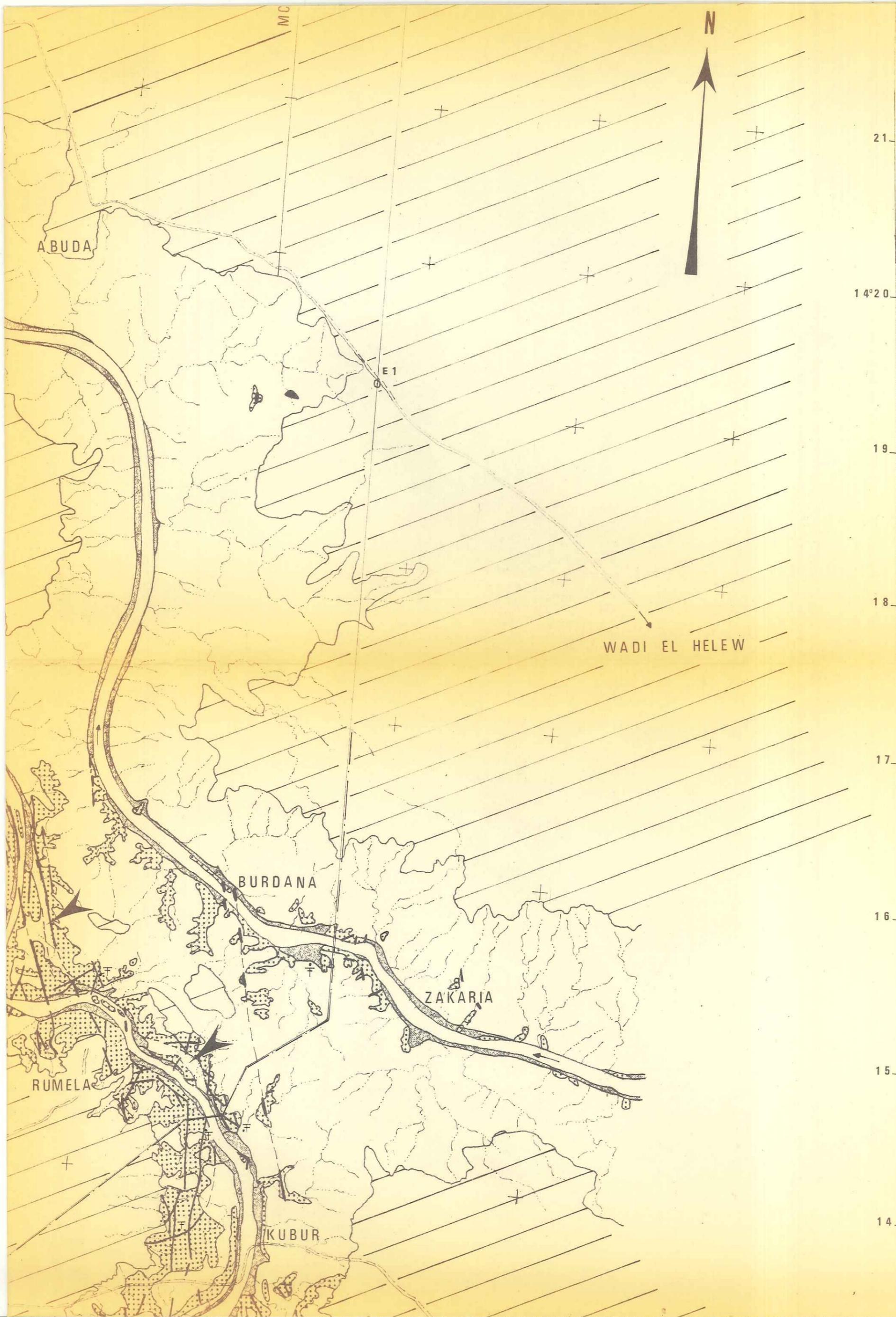
GEDAREF

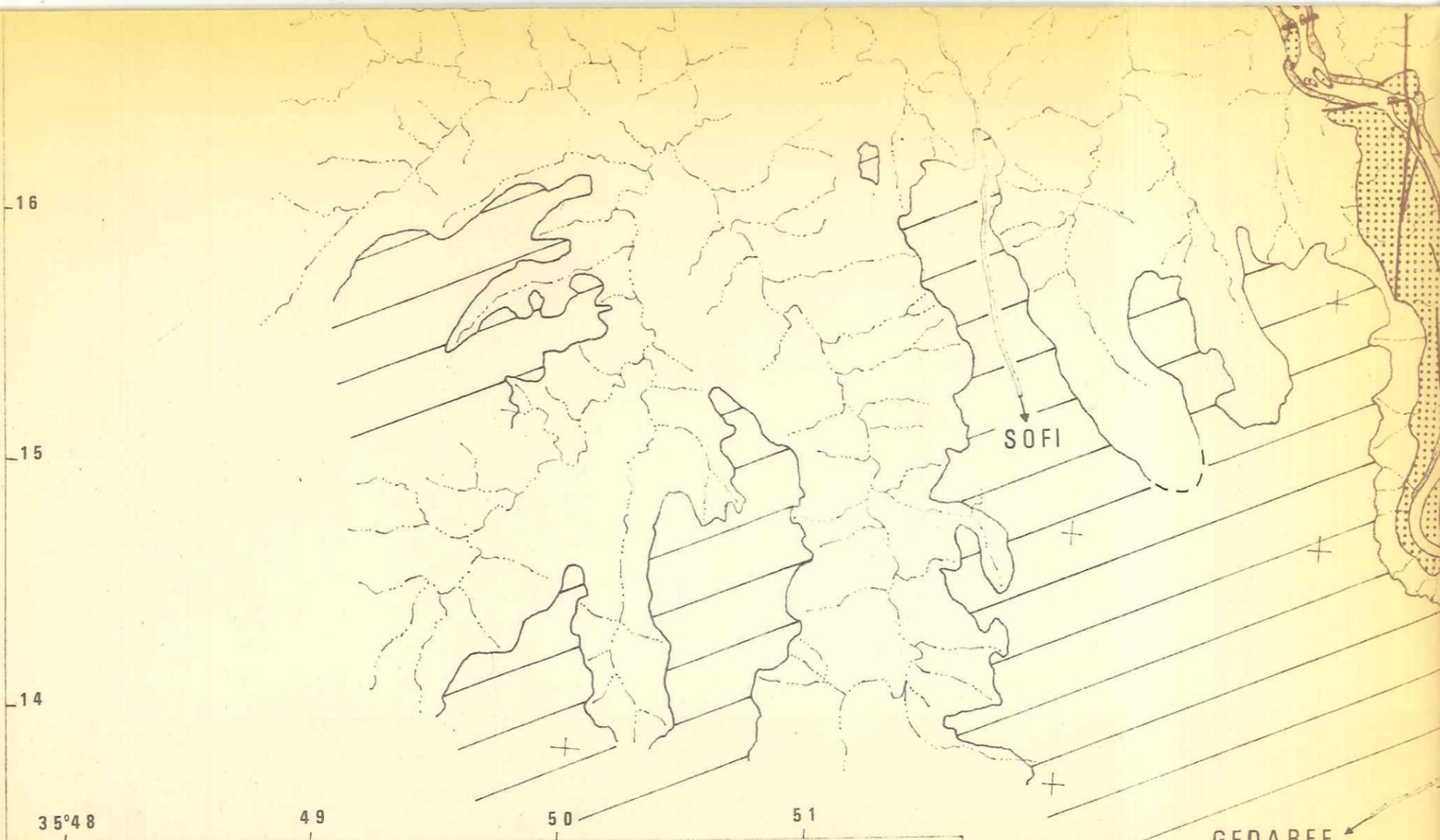
GEDAREF

# LÉGENDE - LEGEND

-  Limon - Loam
-  Cotton-soil
-  Karah



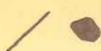




**LÉGENDE - LEGEND**

-  Limon - Loam
-  Cotton-soil
-  Karab

**ACTIVITÉ TERTIAIRE - TERTIARY ACTIVITY**

-  Dykes (ou failles) et blocs basaltiques  
Basaltic dykes and blocks (sometimes faults)

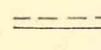
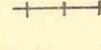
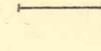
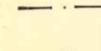
**MÉSOZOÏQUE - MESOZOÏC**

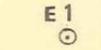
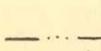
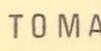
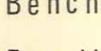
-  "Grès de Nubie" - Nubian Sandstone Formation

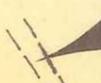
**BASEMENT COMPLEX**

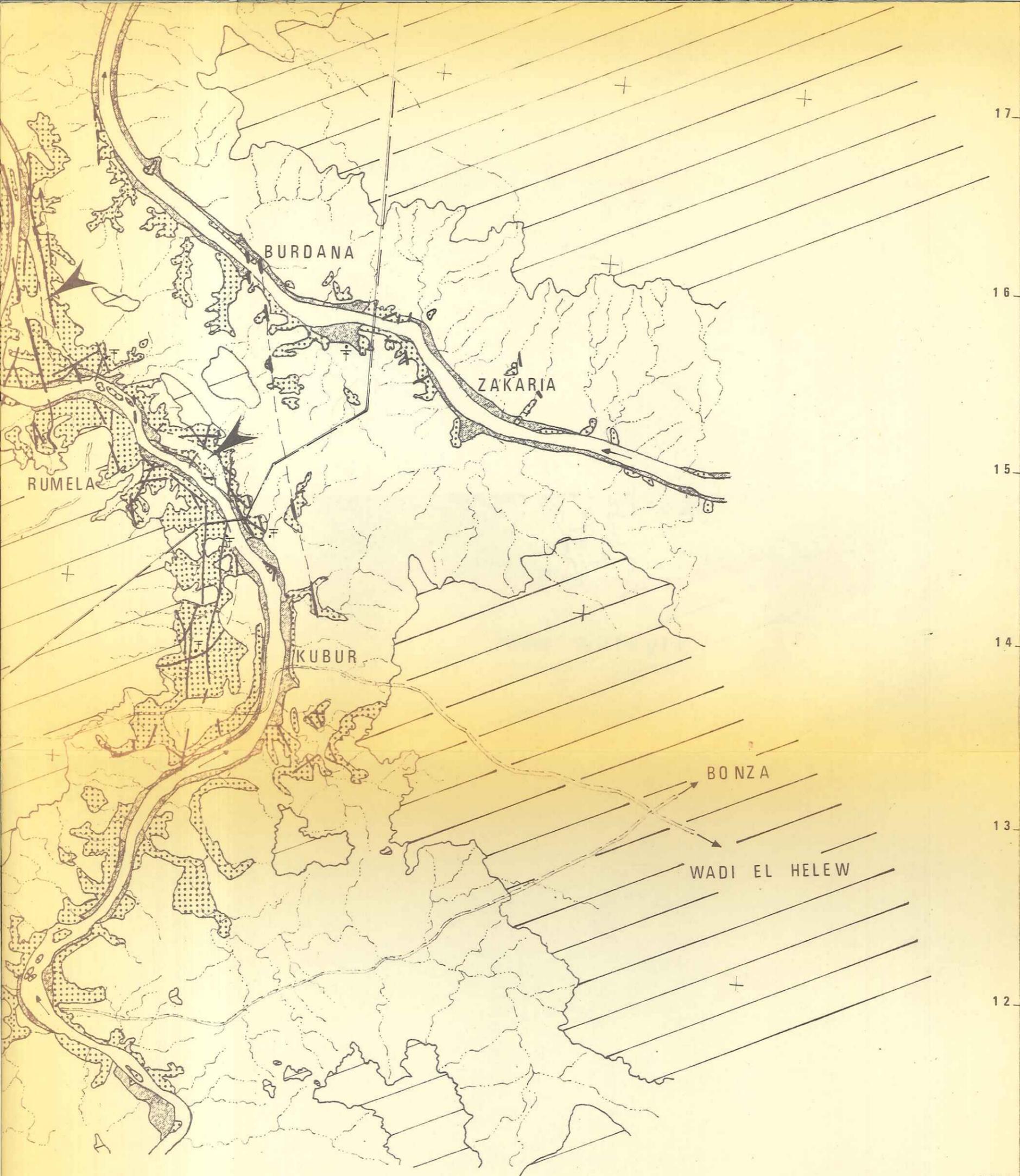
-  Granite
-  Arène granitique - Decomposed granite

**FIGURÉS - SYMBOLS**

-  Route, piste - Road, track
-  Ligne de chemin de fer - Railway line
-  Profils topographiques - Topographical profiles
-  Axe du barrage - Dam axis

-  Sondage - Borehole
-  Khor, talweg
-  Village
-  Repère topographique - Bench-mark
-  Fossile - Fossil

-  Ancienne vallée remblayée  
Old buried channel



17

16

15

14

13

12

14°11

55

56

57

58

35°59