



HAL
open science

Contribution à l'étude des massifs de fondation de barrages

Bernard Schneider

► **To cite this version:**

Bernard Schneider. Contribution à l'étude des massifs de fondation de barrages. Géologie appliquée. Université de Grenoble, 1967. Français. NNT: . tel-00723689

HAL Id: tel-00723689

<https://theses.hal.science/tel-00723689>

Submitted on 13 Aug 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.

MÉMOIRES

N° 7

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES MASSIFS DE FONDATION DE BARRAGES

par

Bernard SCHNEIDER

1009955

LISTE DES PROFESSEURS

DOYENS HONORAIRES	M. FORTRAT P. M. MOREL L.	
DOYEN	MM. WEIL L.	
PROFESSEURS TITULAIRES	NEEL L. HEILMANN R. KRAVTCHENKO J. CHABAUTY C. PARDE M. BENOIT J. CHENE M. BESSON J. WEIL L. FELICI N. KUNTZMANN J. BARBIER R. SANTON L. OZENDA P. FALLOT M. GALVANI O. MOUSSA A. TRAYNARD P. SOUTIF M. CRAYA A. REULOS R. AYANT Y. GALISSOT F. Mlle LUTZ E. BLAMBERT M. BOUCHEZ R. LLIBOUTRY L. MICHEL R. BONNIER E. DESSAUX G. PILLET E. DEBELMAS J. GERBER R.	MAGNETISME ET PHYSIQUE DU SOLIDE CHIMIE ORGANIQUE MECANIQUE RATIONNELLE CALCUL DIFFERENTIEL ET INTEGRAL POTAMOLOGIE RADIOELECTRICITE CHIMIE PAPETIERE ELECTROCHIMIE THERMODYNAMIQUE ELECTROSTATIQUE MATHEMETIQUES APPLIQUEES GEOLOGIE APPLIQUEE MECANIQUE DES FLUIDES BOTANIQUE PHYSIQUE INDUSTRIELLE MATHEMATIQUES CHIMIE NUCLEAIRE CHIMIE PHYSIQUE HYDRODYNAMIQUE THEORIE DES CHAMPS PHYSIQUE APPROFONDIE MATHEMATIQUES MATHEMATIQUES MATHEMATIQUES PHYSIQUE NUCLEAIRE GEOPHYSIQUE GEOLOGIE ET MINERALOGIE ELECTROCHIMIE PHYSIOLOGIE ANIMALE ELECTROTECHNIQUE GEOLOGIE MATHEMATIQUES

.../...

		PAUTHENET R.	ELECTROTECHNIQUE
		VAUQUOIS B.	MATHEMATIQUES APPLIQUEES
		SILBER R.	MECANIQUE DES FLUIDES
		BARBIER J.C.	PHYSIQUE
		KOSZUL J.L.	MATHEMATIQUES
		BUYLE-BODIN M.	ELECTRONIQUE
		DREYFUS B.	THERMODYNAMIQUE
		KLEIN J.	MATHEMATIQUES
		VAILLANT F.	ZOOLOGIE
		ARNAUD P.	CHIMIE
		SENGEL P.	ZOOLOGIE
		BARJON R.	PHYSIQUE NUCLEAIRE
		BRISSONNEAU P.	PHYSIQUE
Mme		KOFLE L.	BOTANIQUE
		BARNOUD F.	BIO-SYNTHESE DE LA CELLULOSE
		GAGNAIRE D.	CHIMIE PHYSIQUE
		GIRAUD P.	GEOLOGIE
		GIDON P.	GEOLOGIE ET MINERALOGIE
		PERRET R.	SERVOMECHANISMES
Mme		BARBIER M.J.	ELECTROCHIMIE
Mme		SOUTIF J.	PHYSIQUE
		COHEN J.	ELECTROTECHNIQUE
		DEPASSEL R.	MECANIQUE
		ANGLES D'AURIAC	MECANIQUE DES FLUIDES
		DUCROS P.	MINERALOGIE ET CRISTALLOGRAPHIE
		GASTINEL A.	MATHEMETIQUES APPLIQUEES
		GLENAT R.	CHIMIE
		LACAZE A.	THERMODYNAMIQUE
		BARRA J.	MATHEMATIQUES APPLIQUEES
		COUMES A.	ELECTRONIQUE
		DEGRANGE C.	ZOOLOGIE
		PEBAY-PEROULA	PHYSIQUE
		PERRIAUX J.	GEOLOGIE
		RASSAT A.	CHIMIE SYSTEMATIQUE
		ROBERT A.	CHIMIE PAPETIERE
PROFESSEURS ASSOCIES	MM.	NAPP-ZINN	BOTANIQUE
		DUTTON G.	BIO-SYNTHESE
		MATSUSHIMA Y.	MATHEMATIQUES PURES
MAITRES DE CONFERENCES	MM.	BIAREZ J.P.	MECANIQUE PHYSIQUE
		DODU J.	MECANIQUE DES FLUIDES
		HACQUES G.	CALCUL NUMERIQUE
		LANCIA R.	PHYSIQUE AUTOMATIQUE
Mme		KAHANE J.	PHYSIQUE
		POLOUJADOFF M.	ELECTROTECHNIQUE
		DEPOMMIER P.	PHYSIQUE NUCLEAIRE
		DEPORTES C.	CHIMIE
Mme		BOUCHE L.	MATHEMATIQUES
		SARROT-REYNAULD	GEOLOGIE

.../...

	CAUQUIS G.	CHIMIE GENERALE
	BONNET .G.	PHYSIQUE EXPERIMENTALE
	BONNIER M.J.	CHIMIE
	KAHANE A.	PHYSIQUE GENERALE
	DOLIQUE J.M.	ELECTRONIQUE
	BRIERE G.	PHYSIQUE EXPERIMENTALE
	DESRE P.	METALLURGIE
	LAJZEROWICZ J.	PHYSIQUE GENERALE
	VALENTIN P.	PHYSIQUE GENERALE
	BERTRANDIAS J.P.	MATHEMATIQUES APPLIQUEES
	BONNETAIN L.	CHIMIE MINERALE
	LAURENT P.	MATHEMATIQUES APPLIQUEES
	CAUBET J.P.	MATHEMATIQUES PURES
	PAYAN J.J.	MATHEMATIQUES
Mme	BERTRANDIAS F.	MATHEMATIQUES PURES
	FONTANGES R.	PHYSIOLOGIE ANIMALE
	LONGEQUEUE J.P.	PHYSIQUE
	NIVAT M.	MATHEMATIQUES APPLIQUEES
	SOHM J.C.	ELECTROCHIMIE
	ZADWORNY F.	PHYSIQUE

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES

MM.	RADELLI	GEOLOGIE
	KEYSTON J.	THERMODYNAMIQUE
	WAKIYAMA T.	PHYSIQUE DU SOLIDE

TABLE DES MATIERES

	<u>Pages</u>
<u>AVANT-PROPOS</u> -----	1
<u>A. - GEOLOGIE DE QUELQUES SITES DE BARRAGE</u>	
I. - <u>Géologie détaillée de trois sites de barrages</u>	
1 - Malpasset -----	7
2 - Hendrik Verwoerd -----	25
3 - Tachien -----	48
II. - <u>Particularité fondamentale des trois sites et comparaison des moyens de reconnaissances utilisés</u>	63
III. - <u>Géologie sommaire et caractéristiques essentielles de quelques autres sites</u> -----	69
<u>B. - ESSAIS MECANQUES ET MESURES DES CARACTERES PHYSIQUES PARTICULIERS DES MASSIFS ROCHEUX</u>	
I. - <u>Etude statistique des discontinuités</u> -----	81
II. - <u>Essais sur échantillons</u>	
1 - Essais d'écrasement -----	99
2 - Essais divers -----	117
3 - Lames minces colorées -----	126
III. - <u>Essais sur la roche en place</u>	
1 - Essais au vérin -----	147
2 - Essais de petite sismique -----	173
3 - Traitement de quelques cas d'espèces -----	214
IV. - <u>Traits spécifiques des essais géomécaniques exécutés</u> -----	229
<u>CONCLUSION GENERALE</u> -----	231
<u>BIBLIOGRAPHIE</u> -----	237

LISTE DES FIGURES

N° fig.		Pages
1	Esquisse géographique du SE de la France -----	7
2	Schéma tectonique du bassin stéphanien du Reyran -----	9
3	Gneiss à deux micas de <u>Malpasset</u> -----	11
4	Gneiss à biotite -----	12
5	Gneiss à deux micas -----	12
6	Gneiss à muscovite -----	13
7	Plan géologique du site de Malpasset -----	entre 12 et 13
8	Rive droite du site de Malpasset -----	13
9	Pegmatite -----	14
10	Rocher à l'amont de l'ouvrage rive gauche -----	16
11	Légende pour le repérage d'un plan -----	17
12	Relevé statistique des petites discontinuités du Malpasset -----	18
13	Statistique générale " " " -----	19
14	Lèvre d'une faille -----	20
15	Remplissage de faille -----	20
16	Face amont du dièdre rive gauche -----	21
17	Statistique des failles et cisaillements -----	21
18	Rive gauche de Malpasset -----	22
19	Détails a -----	23
20	Détails b -----	24
21	Croquis géologiques de l'Afrique du Sud -----	27
22	Site du barrage de <u>Hendrik Verwoerd</u> -----	29
23	Schéma de l'injection conique -----	30
24	Implantation des reconnaissances -----	32
25	Coupes géologiques -----	33
26	" " -----	34
27	Courbes isopaches des terrains de couverture -----	35
28	Schéma de l'écoulement de la dolérite -----	37
29	Echantillon R S 213 - roche subophitique -----	39
30	" P S 104 - roche grenue -----	39
31	Contact entre dolérites -----	40
32	Dolérite supérieure -----	41
33	Dolérite " altérée -----	42
34	Décomposition de la dolérite -----	44
35	Statistique des joints étendus -----	45
36	" " petits joints -----	47
37	Esquisse géologique de l'île de Formose -----	49
38	Carte géologique du site de <u>Tachien</u> -----	53
39	Vues du site -----	54
40	Implantation des reconnaissances -----	entre 54 et 55
41	Statistique des joints, site principal -----	56
42	Fracturation rive droite -----	58
43	Statistique des joints, éperon -----	59
44	Coupe de l'éperon -----	62
45	Diagramme polaire de définition statistique des joints -----	84
46	Sainte-Croix, Répartition des discontinuités -----	88
47	Malpasset, écartements des joints -----	89
48	" , orientations " " -----	90
49	" , " " " -----	90

50	Hendrik Verwoerd, écartements des joints	-----	91
51	" " , orientations des joints	-----	92
52	" " " " "	-----	92
53	Tachien, écartements des joints	-----	93
54	" , orientations des joints du site	-----	94
55	" , écartements des joints de l'éperon	-----	95
56	" , orientations des joints	-----	95
57	Gittaz, écartements des joints	-----	96
58	" , orientations des joints	-----	96
59	Sainte-Croix, écartements des joints	-----	97
60	" , orientations des joints	-----	98
61	Matériel utilisé pour les écrasements d'échantillons	-----	101
62	" " " " " " "	-----	101
63	Essais d'écrasement, Malpasset	-----	103
64	" " Yaté	-----	104
65	" " Saint-Chamond	-----	105
66	" " Salagou	-----	106
67	" " Granval	-----	107
68	" " Kyle	-----	108
69	" " Bengala	-----	109
70	" " Monteynard	-----	110
71	" " Naguilhes	-----	111
72	Variation de résistances à la compression et à la traction	-----	113
73	Matériel utilisé pour les essais de perméabilité	-----	118
74	Mise en compression hydrostatique	-----	119
75	Déformation d'un bloc de gneiss de Malpasset	-----	121
76	Essais de percolation linéaire	-----	123
77	" " "	-----	124
78	Gneiss de la Gittaz	-----	128
79	" " Saint-Jean-du-Gard	-----	129
80	" " Saint-Cassien	-----	130
81	" " Malpasset	-----	131
82	" " Kariba	-----	132
83	" " Bengala	-----	133
84	Calcschiste de Kardjali	-----	134
85	Gneiss fibreux utilisé pour les essais de vieillissement	-----	141
86	Presse Lepetit utilisée	-----	142
87	Evolution de la microfissuration avec des cycles d'effort	-----	145
88	" " " avec des cycles de saturation	-----	145
89	Essais aux vérins, courbes de déformation	-----	148
90	" " , définition des critères	-----	148
91	Schéma d'un essai au vérin	-----	151
92	Détail d'un essai au vérin	-----	152
93	" " " "	-----	153
94	Surface pour essai au vérin	-----	154
95	Répartition des modules à Tachien	-----	158
96	Déformation à pression constante	-----	159
97	Essais au vérin RA 4, Hendrik Verwoerd	-----	163
98	Classement des roches en place	-----	166
99	Variations des coefficients de déformation au sommet	-----	169
100	Coefficient de déformation Cc et Cd	-----	170
101	Contraintes initiales - Résultats généraux	-----	171
102	" " " partiels	-----	172
103	Ondes planes longitudinales	-----	174

104	Ondes planes transversales	174
105	Petite sismique, détail des ondes	176
106	" " courbe de réponse des géophones	178
107	" " appareillage utilisé	179
108	" " " "	180
109	" " type des seismogrammes	182
110	" " opérations types	184
111	" " graphique type	185
112	" " niveau de bruit dans une galerie	188
113	" " profil sismique de bétons de barrage	190
114	" " " " " " Van der Kloof	191
115	" " " " " " Hendrik Verwoerd	192
116	" " " " " " " " "	193
117	" " " " " " Malpasset	194
118	" " " " " " Saint-Cassien	195
119	" " " " " " Saint-Jean-du-Gard	196
120	" " " " " " Gittaz	197
121	" " " " " " Kardjali	198
122	" " " " " " Lanoux	199
123	" " " " " " Kasseb	200
124	" " " " " " Sainte-Croix	201
125	Relations expérimentales entre longueurs d'onde et valeurs sclérométriques	203
126	" " " vitesses transversales et valeurs sclérométriques	205
127	Relation entre coefficient de Poisson et vitesses	207
128	Relations entre modules sismiques et statiques	209
129	Relations entre modules statiques et longueurs d'onde	209
130	" " " " et fréquences	210
131	Tenseur de déformation, tenseur de contrainte et temps	212
132	Relations entre modules de déformation et coefficient de déformation résiduelle	213
133	Essais de relaxation d'éponte à Tachien	215
134	Essais d'eau sur un remplissage plastique	217
135	Essais de claquage sur un remplissage plastique	217
136	Essais de gonflement sur un remplissage plastique	219
137	Essais de mise en pression d'une galerie à Hendrik Verwoerd	220-221
138	" " " " " " " "	223
139	Essais de décompression	224
140	Essais de mise en pression	225
141	Résultat de la mise en pression, témoins encastrés	227
142	Dilatation diamétrale	228

LISTE DES TABLEAUX

<u>Tableaux</u>		<u>Pages</u>
I	Résumé des résultats d'écrasements -----	112
II	Etude des colorants employés dans les lames minces -----	entre 126 et 127
III	Tachien, récapitulation des résultats d'essais au vérin -----	entre 156 et 157
IV	" " " " -----	" "
V	" " " " -----	" "
VI	" " " " -----	" "
VII	" " " " -----	" "
VIII	" " " " -----	" "
IX	Hendrik Verwoerd, récapitulation des résultats d'essais au vérin -----	entre 160 et 161
X	" " " " " " -----	" "
XI	" " " " " " -----	" "
XII	Récapitulation des résultats globaux d'essais au vérin -----	entre 166 et 167
XIII		
XIV	Valeurs des caractéristiques mesurées par essais sismiques et statiques -----	202

Qui d'autre que M. BARBIER, dont les travaux sur les fondations de barrages sont réputés, pouvait mieux diriger cette thèse. Qu'il trouve ici l'expression de ma respectueuse reconnaissance.

M. MICHEL, plus spécialement pour les difficiles définitions pétrographiques des structures des roches et M. BIAREZ, pour les questions géomécaniques, m'ont grandement aidé à dégager et à classifier des phénomènes complexes. Je leur en suis profondément obligé.

M. BOURGIN, qui a bien voulu accepter de se joindre au Président et aux Membres du Jury, m'a fait bénéficier de sa très grande expérience technique. Je l'en remercie vivement.

Le Bureau d'Ingénieurs-Conseils COYNE et BELLIER m'a permis, par les nombreux travaux qui m'ont été confiés et par le support matériel qui m'a été accordé, de mener à bien cette recherche. Je lui en suis profondément attaché.

L'ELECTRICITE DE FRANCE m'a autorisé à utiliser de nombreux résultats tirés de ses archives pour les comparaisons de sites que j'ai été amené à faire.
La TAIWAN POWER COMPANY et le DEPARTMENT OF WATER AFFAIRS de la République d'Afrique du Sud m'ont permis de publier les résultats obtenus sur des sites en cours d'étude.
Je les en remercie avec gratitude.

Je voudrais enfin adresser mes plus sincères remerciements à toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide et particulièrement :

A M. BELLIER qui m'a consacré avec bienveillance une partie de son temps,

A mes camarades ingénieurs et géologues du Bureau COYNE et BELLIER qui m'ont soumis de nombreux problèmes et avec qui les dialogues ont été si précieux.

Je dois un merci spécial à MM. LONDE, FARHI, VERDIER, MAURY, ROUSSEL et GAISSA qui m'ont aidé dans la réalisation des essais et dans la rédaction de cette thèse.

AVANT - PROPOS

Pendant des millénaires, les hommes ont dû considérer la roche comme une matière qui pouvait leur offrir des abris sûrs ou fournir des fondations de qualité pour leurs maigres ouvrages. Plus tard, ils s'attaquèrent au rocher pour en sortir des monuments (temples bouddhiques, monuments égyptiens). Ce pas en avant ne se fit pas sans mal puisque les archéologues affirment que certaines réparations visibles sur des monuments anciens sont contemporaines de leur construction, par exemple sur le tombeau de Darius I, près de Persepolis, creusé à flanc de rocher il y a 2400 ans.

D'autres difficultés devaient aussi se présenter - on sait que des éboulements parfois gigantesques ont ébranlé notre préhistoire - et pour les affronter, les hommes ont été conduits peu à peu à faire évoluer leur technique.

Puis une longue période de l'histoire s'est écoulée, pour en arriver, récemment, à prendre sérieusement en considération le comportement de la fondation des ouvrages. Cette évolution peut être due essentiellement à la mutation brutale des constructions humaines, tant en multiplicité qu'en importance et en hardiesse.

Plus particulièrement dans le domaine des aménagements hydrauliques, les ouvrages de retenue dépassent maintenant 200 mètres de hauteur. Ils atteindront bientôt 300 mètres.

Certaines de ces réalisations connaissent un jour la destruction, rappelant ainsi à l'ingénieur que son projet repose avant tout sur une série d'hypothèses plus ou moins risquées. La difficulté d'évaluer ces risques pousse à la prudence alors que, d'un autre côté, la recherche de l'économie ferait pencher vers des solutions plus hardies. Prudence et économie, apparemment contradictoires, obligent l'ingénieur à concevoir des moyens de meilleure connaissance de la matière qu'il sollicite, c'est-à-dire avant tout celle qui intéresse la fondation de l'ouvrage.

Le problème est considérable et la naissance de cette nouvelle science que constitue la mécanique des roches s'effectue prudemment.

On est encore loin d'arriver à exprimer mathématiquement le comportement d'un milieu, c'est-à-dire à formuler sa loi rhéologique. Nous devons nous contenter d'étudier séparément des facteurs pouvant intervenir dans certaines hypothèses.

Voici posé le but de notre travail. D'une part, nous avons considéré l'étude géologique du massif de fondation pour nous renseigner sur son histoire, la nature et la géométrie de ses matériaux constitutifs ; d'autre part, nous avons cherché, à l'aide d'expériences normalisées, à mieux connaître certains caractères fondamentaux spécifiques au massif. Il faut tout de suite souligner l'importance donnée à l'étude des discontinuités mécaniques définissant la structure du massif.

Nous avons cherché aussi à améliorer notre connaissance du massif rocheux par l'étude et l'analyse de ses ruptures, ruptures de fondations ou éboulements. La rupture, en effet, peut permettre de définir le seuil de l'équilibre limite.

Mais pour tirer parti d'une rupture, il faut en connaître les causes qui restent trop souvent jalousement gardées par la nature. De plus - et heureusement, puisque les ruptures occasionnent des catastrophes - les cas

sont trop rares pour que leur étude permette d'en tirer des conclusions statistiques. Aussi, nous sommes-nous tournés vers les pentes en place et les fondations intactes pour avancer davantage dans l'étude des massifs.

Notre travail se divise en deux grandes unités :

Dans la première, nous avons entrepris la description géologique approfondie de trois sites de grands barrages en béton, de caractéristiques très différentes tant par la nature de la fondation que par la structure de l'ouvrage lui-même. Bien que notre travail ne soit pas orienté vers la géologie pure, nous pensons que les détails que nous donnons sont nécessaires à la parfaite connaissance du massif, même si son exploitation n'est pas immédiate. En effet, la bonne connaissance, non seulement du site mais aussi du massif, à toutes les échelles, est nécessaire car les pièges cachés que peut recèler la fondation ne sont souvent bien visibles qu'à une échelle d'observation inhabituelle.

La définition d'une roche commence par celle de sa pétrographie ; nous avons également décrit la minéralogie des roches des sites de barrages envisagés, mais dans le but de définir simplement la microstructure et la nature élémentaire des composants, sans détermination plus fine.

L'étude générale permet de faire ressortir certains problèmes nécessitant, pour leur résolution, l'exécution d'autres observations ou essais. Nous en analyserons quelques uns en nous efforçant toujours de considérer un essai ou une observation comme un élément d'un ensemble, donc susceptible de comparaison et d'adaptation.

Les sites étudiés en détail sont :

- MALPASSET, où un barrage voûte de 66 mètres de hauteur avait été construit sur du gneiss et qui a été détruit en décembre 1959 à la suite d'une rupture de fondation.

- TACHIEN, dans l'île de Formose, où un barrage voûte de 200 mètres de hauteur est projeté dans une gorge aux parois raides de quartzite schisteux.

- HENDRIK VERWOERD, en Afrique du Sud, où un barrage voûte de 90 mètres de hauteur est en cours de construction dans une gorge de dolérite aux pentes douces.

Nous serons amenés à comparer les résultats que nous avons obtenus sur les trois sites étudiés, aux résultats obtenus sur d'autres sites soit par nous, soit par E.D.F. A cette occasion, nous donnerons une description géologique sommaire des sites de comparaison, afin de faire connaître leurs caractères fondamentaux.

La deuxième partie du travail concerne la description des essais ou mesures effectués sur échantillons ou in situ.

Pour décrire mécaniquement un massif, il faut connaître les matrices de la roche et leur association. L'étude des matrices, bien connue des pétrographes, intéresse l'échantillon alors que celle des discontinuités fait apparaître la notion d'assemblage en place, donc celle de massif.

Nous devons convenir, hélas, que les moyens d'étude du cristal sont bien plus nombreux que ceux de l'étude

du massif. C'est sans doute pour cette raison que l'étude de l'échantillon semble plus avancée que celles des grandes structures. Il est toutefois intéressant de noter que la tendance actuelle, dans le domaine de la mécanique des roches, est bien l'étude du massif. Ainsi, lors des congrès internationaux de mécanique des roches de Salzbourg de 1964 et 1965, pas une communication n'a été consacrée à l'échantillon.

Nous présentons, néanmoins, un certain nombre d'observations faites sur des échantillons qui nous ont paru susceptibles de compléter, ou guider, les observations faites sur le site.

Les essais en place comportent soit la mise au point de techniques nouvelles, soit l'exploitation de techniques relativement anciennes que nous avons orientées un peu différemment.

Les singularités mises en lumière par les essais mécaniques seront presque toujours expliquées par le type de discontinuités qui divisent la roche à toutes les échelles ; aussi notre conclusion insistera-t-elle surtout sur l'importance de l'étude de la structure de la fondation à entreprendre dès les premières reconnaissances, pour déterminer l'influence des différentes discontinuités mécaniques affectant le massif rocheux.

DEFINITIONS

Un certain nombre de termes demandent à être précisés soigneusement, en particulier ceux utilisés au cours de l'étude de sites à l'étranger où la terminologie est quelque peu différente de la nôtre.

Les définitions des roches ignées et métamorphiques sont celles proposées par J. YUNG (1958) ; les définitions des roches argileuses sont conformes à celles proposées par G. MILLOT (1964).

Dans le cas du barrage de Hendrik Verwoerd, par exemple, le terme local employé est "shale" qui traduit bien la structure litée, à grain fin, de cette roche argileuse. Nous l'avons traduit dans ce travail par argilite litée.

Dans le mot structure, nous englobons tous les éléments déterminant la disposition spatiale des objets géologiques constituant le site. Ceci inclut ce que P. VIALON (1966) a appelé mésostructure et mégastucture qui couvrent l'échelle du centimètre à celle de la carte, et microstructure qui est visible au microscope. Parmi les mégastuctures, nous avons distingué les failles (fault en anglais) des cisaillements (shear zone en anglais) car leurs moyens de représentation statistiques et cartographiques, sont différents.

A - GEOLOGIE DE QUELQUES SITES DE BARRAGES

I - GEOLOGIE DETAILLEE DE TROIS SITES

- | | |
|------------------|--|
| MALPASSET | - Barrage voûte à double courbure h = 66 m, longueur en crête = 222 m.
Volume de béton : 48.000 m ³ |
| HENDRIK VERWOERD | - Barrage voûte à double courbure h = 90 m, longueur en crête = 930 m
Volume de béton : 1.500.000m ³ |
| TACHIEN | - Barrage voûte à double courbure h = 207 m, longueur en crête = 302 m
Volume de béton : 600.000 m ³ |

1. SITE DE MALPASSET

L'étude d'un site de barrage ruiné par un accident incriminant ses fondations est d'une grande richesse d'enseignement. Toutefois, pour tirer parti d'une rupture, il faut en connaître les causes. Dans le cas présent, l'évolution des événements de ces dernières années montre qu'elles sont très difficiles à connaître. Cependant, les résultats de l'étude géologique forment un ensemble assez homogène permettant de cerner le problème,

1.1. Situation (figure : 1)

Le site du barrage de MALPASSET se trouve à l'extrémité Sud du massif cristallin de Tanneron, à 10 km au Nord de Fréjus. Aux environs du site, le Reyran coule sensiblement N-S. Un barrage voûte d'une soixantaine de mètres de hauteur y a été construit puis fût détruit le 2 décembre 1959,

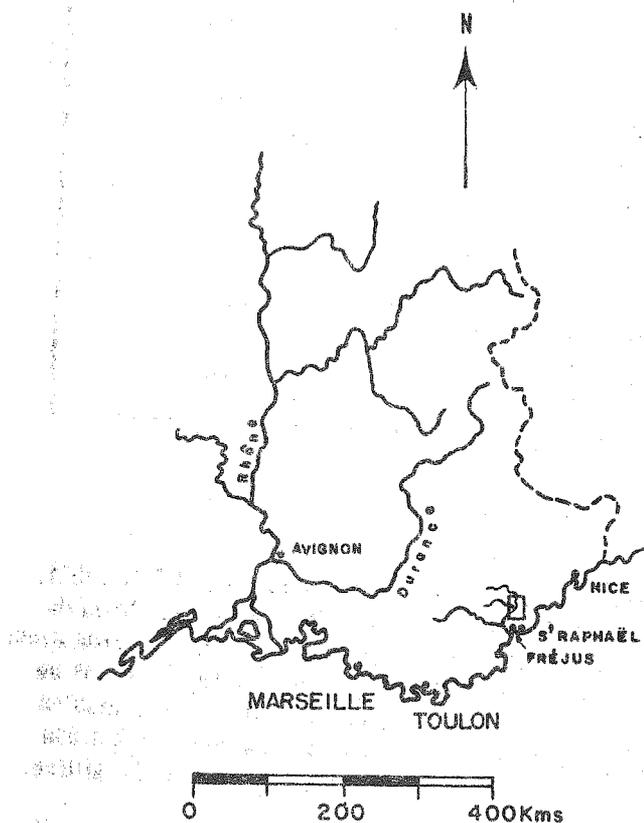


fig. : 1 - Esquisse géographique du Sud-Est de la France situant la région du Bassin du Reyran.

1.2. Géologie générale

Nous donnons ci-dessous un tableau chronologique groupant les différentes phases de l'histoire géologique du massif.

<u>ERE</u>	<u>ETAGES</u>	<u>FORMATIONS</u> (environs du site)	<u>TECTONIQUE</u>	<u>AGE</u> (millions d'années)
Actuel: Quaternaire				
		Dépôts de faible épaisseur	lente surrection	2
Tertiaire (Cénozoïque)	Pliocène Miocène Oligocène Eocène		réenfouissement orogénie alpine	25
				65
Secondaire (Mésozoïque)	Crétacé Jurassique Trias		émersion	200
Primaire (Paléozoïque)	Permien Carbonifère Dévonien Silurien	bassins de sédimentation, volcanisme	orogénie hercynienne	300 350
Anciens		socle		520

1.21. Le Massif de Tanneron (figure : 2)

Les connaissances géologiques sur le Massif de Tanneron sont encore très rudimentaires (BORDET P. 1951). Pétrographiquement, il est formé de gneiss avec seulement, vers l'Ouest, un petit pointement de granite ou de granulite dont l'allure varie d'ailleurs avec chaque auteur. On retrouve dans le Massif de Tanneron une disposition en bandes parallèles, grossièrement N-S, analogues à celles que l'on connaît dans les Maures. La partie S W du massif, qui intéresse spécialement le barrage, est formée d'une série de gneiss à biotite se poursuivant jusqu'au bassin stéphanien du Reyran. Ces gneiss, violemment écrasés, présentent localement une structure mylonitique franche. A l'Est de celui-ci existe une bande de gneiss à muscovite et grenat fortement écrasée et recristallisée.

Ce socle cristallin a fourni des matériaux détritiques qui constituent la majeure partie des formations sédimentaires supérieures stéphanopermiennes. La continuité entre formations cristallines et sédimentaires est telle qu'il est difficile parfois de localiser le contact.

Des accidents ont été reconnus en très grand nombre. Des failles de systèmes N-S se combinent avec d'autres de systèmes plus jeunes E-W en découpant une structure en panneaux d'environ un km. Les failles secondaires se chiffrent par centaines ; leur orientation est le plus souvent à tendance E-W.

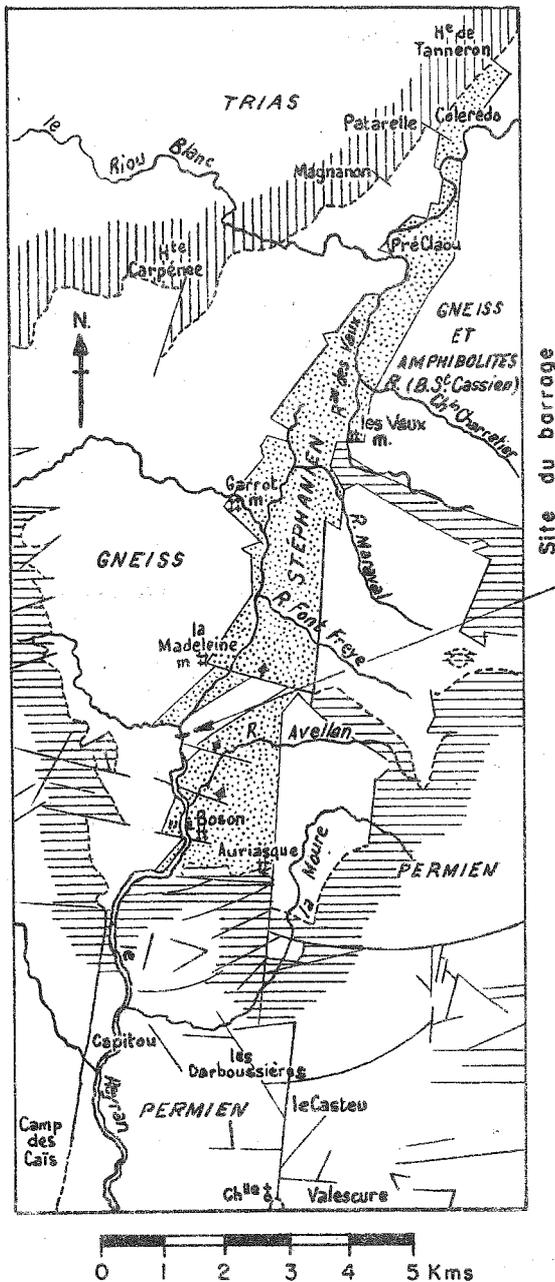


Fig. : 2 - Schéma tectonique du Bassin Stéphanien du Reyran (d'après P. BORDET). -

1.22. Histoire géologique

1.221. Orogénie hercynienne

La première phase tectonique nettement reconnaissable dans le socle cristallin est postérieure au Silurien et antérieure au Carbonifère ; elle est probablement due au paroxysme hercynien. Le socle cristallin a été fortement plissé en une série de bandes orientées à peu près N-S ; de grandes zones d'écrasement s'y sont formées.

Après une phase de dénudation, dont il est impossible d'apprécier l'importance, les sédiments stéphanien se sont rassemblés dans des bassins, probablement isolés, qui semblent avoir été des fossés d'effondrement situés sur l'emplacement des zones écrasées précédentes. Une première éruption rhyolitique a accompagné cette mise

en place. Ensuite se situe une phase de compression qui a plissé et écrasé les formations de ces bassins ; l'orientation N-S des accidents a subsisté au cours de cette phase.

1.222. Orogénie permienne

Les phases suivantes sont caractérisées par une orientation E-W des accidents. La première phase tronçonne les bassins stéphaniens, la deuxième phase correspond au paroxysme volcanique et à un affaissement important des fossés, la troisième phase correspond à une compression qui a provoqué de très nombreuses failles ainsi que des amorces de plissement.

1.223. Secondaire (Mésozoïque)

Le Trias, quand il existe, surmonte directement le Permien, en discordance, Il est relativement tranquille et se caractérise par son faciès désertique.

Pendant le Jurassique, le massif de Tanneron a probablement émergé, du moins temporairement.

Avec le Crétacé supérieur, réapparaissent des plissements, contemporains d'une surrection générale, se traduisant par le rejeu de failles dont certaines sont permienues. Il est donc vraisemblable que les mouvements crétacés ont eu lieu suivant des axes que nous connaissons encore aujourd'hui, plutôt que sous forme d'un bombement régulier à grand rayon de courbure. Il est probable aussi que le massif cristallin, à l'époque crétacée, avait sensiblement les mêmes limites que le massif actuel.

A partir du Crétacé supérieur, la Provence calcaire est soumise à une suite de violents efforts tectoniques mais, dans la région étudiée, déformée seulement par un mouvement d'ensemble n'affectant nettement que la couverture décollée. Ils ont fait rejouer les failles anciennes du socle, mais rares sont les accidents, propres par leur style et leur direction, pouvant être datés de cette période.

Une certaine instabilité tectonique, caractérisée par le rejeu de vieilles failles, paraît être un trait permanent de la région, depuis l'époque reculée où le paroxysme hercynien lui a donné sa structure essentielle.

1.224. Le Tertiaire (Cénozoïque)

Les plissements tertiaires, souvent si intenses en Provence calcaire, se sont produits ici au-dessus de la surface de décollement formée par les carneules de la base du Trias.

Au Pliocène, les formations marines sont en contact direct avec le Permien ou le socle cristallin. La disposition du réseau hydrographique, à cette époque, est à peu près conforme à celle que l'on voit encore maintenant. Ces formations pliocènes ont colmaté des rias profonds. La topographie antépliocène devait être beaucoup plus accusée que celle qui existe de nos jours. En effet, lorsqu'on examine les contacts du Pliocène avec le Permien ou le gneiss, on constate qu'il présente le plus souvent l'allure d'une falaise à peu près verticale.

1.225. Quaternaire

Au Quaternaire, on connaît fort bien trois niveaux d'anciennes plages (phase de comblement) et trois phases de creusement, dont la période actuelle. Celle-ci montre en effet les rivières coulant maintenant sur la roche vive ou entamant les alluvions disposées lors de la période de remblaiement précédente.

1.3. Géologie du site

Au milieu des gneiss du Massif de Tanneron, (figure 2), on trouve un petit synclinal NE-SW de dépôt carbonifère qui donne lieu à une dépression morphologique marquée dans laquelle s'étale le Reyran. Puis, par suite d'une faille, la rivière traverse directement le gneiss, la vallée se rétrécit ; c'est le site. A quelques kilomètres en aval, le Reyran coule de nouveau dans les sédiments primaires : la vallée s'élargit de nouveau.

1.31. Les roches du site

1.311.

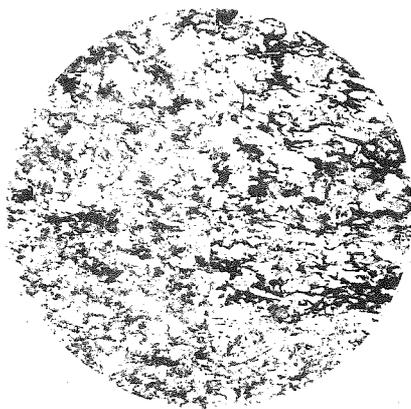
Ce sont communément des gneiss, tantôt ocellés et massifs, tantôt riches en éléments phylliteux, pauvres en feldspaths et à texture schisteuse.

Le passage d'un type à l'autre est progressif. On peut toutefois relever :

1.312.

Rive gauche et en bas de la rive droite, un type de gneiss à répartition uniforme des éléments constitutifs avec orientation des cristaux (figure 3). Cette orientation est parfois assez particulière : en effet les phyllites

Fig. 3 - Gneiss à deux micas à répartition à peu près uniforme



L.P. L.N.

Composition

65% { petits cristaux de quartz de 0,1 à 0,5 mm
{ feldspath potassique assez frais 0,5 mm
{ plagioclases altérés 0,5 à 0,7 mm

35% { biotite très fibreuse en cours d'altération
{ par l'extérieur
{ muscovite fibreuse

apatite, cordiérite, grenat, rutile, calcite
et séricite secondaires

ne sont pas parallèles à un même plan, mais sont seulement orientées suivant une direction commune, ce qui donne à la roche une texture fibreuse sans plans nettement préférentiels. Les fibres ont une direction de 20° à 50° vers le SW (vers l'aval rive droite). Parfois, on peut noter un certain parallélisme entre les phyllites qui crée alors une foliation. Généralement, ces plans de foliation sont très ondulés et n'ont qu'une faible surface ; il peut se former cependant des surfaces plus importantes à la faveur de la structure ondulée de la foliation ; par relais successifs, les foliations élémentaires s'ajoutent, et donnent une foliation globale étendue qui du reste peut n'être que potentielle dans certains cas. En moyenne, la foliation est de 30° à 50° vers le SW (aval rive droite) avec d'assez grandes variations locales.

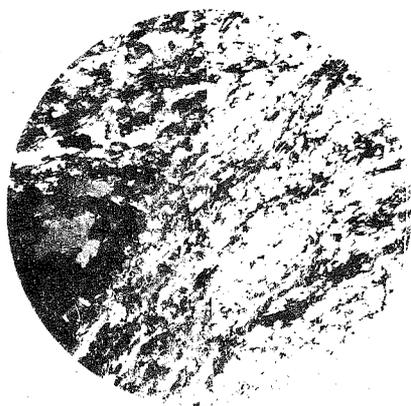
L'analyse microscopique révèle au moins trois types de fissures d'âges différents qui sillonnent les échantillons :

- un réseau ancien cimenté de quartz au centre de la fissure et de séricite sur les deux lèvres.
- un réseau plus jeune très sériciteux, très souvent sécant aux fibres.
- un réseau plus récent, encore ouvert, parfois rempli de calcite.

1.313.

Rive droite à mi-hauteur : gneiss avec des amygdales claires quartzo-feldspathiques de petites dimensions, isolées au milieu d'une masse micacée plus sombre ; l'orientation des cristaux existe également mais ne donne pas lieu à une foliation aussi caractérisée que dans le cas précédent (figure 4).

Fig. 4 - Gneiss à biotite, œillé



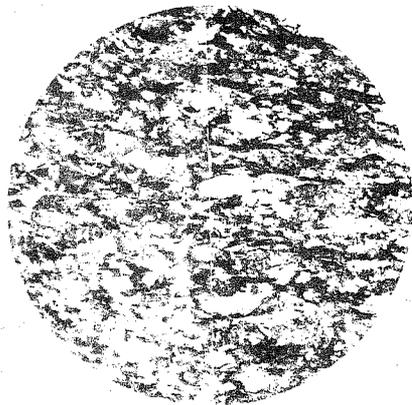
L.P. L.N.

Les minéraux noirs groupés en lits fins enveloppent les groupements plus épais quartzo-feldspathiques. La roche est saine, exempte de remplissage secondaire. Les micro-fissures sont rares.

1.314.

Haut de la rive droite : gneiss où alternent des lits minces d'éléments noirs et d'éléments blancs (figure 5).

Fig. 5 - Gneiss à deux micas finement lité



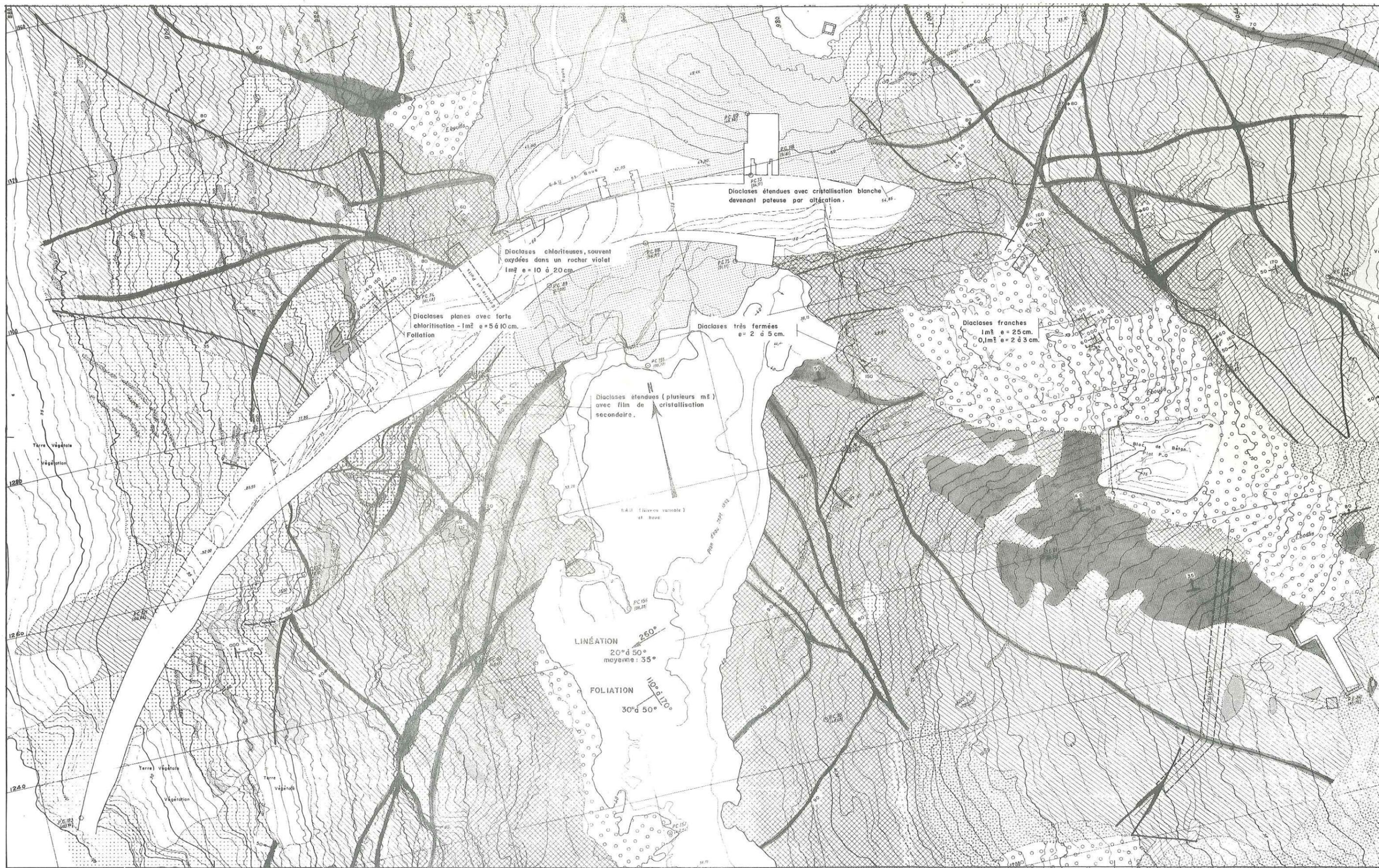
L.P. L.N.

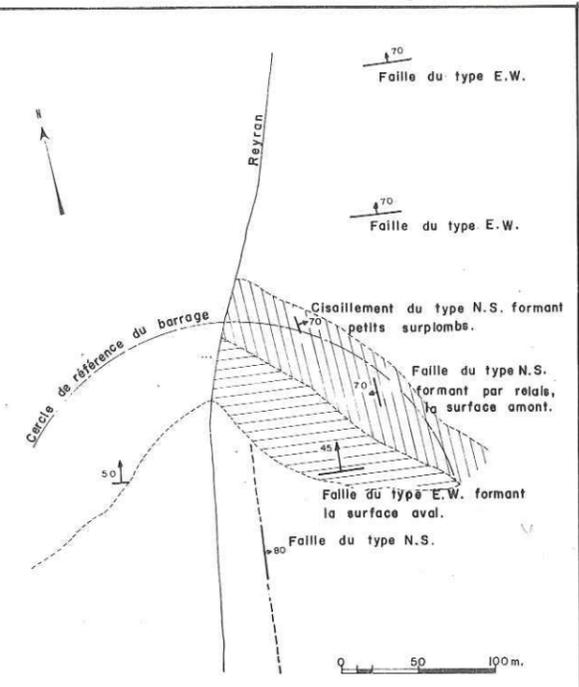
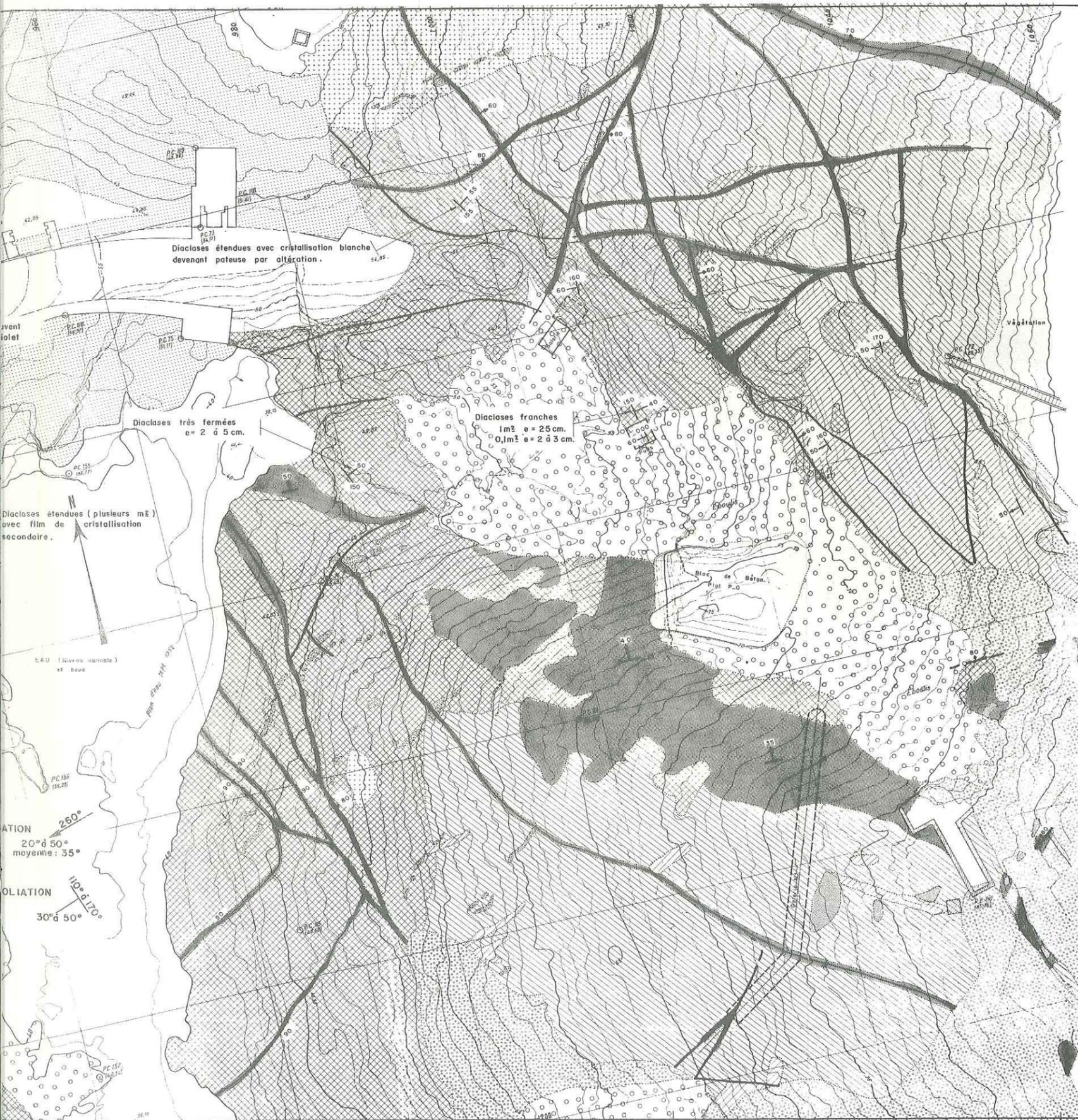
Composition

- 70% { petits cristaux de quartz 0.1 mm
feldspath potassique sain 0.5 mm
plagioclases (anorthite) altérés en
taches laissant les bords du cristal
relativement sains.
- 30% { biotite saine bien orientée,
muscovite rare mais en gros cristaux
- apatite

Composition

Composition identique à celle du gneiss à répartition uniforme. Les recristallisations ne sont importantes que dans la foliation où les cristaux de plagioclases et quelques cristaux de biotite sont enrobés de séricite.





ESQUISSE DES PRINCIPAUX ACCIDENTS DU SITE

LEGENDE

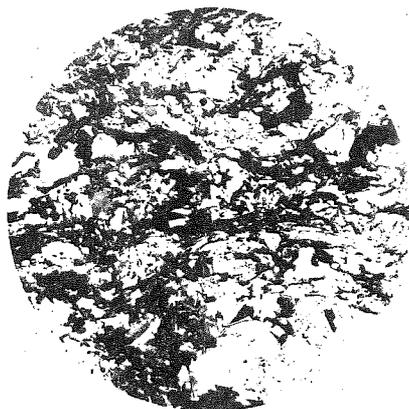
- Eboulis de pierres
- Eboulis terreux
- Alluvions
- Gneiss massif souvent très jointé à lits minéraux phylliteux, oeilé
- Gneiss tectonisé violet à vert, très souvent fibreux.
- Gneiss très divisé avec de nombreuses traces d'oxydation
- Mylonite en placage.
- Brèches plus ou moins fines
- Pegmatite
- Cisaillement ou faille avec remplissage bréchiq
- Cisaillement ou faille franche
- Inclinaison en degrés
- Pendage de direction des horizontales par rapport au nord. inclinaison avec l'horizontale



SITE DU BARRAGE DE MALPASSET
Plan Géologique
fig 7.

Parfois, soit dans les zones de gneiss œillé, soit dans les zones de gneiss à petits lits, on peut observer des gneiss où les micas blancs sont beaucoup plus nombreux (figure 6) et bien visibles. Notons qu'il existe cependant de la muscovite, mais à l'état de petits cristaux, dans tous les gneiss du site.

fig. 6 - Gneiss à muscovite



Composition

55%	Quartz en cristaux de 0.1 mm feldspath potassique sain 0.5 mm plagioclases complètement altérés en cristaux de parfois 1 mm
45%	muscovite en cristaux sains de 1 x 0.1 mm biotite saine rare
	grenat, apatite

L.P.

L.N.

Dans un souci de normalisation, nous avons dans le plan de la figure 7, essayé de cartographier les affleurements en différenciant les natures de gneiss. Toutefois, à l'intérieur de la rive gauche, il n'est pas rare, par exemple, de relever du gneiss lité sur quelques mètres carrés dans un ensemble uniforme.

La figure 8 montre la rive droite où les limites d'affleurement des différents types de gneiss cités précédemment peuvent être indiquées grossièrement. On notera l'important changement d'allure des diaclases.

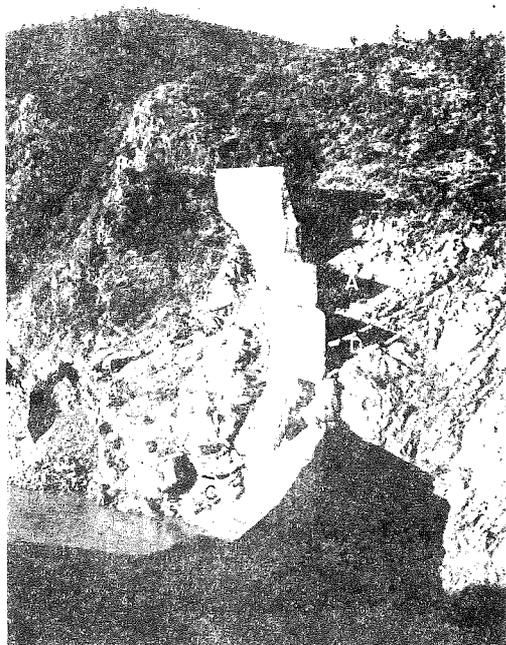


fig. 8 - Zone A : gneiss massif à biotite. Systèmes de diaclases étendues et planes. Foliation inexistante à petite échelle.

Zone B : gneiss à biotite fibreux. La division du rocher suivant la foliation est de l'ordre du centimètre.

Des cassures perpendiculaires favorisent des changements brusques d'orientation de la foliation.

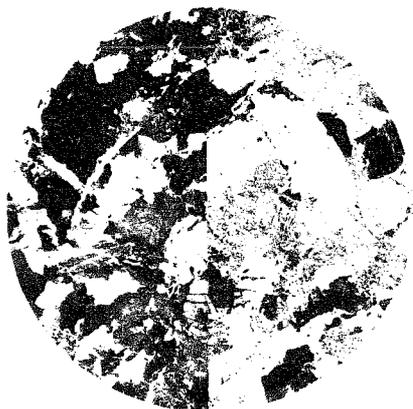
Zone C : Gneiss à biotite légèrement folié. Système de diaclases planes à tendance amont.

Zone D : Gneiss très micacé extrêmement divisé (morceaux souvent inférieurs au cm³)

Ces gneiss sont injectés d'une pegmatite à feldspaths roses (figure 9) qui est très souvent concordante avec le gneiss ; les lits micacés de celui-ci peuvent se poursuivre dans la pegmatite dont les contours sont en général très nets. Les formes que prennent les amas de pegmatite sont irrégulières, dues en partie au type de mise en place, et en partie aux failles qui les coupent et dont les rejets, lorsqu'on peut les apprécier, sont de quelques décimètres à quelques mètres. Il semble que la formation de ces pegmatites se soit poursuivie après le jeu de certaines, au moins, de ces failles.

fig. 9 - Pegmatite

Composition



- feldspath potassique rose très légèrement altéré ; dimension moyenne des cristaux 2 à 5 mm
- petits cristaux de quartz indentés très rares
- mica blanc en taches ou en phénocristaux gigantesques
- plagioclases sodiques rares
- calcite en grands cristaux.

L.P.

L.N.

1.32. - Altération et structure

La longue histoire du massif n'a pas été sans affecter sa structure et favoriser de nombreuses formes d'altération.

Nous analyserons les altérations de la matière et la fracturation du massif divisé par de nombreuses discontinuités mécaniques.

1.321. - Altération de la matrice

L'altération des cristaux de biotite en chlorite est un phénomène général, de même que la transformation quasi-totale des plagioclases en séricite ou en petites paillettes d'hydro-micas. Ces transformations sont classiques, la première tend à donner au rocher une couleur verdâtre.

Certaines petites déformations de la roche, soit dans la foliation, soit sécante, montrent des recrystallisations de séricite. Il est probable que ces cristallisations n'ont pu avoir lieu que dans certaines conditions car d'autres témoins de déformations en sont exempts.

D'autre part, des cristallisations de pyrite et de calcite montrent que des circulations hydrothermales ont eu lieu également ultérieurement.

En plus des altérations précédentes que l'on trouve très communément sur d'autres types de roches, il est intéressant d'en noter une autre plus rare : la couleur violette ou lie de vin qui domine un peu partout, surtout dans les zones où le gneiss est très fibreux. Cette coloration fait penser à une altération climatique qui serait à relier avec le fait que dès le Crétacé et même probablement dès le Jurassique, le massif avait déjà les mêmes

limites qu'actuellement et aurait ainsi subi, en plus du tectonisme, l'influence de nombreux cycles climatiques, jusqu'au Pliocène où il a été de nouveau immergé.

L'examen pétrographique montre que les échantillons pris rive gauche dans les zones où la coloration violette est la plus intense, sont composés de cristaux très grossièrement orientés :

- de quartz (rare), de feldspath potassique encore clair et de plagioclases complètement damouritisés mais ayant un aspect normal.

- de micas, principalement biotites, dont l'altération est très différente de celles des mêmes micas noirs de la rive droite. Cette altération est superficielle et se fait à la faveur de micro-fissures ouvertes existant tout autour des cristaux de biotite, parfois de chlorite. Il y a production d'une fine poussière opaque d'oxydes qui soulignent la surface des paillettes de micas et parfois pénètre quelques clivages. En lumière réfléchie, cette poussière est colorée en rouge lie de vin.

On aperçoit assez fréquemment, en plus de cette poussière non identifiable, des aiguilles de 0.1 x 30 microns également rouges en lumière réfléchie, de couleur douteuse en lumière naturelle, qui sont probablement du rutile. Les aiguilles sont souvent centrées en petites étoiles irrégulières autour d'une tache d'oxyde.

Parfois, les zones particulièrement altérées des plagioclases sont également pénétrées de la même poussière d'oxyde.

D'autre part, les micro-discontinuités, le long des fibres et sécantes à elles, sont incomplètement colmatées par une cristallisation de séricite qui, souvent, est décomposée en argile non identifiable au microscope polarisant.

1.322. - Discontinuités mécaniques

L'examen du site montre qu'il existe plusieurs types de plans de faiblesse :

a) - les micro-discontinuités

A l'échelle de l'échantillon de quelques cm³, on peut observer des réseaux de fissure de quelques microns d'épaisseur dont les caractéristiques seront décrites en détail au chapitre B II.3, relatif à l'examen microscopique des lames minces.

Les micro-discontinuités empruntent généralement les alignements des minéraux, mais des ouvertures sécantes sont très fréquentes. Souvent, ces micro-discontinuités et surtout les sécantes sont remplies d'un film blanchâtre, pâteux après saturation d'eau, dont l'analyse a montré qu'il était composé principalement d'argiles du type interstratifié illite-montmorillonite correspondant à la décomposition de la séricite. Ce remplissage est surtout important dans le gneiss très tectonisé de la rive gauche à texture fibreuse et coloration violette. En lame mince, ces matériaux argileux sont bien visibles. La nature du minéral argileux produit permet de dire que la transformation s'est réalisée en milieu peu drainé.

b) les diaclases

Des réseaux de diaclases sont bien visibles sur le site. Ils ont deux aspects :

- soit des diaclases de petites surfaces souvent non planes et de directions diverses
- soit des séries bien parallèles de diaclases étendues (figure 10) formant des réseaux locaux liés aux différents types de roches.

Les diaclases sont ou franches, les lèvres directement en contact, ou enduites de chlorites verdâtres ou du film argileux blanchâtre qui revêt presque systématiquement certaines micro-discontinuités.

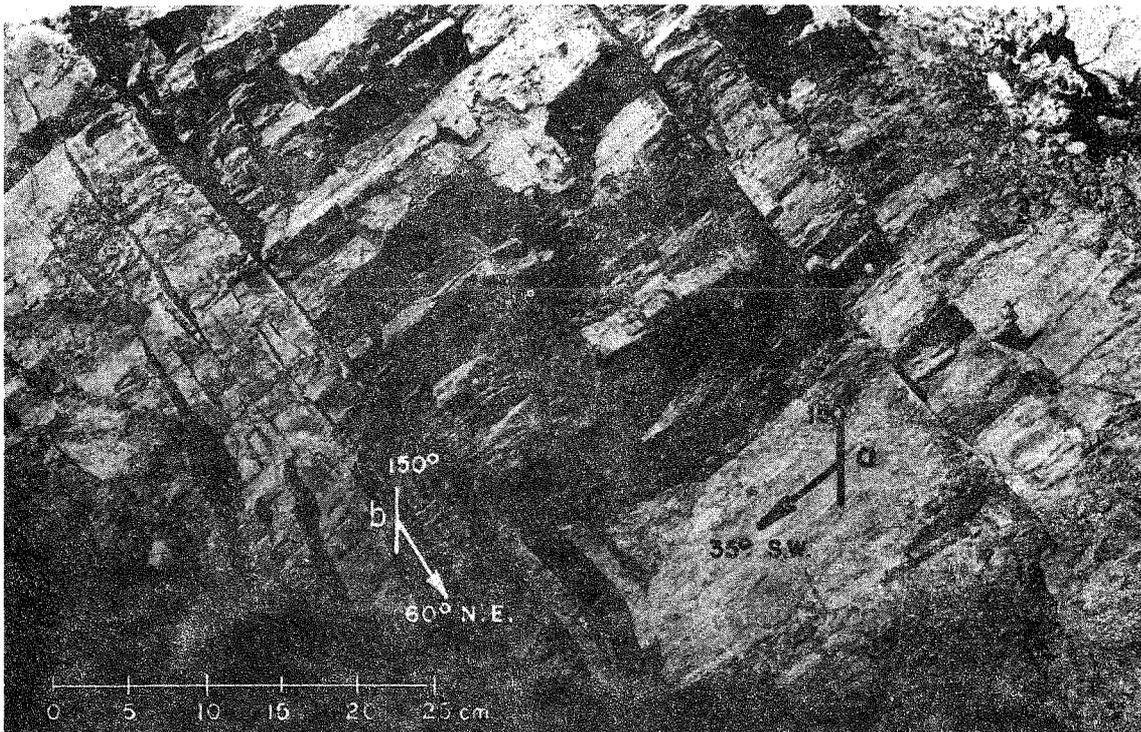
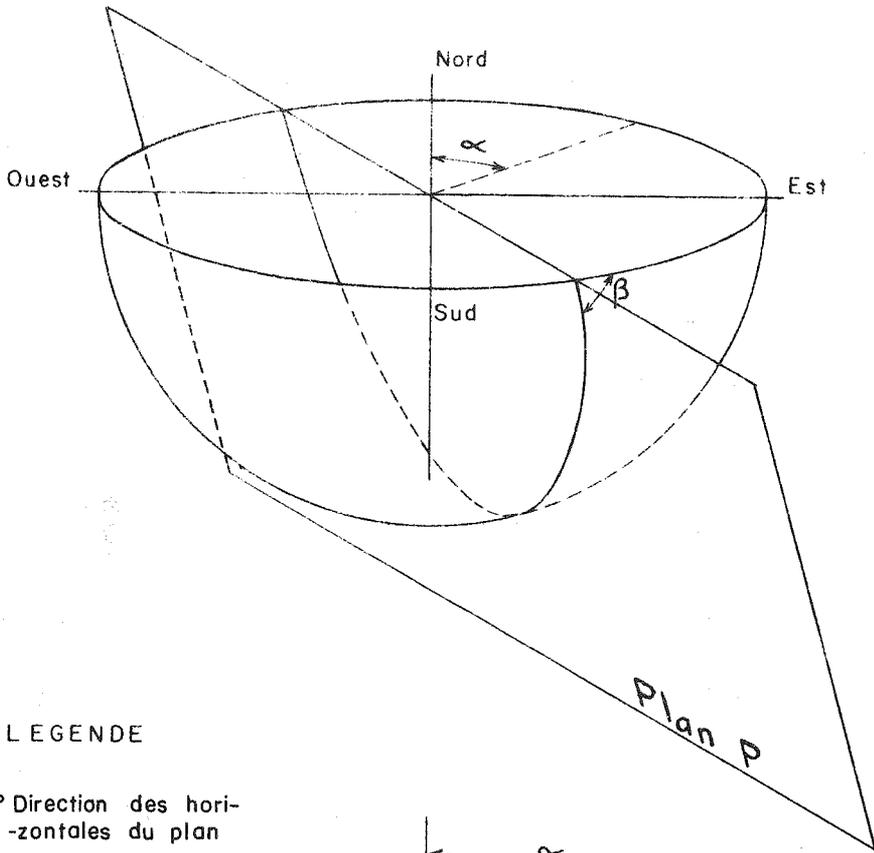


Fig. 10 - Vue du rocher en amont immédiat de l'ouvrage rive gauche à la cote 55.

Le gneiss a un aspect massif. Sa texture est fibreuse mais de petites surfaces soyeuses forment une pseudo-foliation caractéristique (a).

De grandes diaclases (b) très nettes, aux lèvres parfois légèrement soulignées de chlorites, découpent le massif à cet endroit. Les écartements entre diaclases sont de 5 à 40 cm.

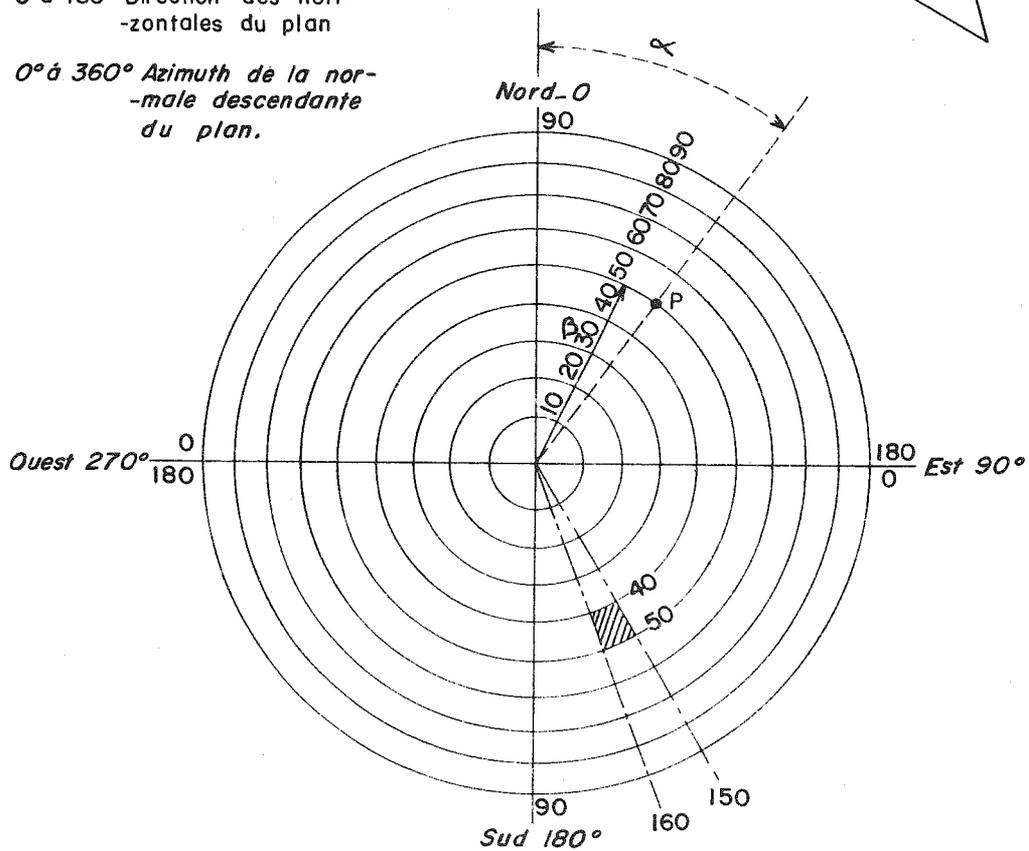
Dans un cas, comme dans l'autre, leur étude est bien simplifiée par la statistique. Nous aborderons au chapitre B.I l'étude des procédés statistiques et ne signalerons maintenant que les résultats globaux.



LEGENDE

0 à 180° Direction des horizontales du plan

0° à 360° Azimuth de la normale descendante du plan.



Le graphique de la figure 12 montre le résultat de l'étude statistique des orientations des discontinuités de très petites dimensions ; nous avons indiqué l'emplacement des mesures sur le site et les écartements moyens entre discontinuités de même catégorie : à cette échelle de maille, il s'agit déjà presque de fissuration. En effet, il est très difficile de déceler des systèmes de directions bien définies : en un point, les petits plans sont bien parallèles mais leur direction de parallélisme ne se retrouve pas en un autre point. D'autre part, il n'est pas rare de mesurer des écartements inférieurs aux 2 à 5 cm moyens signalés. On remarquera toutefois que tout le quart SW du graphique est certainement lié à la foliation qui, à cette échelle, est très influente.

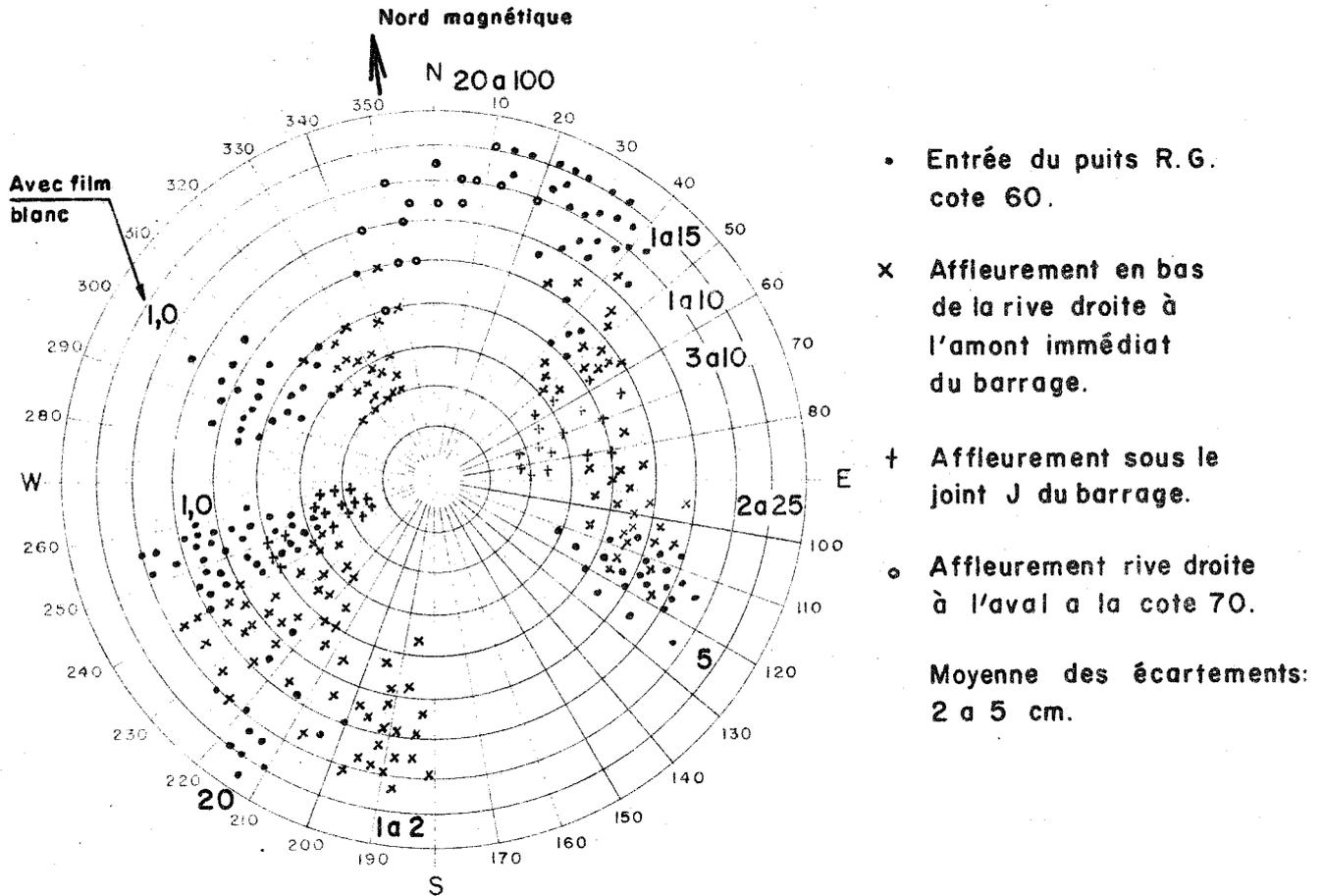


Fig. 12 - Relevé statistique local des petites discontinuités avec leur maille moyenne en cm.

Le graphique de la figure 13 montre le résultat de l'étude statistique de toutes les discontinuités de faible étendue. Les directions principales sont :

- la foliation dans le quart SW (pendages les plus fréquents 50° et 45°),
- dans le quart NE, un réseau dont le pendage le plus fréquent est 45° et les horizontales 150° à 160° par rapport au Nord.

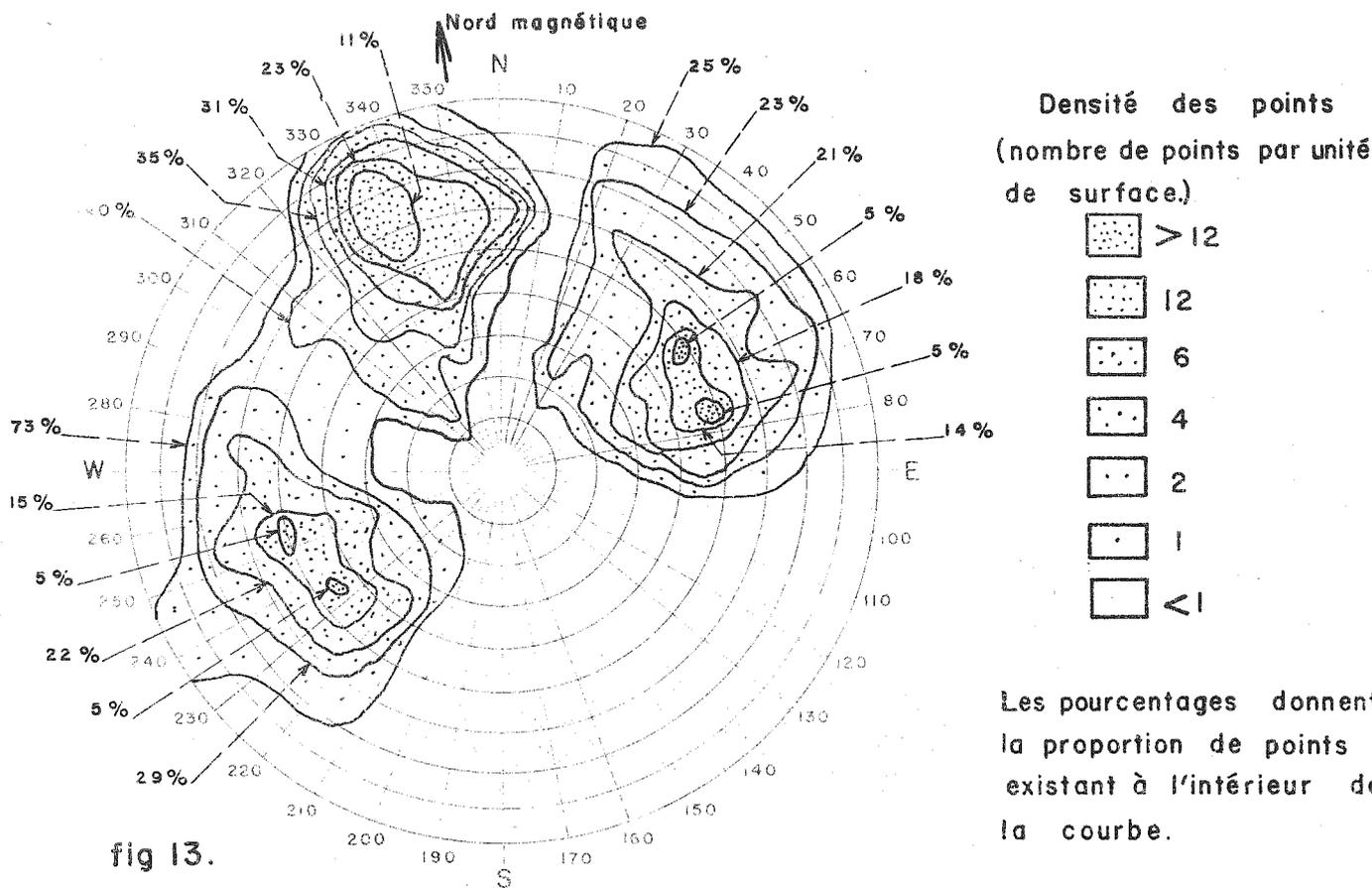


Fig. 13 - Statistique générale des petites discontinuités -

- dans le quart NW, un réseau dont le pendage le plus fréquent est 60° à 70° et les horizontales 65° par rapport au Nord.

Sur le plan de la planche 4, nous avons, là où cela était possible, indiqué quelles sont les caractéristiques locales d'un réseau défini de diaclases tiré de la statistique.

c) - les cisaillements

Outre les discontinuités précédentes, le site est découpé par des cisaillements où l'on peut noter des traces de mouvement. Nous les distinguerons des failles simplement parce que leur extension est réduite à quelques m².

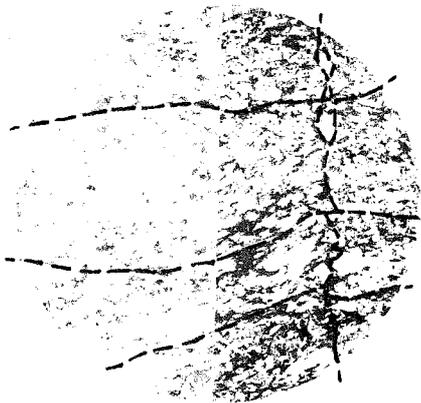
Ces cisaillements et également les failles sont caractérisées par :

- une altération des épontes qui n'existait pas dans le cas de simples diaclases.
- un remplissage de brèche ou de mylonite qui n'existait pas non plus dans le cas de simples diaclases.

Les épontes

Parfois à quelques dizaines de centimètres de la lèvre du cisaillement ou de la faille, on constate systématiquement une division des fibres de la roche et la présence de fissures sécantes qui parfois décrochent légèrement les lits de cristaux alignés (figure 14).

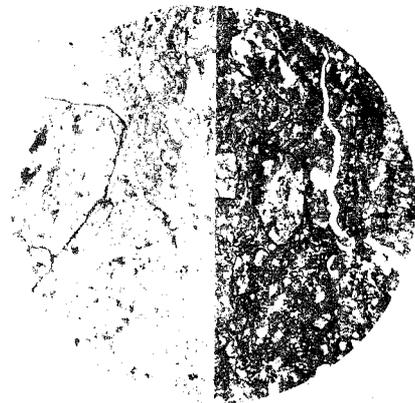
Cette division peut être parfois très intense mais conserve toujours la structure du gneiss.



LP x 20 LN

Le remplissage

Sans transition, par une lèvre nette, on passe à une zone de matériaux broyés où aucune structure n'est plus visible (figure 15). Ce remplissage est une mylonite formée d'une pâte microcristalline de gneiss où les phyllites originelles sont complètement transformées en minéraux chloriteux et de noyaux de 1 à 5 mm de débris très arrondis de gneiss.



LP x 20 LN

fig. 14 - Lèvres d'une faille

gneiss à biotite.

La roche est divisée par des fissures :
soit dans la foliation (tous les 1 à 2 mm)
soit sécantes à la foliation tous les 10 mm

Les lits sont parfois décalés par une fracture plus importante, irrégulière, se ramifiant, cimentée de séricite, de quartz broyé et de calcite.

fig. 15 - Remplissage de faille

noyaux arrondis quartzo-feldspathiques noyés dans une pâte formée de poussière de :

- quartz
- feldspaths très nombreux complètement altérés
- calcite secondaire
- séricite englobant des cristaux un peu plus importants de feldspaths

le ciment est parfois argileux

Cette mylonite forme une sorte de plaquage de 1 à 3 cm où parfois une structure lenticulaire imbriquée est bien visible (figure 16),

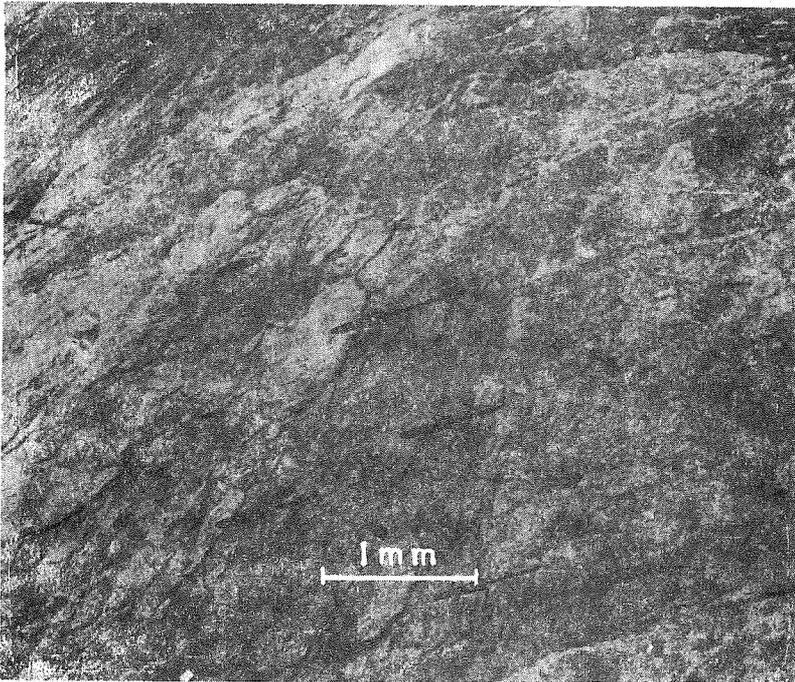


Fig. 16 - Détail de la face amont du dièdre rive gauche à la cote 75

le gneiss sous-jacent est recouvert d'un placage lenticulaire de mylonite

L'analyse statistique des directions et écartements des cisaillements fait ressortir leur grande complexité. On retrouve toutefois (figure 17) les directions générales déjà observées lors de l'étude des diaclases.

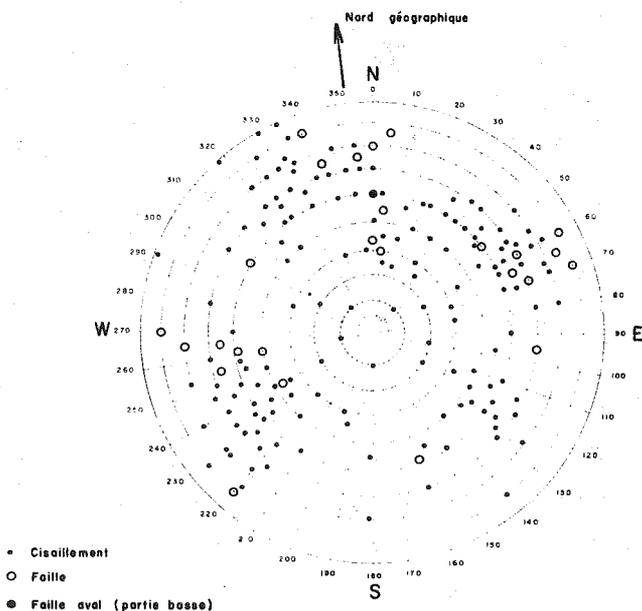


Fig. 17 - Statistique des orientations des failles et cisaillements.

d) Les failles

Au-delà d'une certaine extension ou d'un certain rejet, nous convenons d'appeler faille un accident du type précédent. On peut également observer que les très grands accidents présentent un remplissage plus grossier que celui des simples cisaillements. Au lieu d'une mylonite, c'est une brèche qui peut atteindre des épaisseurs de plusieurs dizaines de cm, dont les éléments anguleux sont formés de gneiss et le ciment d'une pâte argileuse produite par le broyage et l'altération du gneiss.

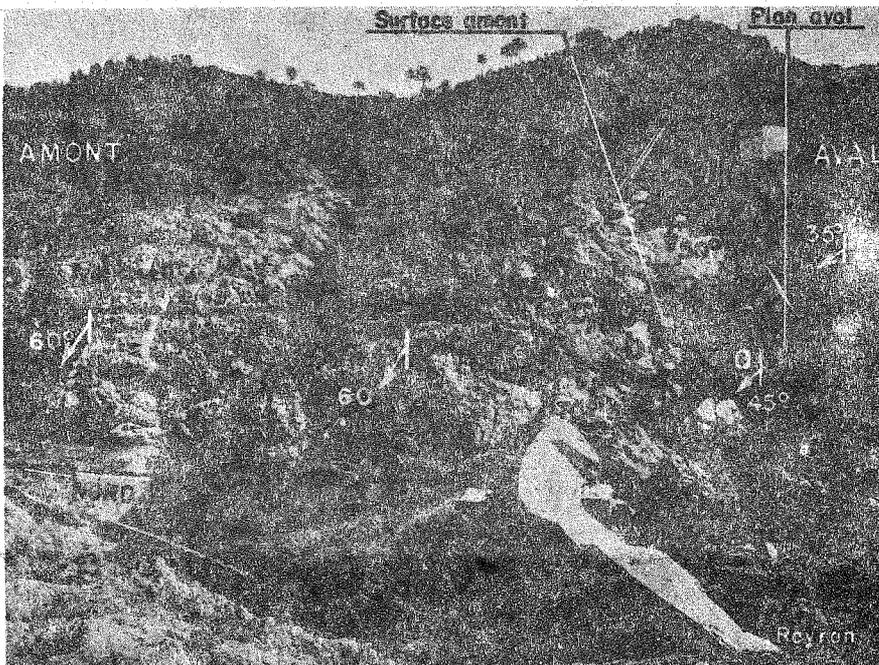
L'étude statistique (figure 17) fait ressortir parmi les nombreuses directions relevées, trois sortes de failles reconnaissables rive gauche (figure 18).

- des failles de grandes extension, planes, avec remplissage bréchiq ue important, orientées E-W pendant de 50° à 70° Nord en moyenne. Nous les avons mentionnées dans l'histoire géologique du massif.

- des failles plus anciennes que les précédentes, également mentionnées, très ondulées qui ont été produites par le jeu des surfaces de moindre résistance liée à la foliation. Or, cette foliation a une structure spéciale due à l'ondulation des lits de minéraux orientés : les failles qui ont joué le long de ces lits, sont, de même, ondulées et produisent souvent un découpage de lentilles plates imbriquées, d'une épaisseur de 2 à 5 m et d'une extension d'une dizaine de mètres dont les surfaces de contact sont soulignées de mylonite et arrivent à se relayer en ondulant, le pendage variant parfois de 20° . Ce phénomène est très important rive gauche, dans la moitié supérieure de la rive.

- des failles souvent ramifiées, très irrégulières, mais soulignées par un épais remplissage de mylonite grossière qui ont un pendage de 50° à 80° ENE amont.

Fig. 18 - Rive gauche



On remarquera :

- le plan aval du dièdre qui est une faille de la famille des 2 accidents indiqués en amont.
- la surface amont, coupée par des accidents (pendage 70°), formée de surfaces élémentaires à pendage 50° .

e) Cas particuliers

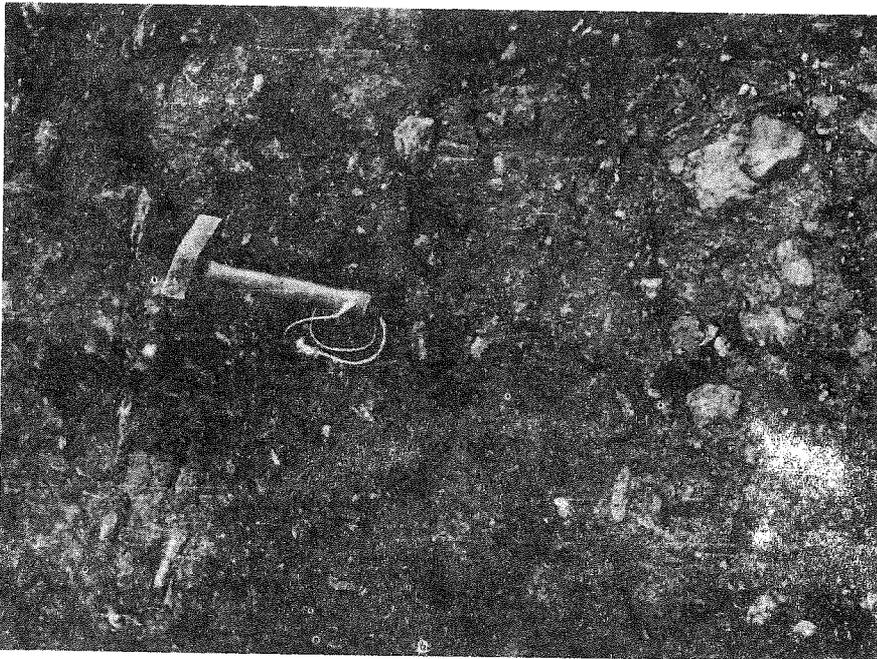
Parmi ces failles, il en est deux qui méritent une description particulière. Ce sont celles qui limitent l'actuel dièdre de la rive gauche.

La surface aval

C'est une faille du type E-W plus récente que les accidents N-S ; elle coupe entièrement la rive gauche et se retrouve rive droite sur toute la hauteur. La direction de cette faille est bien constante, mais son pendage varie quelque peu, passant de 35° à 70°. On retrouve tant à l'amont qu'à l'aval de telles surfaces tous les 100 à 200 m.

Le remplissage (figure 19) est constitué par une brèche à éléments gneissiques grossiers (5 à 10 cm) et ciment consolidé de quartz et argile (illite et micas hydratés). L'examen de détail du remplissage montre une certaine hétérogénéité ; la partie aval est une brèche dure verdâtre séparée de la partie amont, qui est une brèche plus argileuse, par une pellicule formée de lamelles de mica blanc concentré sur un ou deux millimètres. Ce mica est très altéré, son toucher est soyeux. On conçoit que le cisaillement d'une telle surface soit facilité par cet aspect particulier.

L'éponte aval de cette faille, visible rive gauche, et les épontes visibles rive droite sont très affectées. Bien qu'ayant gardé sa structure, le gneiss est extrêmement divisé par des fissures ouvertes (écartement 1 à 2 cm) sur 1 ou 2 mètres d'épaisseur.



La surface amont

Fig. 19 - détail a de la photo 18

surface du plan aval formée de brèche monogénique de faille

Certains éléments peuvent avoir 15 cm

C'est un accident du type N-S ancien et qui a dû rejouer de nombreuses fois. Il est produit par le cisaillement de plusieurs surfaces se relayant. Il est coupé par ou coupe des petits cisaillements transversaux.

Le remplissage (figure 20) est une mylonite formée de galettes imbriquées, très dure à sec, pâteuse après saturation à l'eau, dont l'épaisseur peut atteindre 10 cm ; les épontes sont extrêmement diaclasées (écartement de 1 à 2 cm) bien que le gneiss ait gardé sa structure.

Cet accident vient buter sous les fondations du barrage sur la faille E-W aval, dont le rejet est inconnu.

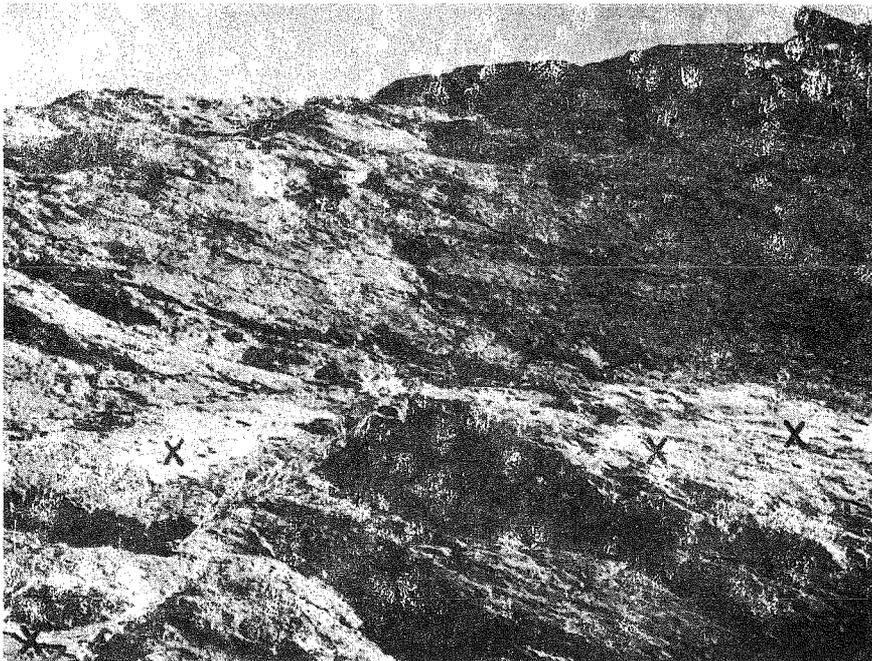


Fig. 20 - détail b de la photo 18

une partie de la surface amont. C'est un accident qui a cisailé la foliation. Les lèvres sont recouvertes de plaquettes de mylonite. Les parties blanches (x) sont les restes du coulis d'injection de collage.

1.4. Résumé

L'analyse détaillée du site permet déjà de faire ressortir quelques points importants que nous étudierons au cours des chapitres suivants.

L'instabilité tectonique, caractérisée par le rejeu de vieilles failles, semble être le trait principal ayant donné à la structure du massif son caractère définitif depuis l'époque reculée où le paroxysme hercynien a modelé ses caractères essentiels.

Il n'est pas dans notre intention d'aborder le problème mécanique des stabilités des rives ; signalons seulement que cette question a été examinée et semble donner une explication satisfaisante des phénomènes de rupture (P. LONDE 1965).

Les rôles du type et de la géométrie des accidents sont primordiaux ; en effet, le rejeu de vieilles failles a favorisé une nature spéciale de remplissage et a isolé des compartiments caractéristiques dont la nature elle-même est à examiner de très près. La division de la matière qui résulte des efforts tectoniques successifs n'a sans doute pas détruit la structure de la matrice, mais a produit une série de micro-déformations qui ont pu changer les caractéristiques de la roche, en particulier modifier son comportement vis à vis de l'eau d'infiltration.

La longue émergence du massif a produit une altération profonde que l'enfouissement postérieur n'a pas masqué. Il en résulte certainement un certain type d'altérabilité qu'il faudra examiner.

2. SITE DU BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD

Après l'étude d'un site de barrage construit puis ruiné par une rupture de fondation, il est intéressant d'envisager celle d'un site vierge où une grande voûte est projetée ; les travaux de reconnaissances du site du barrage de Hendrik Verwoerd ont été exécutés en 1963, 1964 et 1965 ; le début des travaux de construction a eu lieu à la fin de l'année 1966.

Le site se trouve en République d'Afrique du Sud, sur la rivière Orange, à 200 km après sa sortie des montagnes du Basutoland. La rivière coule alors dans une région de plaines surmontées de plateaux doléritiques aux profils caractéristiques.

2.1. Conditions géologiques générales

Le tableau ci-dessous donne les termes de géologie et de lithographie générales utilisés dans la description géologique qui suit :

ERES Récent Quaternaire	PERIODES	FORMATIONS	TECTONIQUE	AGE (millions d'années)
Tertiaire (Cénozoïque)		très petites formations	soulèvement général de l'Afrique	60
Secondaire (Mésozoïque)	Crétacé	cheminées de kimberlite, Uitenage	failles	130
	Jurassique	<u>dolérites</u>		
	Trias	Stormberg <u>Beaufort</u>) Karoo		
Primaire (Paléozoïque)	Permien	Ecca	plissement, affaïssement du Sud	225
	Carbonifère	Dwyka		300
	Dévonien	Cape		350
	Silurien	Witwatersrand		480

2. 11. Histoire géologique de l'Afrique du Sud (DUTOIT A. L. 1954)

On connaît très peu de choses sur l'ancien socle pré-silurien. Au Silurien, les sédiments quartzitiques et aurifères du Witwatersrand ont été déposés dans une mer probablement peu profonde. Après quelques mouvements tectoniques marqués et quelques dépôts de sédiments, un énorme magma intrusif se met en place, - le complexe igné du Bushveld - suivi par une période de dénudation avec formation du système Waterberg. Ces terrains ont été ensuite plissés et injectés de matériel éruptif tout à fait à la fin de la période silurienne.

Pendant la période dévonienne, l'extrémité sud du continent qui existait alors s'effondre et le matériel déposé donne la formation nommée "Transgression du Cap". Pendant la période carbonifère, l'effondrement du continent s'accélère avec, simultanément, l'apparition des glaces.

Les silts morainiques du Dwyka constituent le commencement du système du Karroo ; ils ont été déposés au voisinage de l'actuelle province du Cap et du Natal pendant que l'actuelle province du Transvaal restait émergée. Alors que l'effondrement continuait, la mer gagna encore plus vers le Nord et les sédiments de l'Ecce ont été déposés. La période suivante a reçu le nom de Beaufort. Au Beaufort inférieur, le faciès est aride avec productions de matériaux fins, sable et silts ; le climat devient humide au Beaufort moyen, puis très humide au Beaufort supérieur. Des boues et sables fins sont alors déposés sur une énorme épaisseur. Des mouvements tectoniques ont déjà commencé avant la fin de la période de Beaufort.

Au commencement du Trias, les formations existant dans le Sud ont été soulevées et le Karroo lui-même découvert et érodé. La seule petite dépression restante étant remplie avec les sédiments formant la série Stormberg. Le Trias se termine avec une période de dessiccation et d'intense activité volcanique durant laquelle des coulées de lave basique ont lieu (elles forment l'actuel Basutoland). Des dolérites sont injectées dans les sédiments du Karroo dont l'épaisseur peut être estimée à quelques 7 000 m, l'épaisseur du Beaufort, lui-même étant à peu près de 3 000 m. Les dolérites ne vont pas au-delà d'une certaine limite sud (planche 12) mais sont extrêmement importantes dans le cœur du massif.

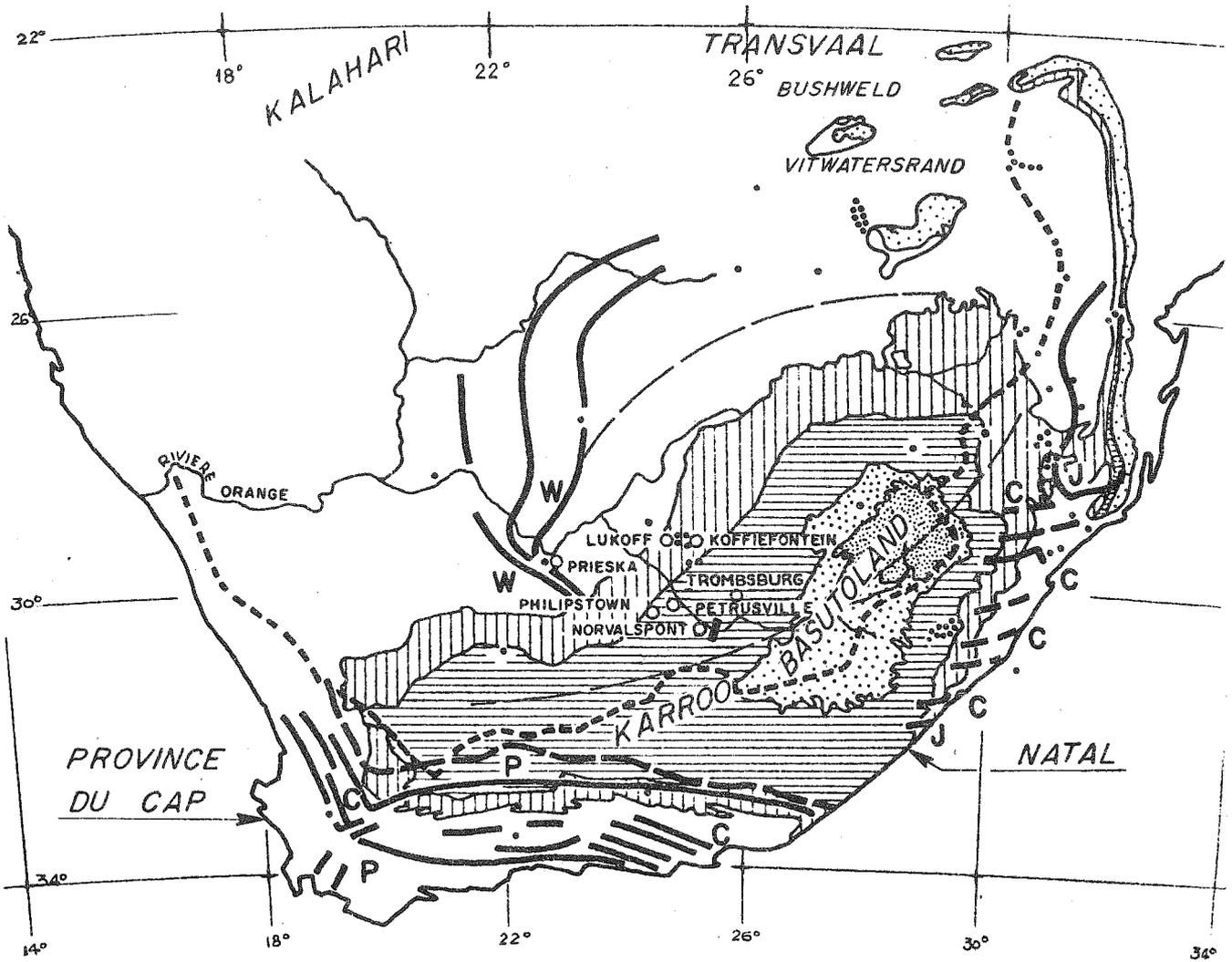
Les intrusions de dolérites se présentent sous la forme de dykes subverticaux et très étroits ou au contraire de sills horizontaux ou très légèrement inclinés avec d'assez grandes variations d'épaisseur ; on peut toutefois, pour les caractériser, utiliser la notion de pendage. Cette injection de lave fut accompagnée par un plissement qui a dessiné déjà l'actuelle morphologie de l'Afrique du Sud. Ces plissements ont reçu le nom de "Plissement du Cap".

Pendant le Jurassique, a eu lieu une longue érosion au cours d'une période assez sèche qui a duré jusqu'au Crétacé inférieur. Pendant le Crétacé moyen, des mouvements tectoniques forment des plissements et des failles qui empruntent principalement les vieilles cassures triasiques. Ces mouvements achèvent de donner à l'Afrique du Sud sa forme actuelle. Pendant ce temps, l'Océan qui l'entoure commence à s'approfondir. A la fin du Crétacé, apparaissent les cheminées de Kimberlites.

Le Cénozoïque est une période de pénéplation suivie par l'exhaussement périphérique qui laisse au centre de l'Afrique un bassin fermé formant le désert du Kalahari dans lequel se dépose du sable. L'exhaussement continu encore actuellement.

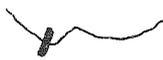
2. 12. Géologie régionale

Le site d'Hendrik Verwoerd (planche 12) est situé dans des dolérites injectées dans les sédiments du Beaufort qui forment un étage du système du Karroo. Ces sédiments sont estimés, aux environs du site, avoir une épaisseur d'environ 1000 m ; ils consistent en des grès, des argilites litées et des argilites massives pâles, feldspathiques.



SYSTEME DU KARROO

- GRAND ESCARPEMENT
- LIMITE SUD DES DOLERITES DU KARROO.
- EPICENTRE DE TREMBLEMENTS DE TERRE.
- FLEXURE TERTIAIRE.
- W MOUVEMENTS TECTONIQUES POST WATERBERG
- P MOUVEMENTS TECTONIQUES PERMO TRIASSIQUE.
- J MOUVEMENTS TECTONIQUES JURASSIQUES.
- C MOUVEMENTS TECTONIQUES CRETACE.
- [Cross-hatched pattern] SERIE VOLCANIQUE DU STORMBERG
- [Dotted pattern] SERIE STORMBERG
- [Horizontal lines pattern] SERIE DU BEAUFORT
- [Vertical lines pattern] SERIE DE L'ECCA

 BARRAGE D'HENDRIK VERWOERD

Alors que la partie Sud du Karroo était sujette à un tectonisme assez sévère, la partie NW comprenant le site est beaucoup moins perturbée et affectée seulement d'une rotation due à l'élévation de la partie SSE de la contrée pendant la période tertiaire. On peut observer seulement quelques rares grandes failles et des cisaillements de direction ENE-WSW dus au rejeu de vieux accidents profonds datant de la fin de la période du Karroo et affectant le socle.

2.121. Les roches en place

Le site est constitué par les sédiments du Beaufort inférieur et moyen et par les dolérites intrusives.

a) Les sédiments

Les sédiments se présentent en bandes alternées sableuses ou phylliteuses ; le matériel moyen est formé par une argilite litée parfois gréseuse, grisâtre, avec une stratification subhorizontale. Quelquefois, cette argilite est interstratifiée avec des lentilles sableuses, de quelques mètres seulement d'épaisseur, qui ne s'étendent que sur quelques dizaines de mètres avant de se pincer. L'analyse minéralogique d'échantillons de sédiments montre la présence de :

- quartz (jusqu'à parfois 75%)
- chlorite
- illite
- eau de constitution (parfois 2%)
- carbonate (Ca et Mg)

Exposés à l'air, ces sédiments perdent leur cohésion par divisions successives en petites paillettes conchoïdales. Ce processus est accéléré par une alternance de cycles de dessiccation et d'humidification. Cette décomposition est purement mécanique ; plus tard, les particules d'argilite tournent, par décomposition chimique, en un matériel argileux.

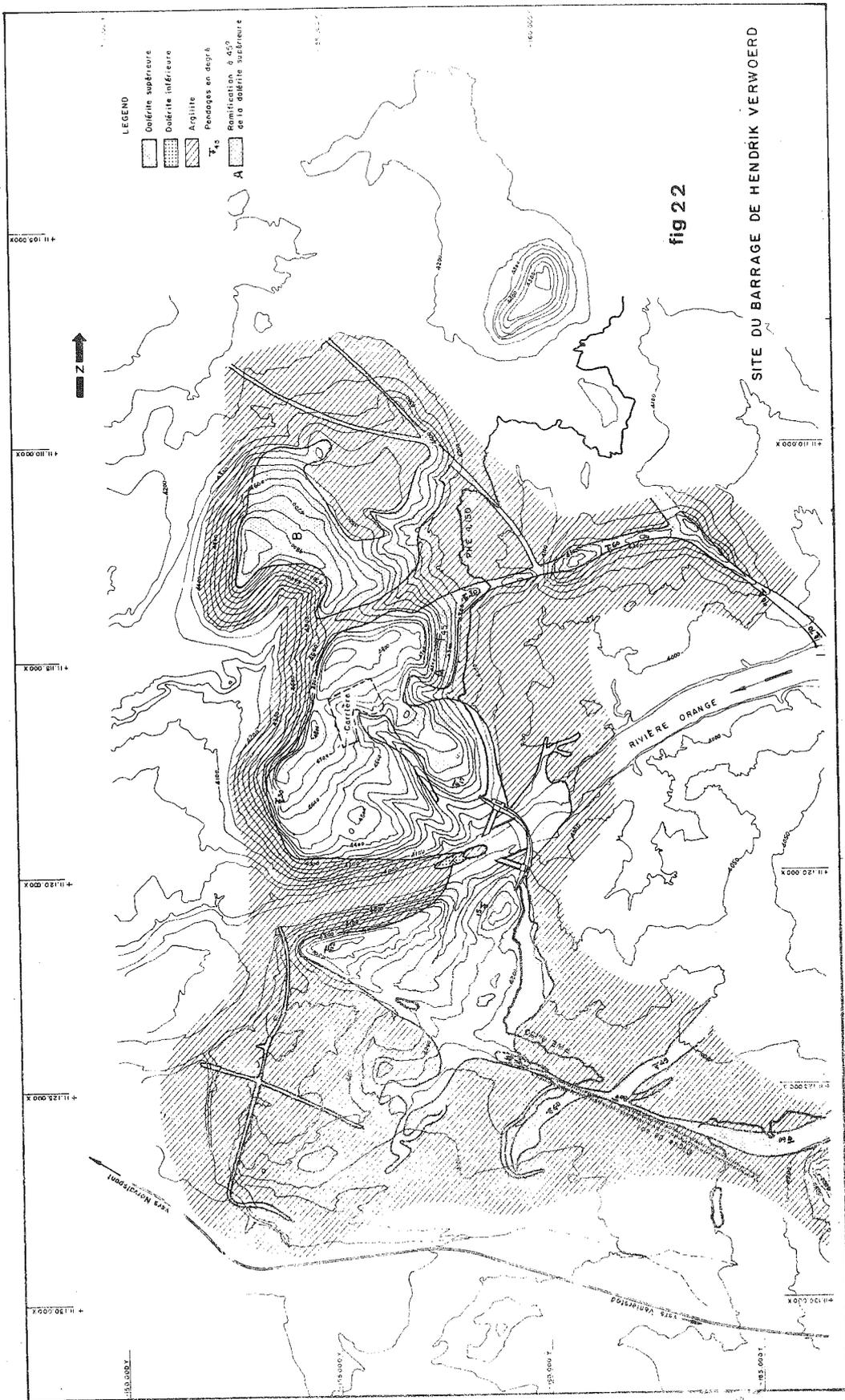
L'argilite est en général un matériel assez mou, parfois elle est poreuse dans ses parties sableuses. Au contact avec les dolérites, elle a été durcie et transformée en matériel extrêmement dur, à cassure conchoïdale appelée lydianite par les géologues locaux. Cette zone de transformation existe sur quelques mètres, parfois même sur une trentaine de mètres. On constate en général que les sédiments en dessous d'un sill de dolérite sont beaucoup plus transformés par cuisson que ceux se trouvant au-dessus.

b) Les dolérites

Les dolérites sont généralement assez foncées, à grains moyens ; leur densité est comprise entre 2,90 et 3,05. Elles contiennent des minéraux calciques et ferrugineux qui favorisent l'altération.

Dans les environs du site (figure 22), la formation qui prédomine est un massif de dolérite formant un large sill avec un pendage de 10° à 15° SSE. L'épaisseur maximale de ce sill est de 80 à 100 m ; c'est lui qui supportera les fondations du barrage et dans lequel est implantée la carrière. Ce sill est en relation avec deux dykes :

- un au Sud, qui agit comme une frontière Sud pour le sill précédent ; il date vraisemblablement de la même époque ; la dolérite est de même nature et son pendage est très redressé (86° vers le Nord).
- le deuxième, qui constitue la frontière Nord du sill de dolérite, date également de la même époque ; la dolérite est de même nature pétrographique ; son pendage est très redressé vers le Sud.



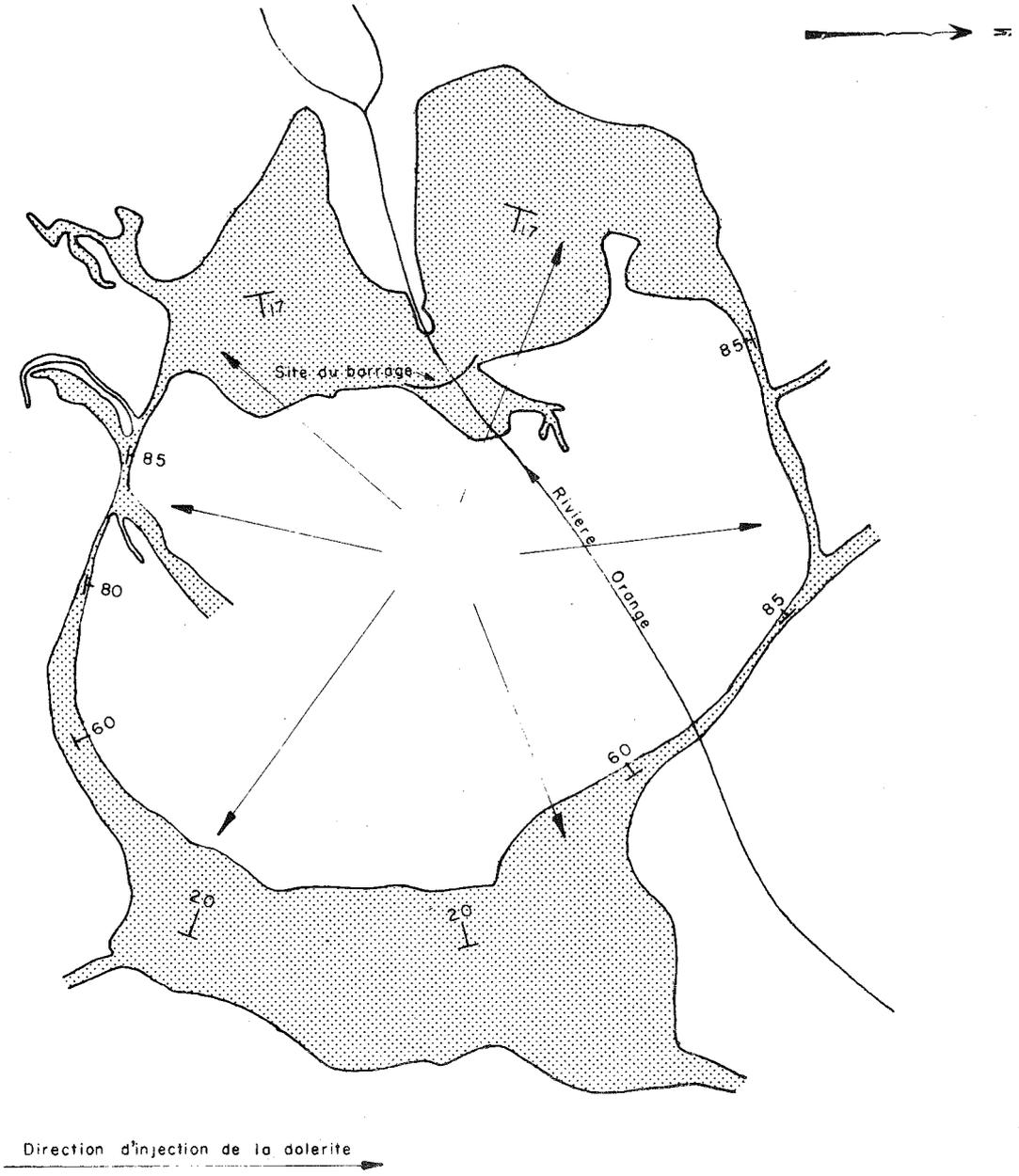


fig23

**SITE DU BARRAGE DE
HENDRIK VERWOERD**

**SCHEMA DE L'INJECTION CÔNIQUE
(CÔNE SHEET)**

echelle 1: 50.000

Ces deux dykes, en changeant de direction et avec des adoucissements de pendage, s'épaississent et viennent former un autre massif de dolérite à quelques 5 km du site vers le SE ; ce dernier massif évoque également l'apparence d'un sill, son pendage est de 10° à 20° vers l'Ouest. Il semble également que la dolérite soit de même composition. Cette disposition suggère une injection conique (RITTMAN - 1963), l'origine du matériau injecté se situant sous les sédiments restant encore au milieu de ce cône (figure 23).

En plus de cette disposition principale, quelques autres petits massifs viennent se greffer sur l'ensemble. D'abord, un autre sill de dolérite qui n'affleure que très peu dans la rivière, mais a été reconnu par les sondages ; il s'étend sous le premier sill, et se retrouve sous la carrière en profondeur ; il est plus vieux que le système précédent ; toutefois il est probable que ces deux injections de dolérite se sont suivies extrêmement rapidement dans le temps ; le pendage de ce dernier sill est très irrégulier : sous le barrage, il est de 10° à 40° vers le Sud et son épaisseur est rarement supérieure à 25 ou 30 mètres.

On trouve ensuite deux petites unités émanant du premier système. Une première A, dont le pendage est de 45° vers l'intérieur du cône, est une dolérite qui semble être exactement la même que celle du système principal ; il s'agit probablement d'une émanation de ce système par injection dans des fissures beaucoup plus verticales. Plus au Nord, un deuxième petit massif B, de même nature également et contemporain du premier, semble avoir été injecté plus au large et alimenté à partir du système principal par un dyke.

2.122. Les tremblements de terre

La possibilité d'une activité sismique due à la surrection actuelle du Sud et de l'Est de l'Afrique du Sud a été examinée. On peut voir, d'après les informations disponibles (figure 21), que ces tremblements de terre sont plus fréquents en-dessous du grand escarpement, mais qu'il existe également des activités assez intenses dans l'Ouest du Transvaal et dans le SW de l'Etat Libre d'Orange.

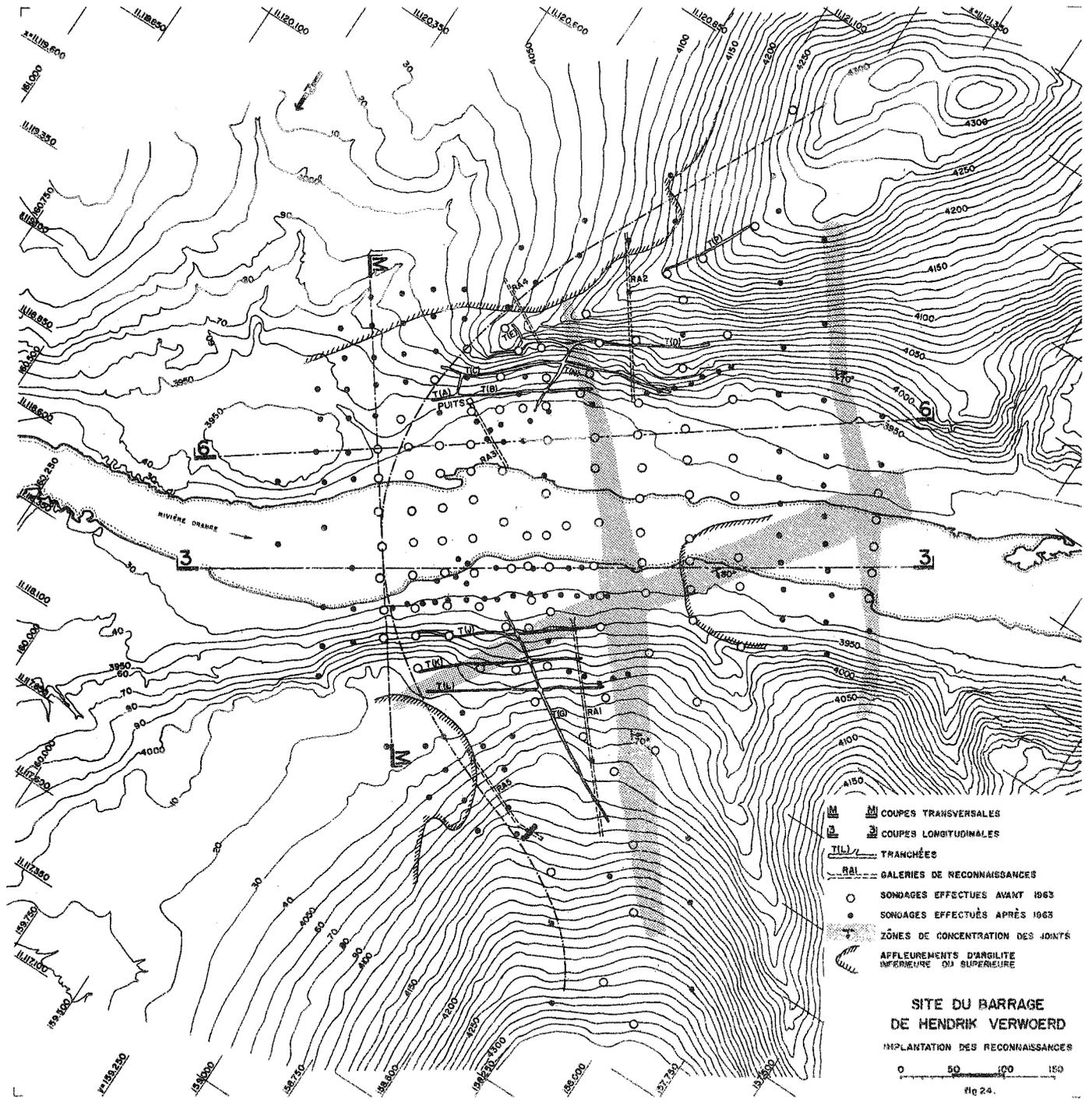
C'est dans cette dernière zone que se situe le barrage. Les épicentres semblent particulièrement concentrés dans la région de Koffiefontaine et de Lukoff ; on en trouve également dans la région de Prieska et de Philipstown.

Les magnitudes instrumentales connues ne semblent pas atteindre plus de 4,7 (5 Mercalli), leur moyenne étant entre 3 et 4. Cela correspond à des accélérations horizontales de 0,05 g. Il est difficile d'expliquer ces mouvements ; différentes raisons en ont été données : on a incriminé une zone magmatique profonde dans la région de Tromsburg ; cette formation profonde ignée serait même à l'origine d'une anomalie de gravité. On a également incriminé l'activité des failles Post-Waterberg ; toutefois, il a été très difficile de trouver une relation entre le lieu des épicentres et les accidents géologiques.

L'épaisseur des sédiments au voisinage du barrage a été estimée à 1000 à 1200 mètres. La probabilité d'un épicentre juste sous le barrage est extrêmement faible, d'autre part, les couches horizontales de sédiments sont réputées comme étant pauvre conducteur des vibrations dans une direction perpendiculaire. On a donc retenu une valeur de l'accélération verticale de 0,05 g.

2.2. Géologie de détail du site

La géologie de détail du site a été étudiée principalement à l'aide de tranchées, de sondages et de galeries (figure 24). En effet, la grande profondeur d'altération, la forte division de quelques affleurements existants et la superposition de deux matériaux (argilite et dolérite) nous a contraint à rechercher, par des moyens appropriés, ce que les affleurements nous refusaient : la structure du site.



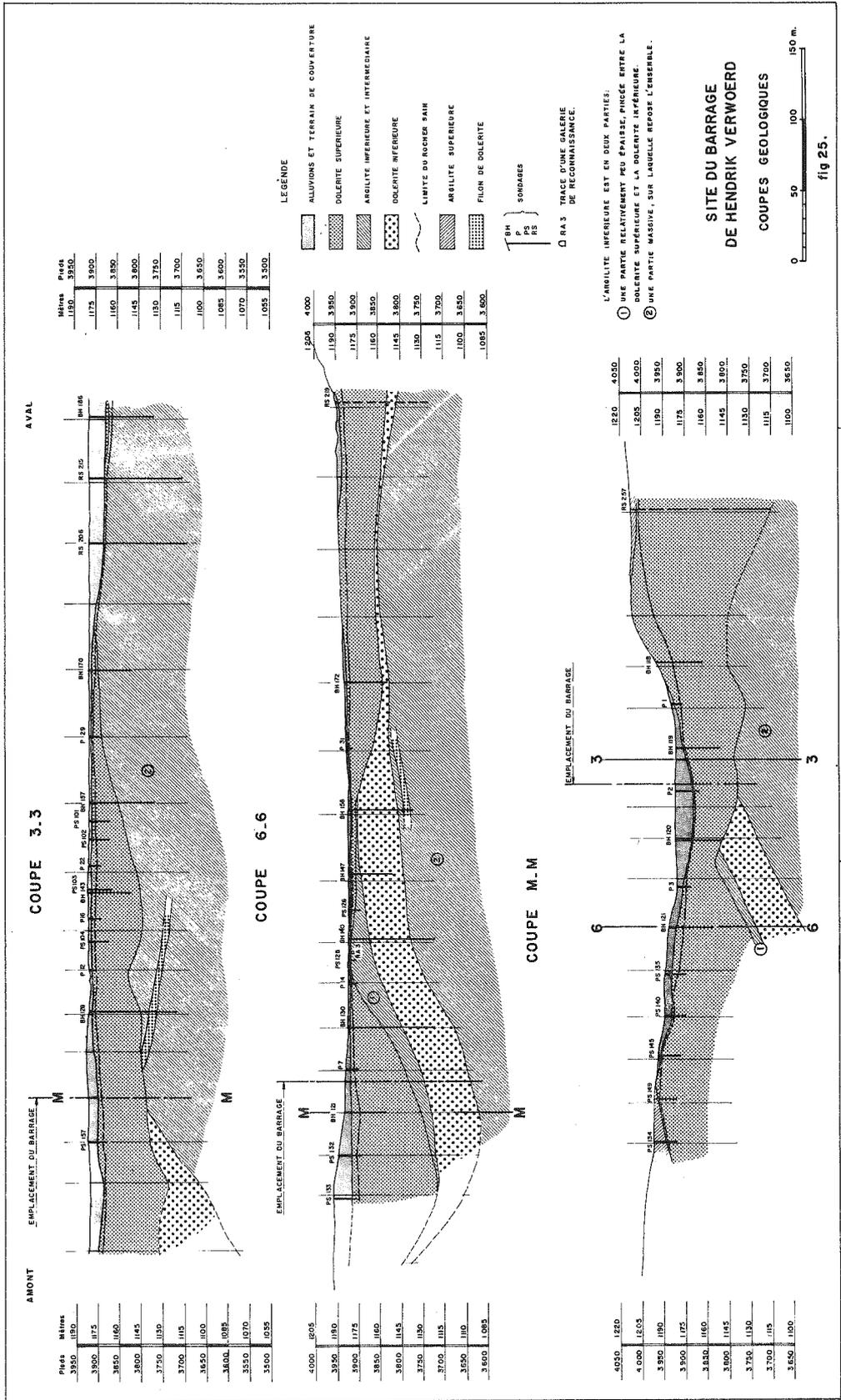
- COUPES TRANSVERSALES
- COUPES LONGITUDINALES
- TRANCHÉES
- GALERIES DE RECONNAISSANCES
- SONDAGES EFFECTUÉS AVANT 1963
- SONDAGES EFFECTUÉS APRÈS 1963
- ZONES DE CONCENTRATION DES JOINTS
- AFFLEUREMENTS D'ARGILITE INFÉRIEURE OU SUPÉRIEURE

**SITE DU BARRAGE
DE HENDRIK VERWOERD**

IMPLANTATION DES RECONNAISSANCES

0 50 100 150

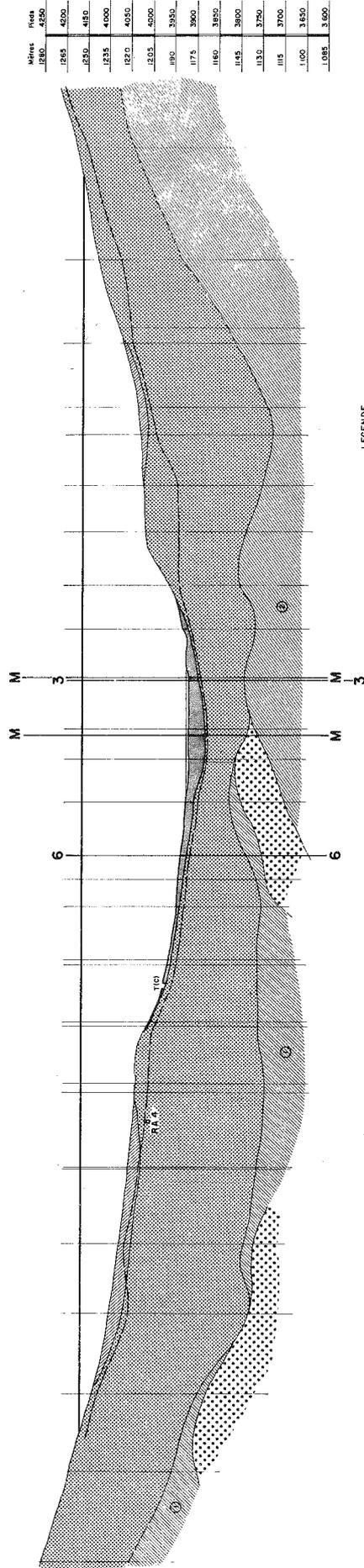
Fig 24.



ELEVATION AMONT DEVELOPEE

RIVE GAUCHE

RIVE DROITE



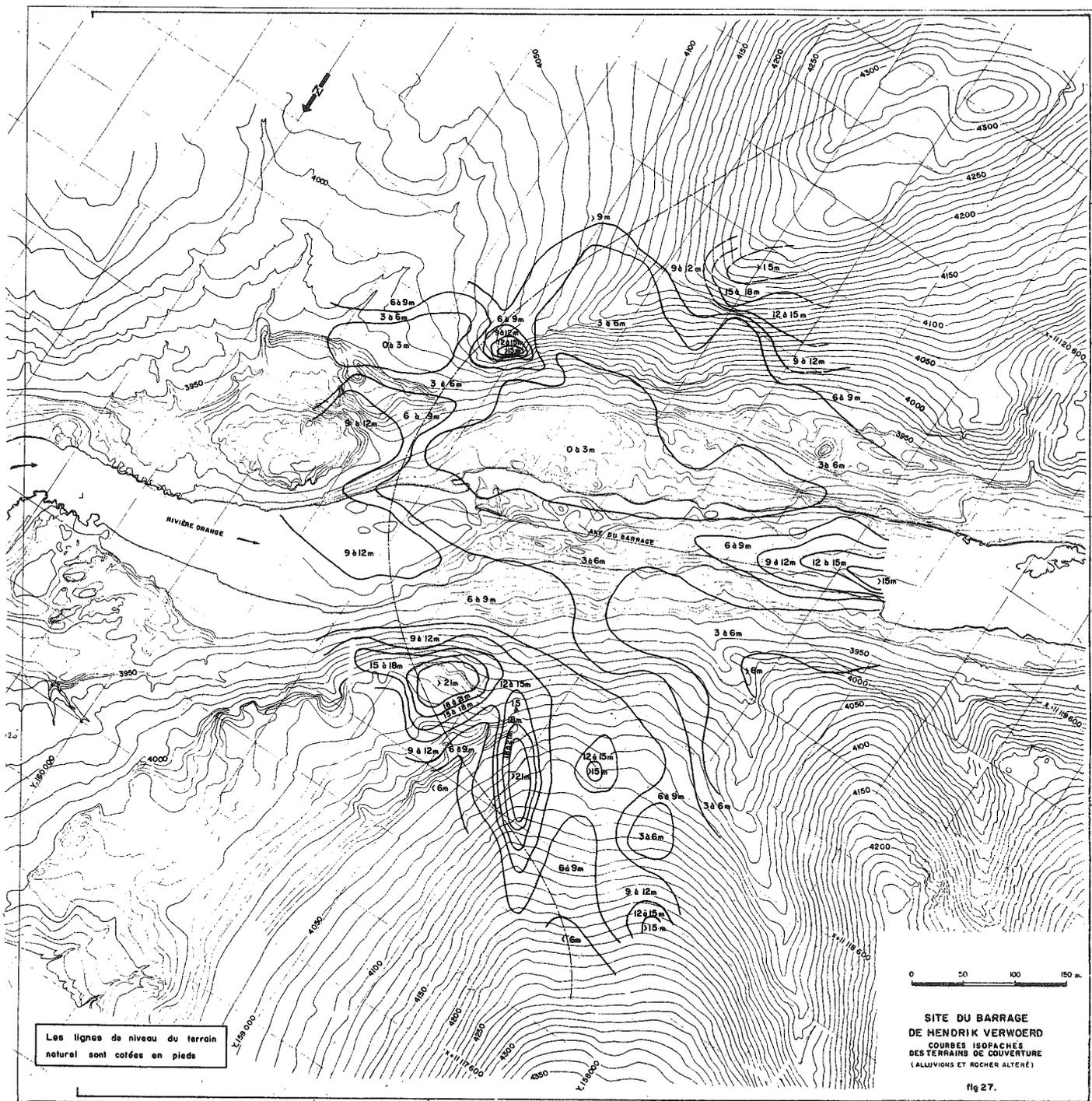
L'ARGILITE INFÉRIEURE EST EN DEUX PARTIES:
 ① UNE PARTIE RELATIVEMENT PEU ÉPAISSE, PINCÉE ENTRE LA DOLORITE SUPÉRIEURE ET LA DOLORITE INFÉRIEURE.
 ② UNE PARTIE MASSIVE, SUR LAQUELLE RÉPOSE L'ENSEMBLE.

- LEGENDE
- ALLUVIONS ET TERRAIN DE COUVERTURE
 - DOLORITE SUPÉRIEURE
 - ARGILITE INFÉRIEURE ET INTERMÉDIAIRE
 - DOLORITE INFÉRIEURE
 - LIMITES DU ROCHER SAIN
 - ARGILITE SUPÉRIEURE
 - SONDAGES
 - TRACÉ D'UNE GALÈRIE DE RECONNAISSANCE

SITE DU BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD COUPE GÉOLOGIQUE



fig 26.



Les lignes de niveau du terrain naturel sont cotées en pieds

0 50 100 150 m

**SITE DU BARRAGE
DE HENDRIK VERWOERD**
COURBES ISOPACHES
DES TERRAINS DE COUVERTURE
(ALLUVIONS ET ROCHER ALTÉRÉ)

fig 27.

2.21. Reconnaitances

La longueur totale des tranchées, faites en rive droite et rive gauche est à peu près de 1600 m, les profondeurs allant de 1 à 7 m. Ces excavations n'ont pas nécessairement atteint le rocher sain ; elles ont été arrêtées dès le rocher en place atteint car, même altéré, ce rocher laisse apparaître les discontinuités qui le divise.

Les sondages ont été faits en 2 campagnes : une première campagne comportant 125 trous, totalisant 4600 m, a été exécutée avant notre arrivée sur le site, et une deuxième campagne comportant 150 trous, totalisant 5400 mètres, a été exécutée sous notre direction.

Les reconnaissances souterraines ont consisté en 5 galeries, totalisant 700 m et en un puits de 25 m.

Toutes ces reconnaissances, avec le relevé des affleurements, ont permis de dresser des plans et des coupes très précis du site.

2.22. Résultats des reconnaissances

Les plans des figures 25 à 27 dressés à l'aide des renseignements fournis par les affleurements, les tranchées, les sondages et les galeries, montrent la géométrie du site, c'est-à-dire la position des contacts, les épaisseurs de terrains de couverture et les grandes discontinuités.

Nous avons pu aussi faire une série de coupes parallèles systématiques (longitudinales de 1 à 16 et transversales de A à Q) précisant le site sans grandes interpolations. Nous donnons ici, (figures 25 et 26), les trois coupes les plus représentatives ainsi que l'élevation développée le long de l'implantation retenue.

Nous avons indiqué (fig 27) les épaisseurs de terrains de couverture ; on peut ainsi voir les fossés d'altération de la rive droite dus à une série de diaclases concentrées.

La continuité horizontale (par les tranchées et les galeries) et celle verticale (par les sondages) des reconnaissances ont permis de s'assurer qu'il n'y avait aucun accident continu traversant le site. Seules les zones de concentration de diaclases, sans aucun remplissage plastique, ont été décelées. Nous en avons relevé une dont le pendage est de 85° vers le NW et deux de 70° vers le NE. Ces zones semblent favoriser l'altération du rocher, ce qui explique, dans certaines zones, la grande profondeur d'altération.

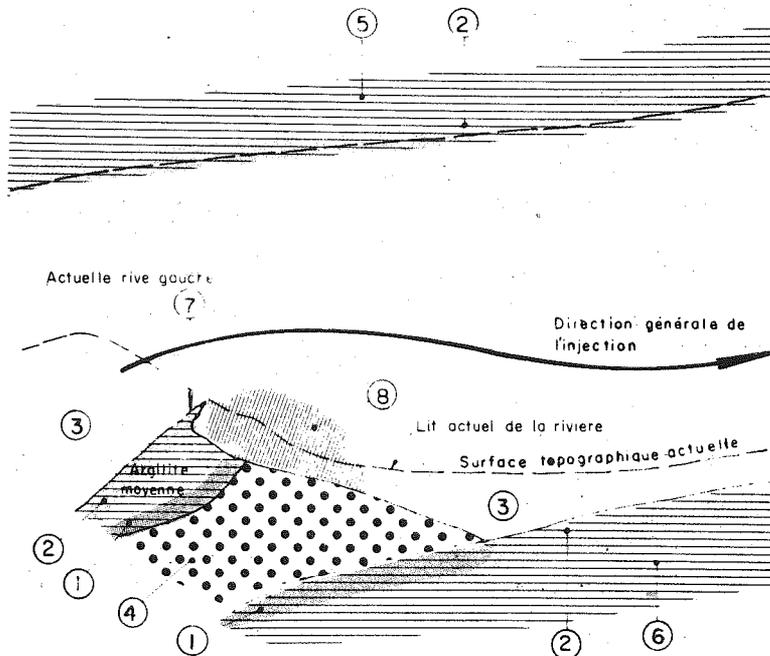
2.221. La dolérite inférieure

Elle s'étend surtout sous la rive gauche et sous la rivière et forme un sill qui a des formes assez irrégulières ; il s'amincit à l'aval, s'épaissit en plongeant fortement sous la rive gauche à l'amont et il se retrouve parfois en contact avec la dolérite dite supérieure formant la fondation directe du barrage. La dolérite inférieure est parfaitement saine partout ; elle a été vue dans 18 sondages et à l'extrémité de la galerie RA 3.

2.222. La dolérite supérieure

C'est elle qui forme le site avec ses reliefs voisins ; elle a une épaisseur moyenne d'une centaine de mètres mais une forte altération superficielle qui peut atteindre jusqu'à 30 mètres réduit d'autant l'épaisseur du rocher de fondation. Les contacts de cette dolérite supérieure, soit avec l'argilite environnante, soit avec la dolérite inférieure sont dans l'ensemble parfaitement nets. On constate simplement un changement dans la forme et la taille des cristaux : à partir de 0,50 m à 3 m, la granulométrie moyenne de la dolérite passe alors à une granulométrie extrêmement fine, puis au contact, la surface de séparation est nette et l'on passe soit à l'argilite elle-même, parfois cristallisée, soit à la dolérite inférieure à gros cristaux. Dans tous les cas, le contact est parfait. On a trouvé seulement 5 sondages, sur les 78 ayant pénétré dans les argilites, où il y avait un doute sur la cohésion du contact.

La dolérite supérieure couvre, sous la rive gauche, un biseau d'argilite reposant lui-même sur la dolérite inférieure (coupe MM figure 25). Ceci est probablement dû au fait que la dolérite inférieure, injectée la première, a cuit une première fois le sédiment environnant qui s'est trouvé durci et a résisté lors de l'injection de la seconde venue de la dolérite. Il est intéressant de noter que cette structure est liée à des affleurements de surface qui présentent des caractéristiques légèrement différentes des affleurements voisins. La dolérite au voisinage des biseaux d'argilite est beaucoup plus sujette à l'érosion et à l'altération et présente un réseau de joints différents. Si on admet une mise en place à partir d'un foyer profond suivant la surface conique proposée précédemment, on connaît la direction de l'écoulement (figure 28). Une partie du flot a été maintenue immobile à l'abri du biseau de sédiment durci, et a connu des conditions physico-chimiques différentes de celles de la dolérite s'écoulant normalement, d'où une solidification différente.



LEGENDE

- ① PREMIÈRE CUISSON DE L'ARGILITE PAR LA DOLERITE INFÉRIEURE
- ② DEUXIÈME CUISSON DE L'ARGILITE PAR LA DOLERITE SUPÉRIEURE.
- ③ DOLERITE SUPÉRIEURE
- ④ DOLERITE INFÉRIEURE.
- ⑤ ARGILITE SUPÉRIEURE.
- ⑥ ARGILITE INFÉRIEURE
- ⑦ ARGILITE MOBILISÉE RECONNUE DANS LA TRANCHÉE (E) ET LA GALERIE (RA 4)
- ⑧ DOLERITE SUPÉRIEURE MISE EN PLACE D'UNE FAÇON DIFFÉRENTE, DONNANT DES SYSTÈMES DE JOINTS ET UNE ALTÉRATION DIFFÉRENTS

2.223. Structure secondaire

Les sondages ont décelé une petite structure qui est une veine de dolérite d'une épaisseur moyenne de 3 m qui traverse l'argilite et semble être une émanation de la dolérite supérieure. Cette petite structure est assez profonde, elle n'intéresse jamais les fondations futures.

2.224. Les argilites litées

a) Elles peuvent être divisées en 2 grandes masses : la formation inférieure sur laquelle repose la dolérite constituant les fondations du barrage et la formation supérieure constituant la cuvette et qui repose sur les dolérites du barrage.

b) La formation inférieure est elle-même divisée en deux parties assez distinctes (figures 25 et 26) :

- la partie basse (2) sous la rive droite ; le contact est à peu près à 30 - 40 m, sensiblement parallèle à la surface topographique et se prolonge rive gauche sous la dolérite inférieure.
- la partie médiane (1), qui est pincée entre la dolérite supérieure et la dolérite inférieure sous la rive gauche, a donc été cuite deux fois ; c'est elle qui forme le biseau mentionné ci-dessus et la bosse du pied de la rive gauche qui est seulement couverte par 0,30 m de dolérite (coupe 6-6) ; heureusement, elle plonge extrêmement vite à l'amont de sorte qu'en déplaçant seulement l'implantation de quelques dizaines de mètres, il est possible de garder sous le barrage, une épaisseur de dolérite d'au moins 25 m.

c) La formation supérieure s'étend à l'amont sur de grandes distances ; c'est elle, dans l'hypothèse avancée, qui forme le couvercle de l'injection conique.

2.225. Le terrain de couverture

Le terrain de couverture, au-dessus de la surface de rocher sain, est constitué par deux niveaux : un niveau supérieur de sable, gravier et cailloux, un niveau inférieur formé par la dolérite décomposée ou fortement diacisée.

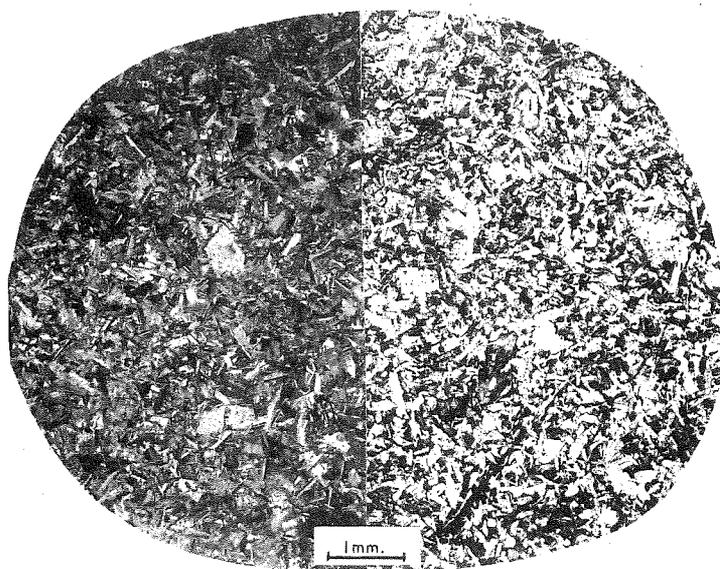
2.3. Pétrographie des roches.

2.31. La dolérite inférieure (figure 29)

Elle est à grains moyens, sauf au contact avec le sédiment où elle devient de plus en plus fine sur une épaisseur de 0,50 m à 1 m. Cette dolérite est composée principalement :

- de cristaux de plagioclases calciques de 0,2 mm à 0,6 mm en forme de petites lattes.
- de cristaux d'augite, parfois extrêmement importants, la moyenne des cristaux étant de 0,6 mm à 0,7 mm.
- de pyroxène orthorhombique,
- de groupes de très petits cristaux chloriteux associés avec des zéolites qui peuvent arriver même à cimenter certaines fissures dans les feldspaths.

Le pourcentage de feldspath est légèrement supérieur à celui des pyroxènes, la texture est subophitique.

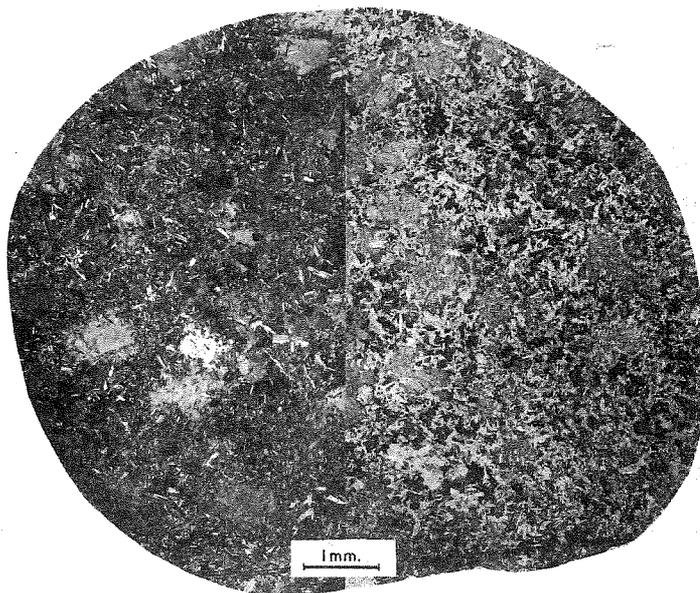


Lumière polarisée

Lumière naturelle

Dolérite inférieure

fig. 29 - SITE DU BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD - Echantillon provenant du sondage R S 213 A 11 mètres.
 Roche moyennement grenue à structure subophitique, montrant : des lattes de plagioclases
 de larges cristaux de pyroxène et d'augite.



Lumière polarisée

Lumière naturelle

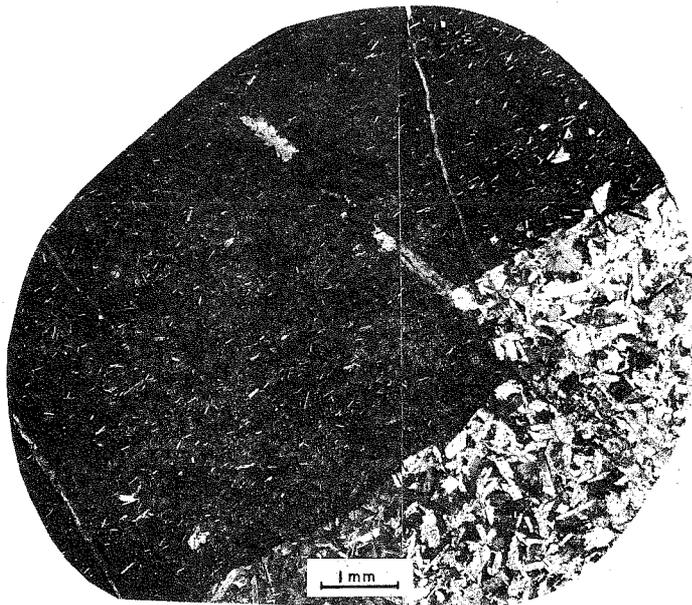
Dolérite supérieure

fig. 30 - SITE DU BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD - Echantillon provenant du sondage P S 104 à 13,50 mètres
 Roche moyennement grenue montrant :
 des lattes de plagioclases,
 de très grands cristaux d'olivine et de pyroxène donnant un aspect tacheté.

2.32. La dolérite supérieure (figure 30)

Elle est également à granulométrie moyenne, sauf au contact avec l'argilite ou la dolérite inférieure (figure 31) où la taille des cristaux diminue jusqu'à former une pâte cryptocristalline dans laquelle subsistent quelques microlites. La dolérite supérieure se compose :

- de cristaux de plagioclases formant de petites lattes de 0,5 mm de long et de 0,05 mm d'épaisseur, parfois légèrement zonées avec un cœur basique d'anorthite et une frange fine plus acide d'oligoclase. Les cristaux forment un réseau légèrement moins bien organisé que celui des dolérites inférieures,
- de cristaux beaucoup plus importants de 1 à 2 mm d'olivine avec une altération magnétitique dans les craquelures,
- de diopside qui se présente soit sous forme de cristaux clairs craquelés non altérés, soit de cristaux ouralitisés avec apparition de hornblende brune et de quelques microfibrilles de trémolite, soit de cristaux presque complètement altérés formés de petites éponges de trémolite et d'actinote,
- de zones de micro-cristaux phylliteux (biotite, chlorite), d'un oxyde métallique (magnétite) et de micro-cristaux produits par l'altération des pyroxènes.



Lumière polarisée

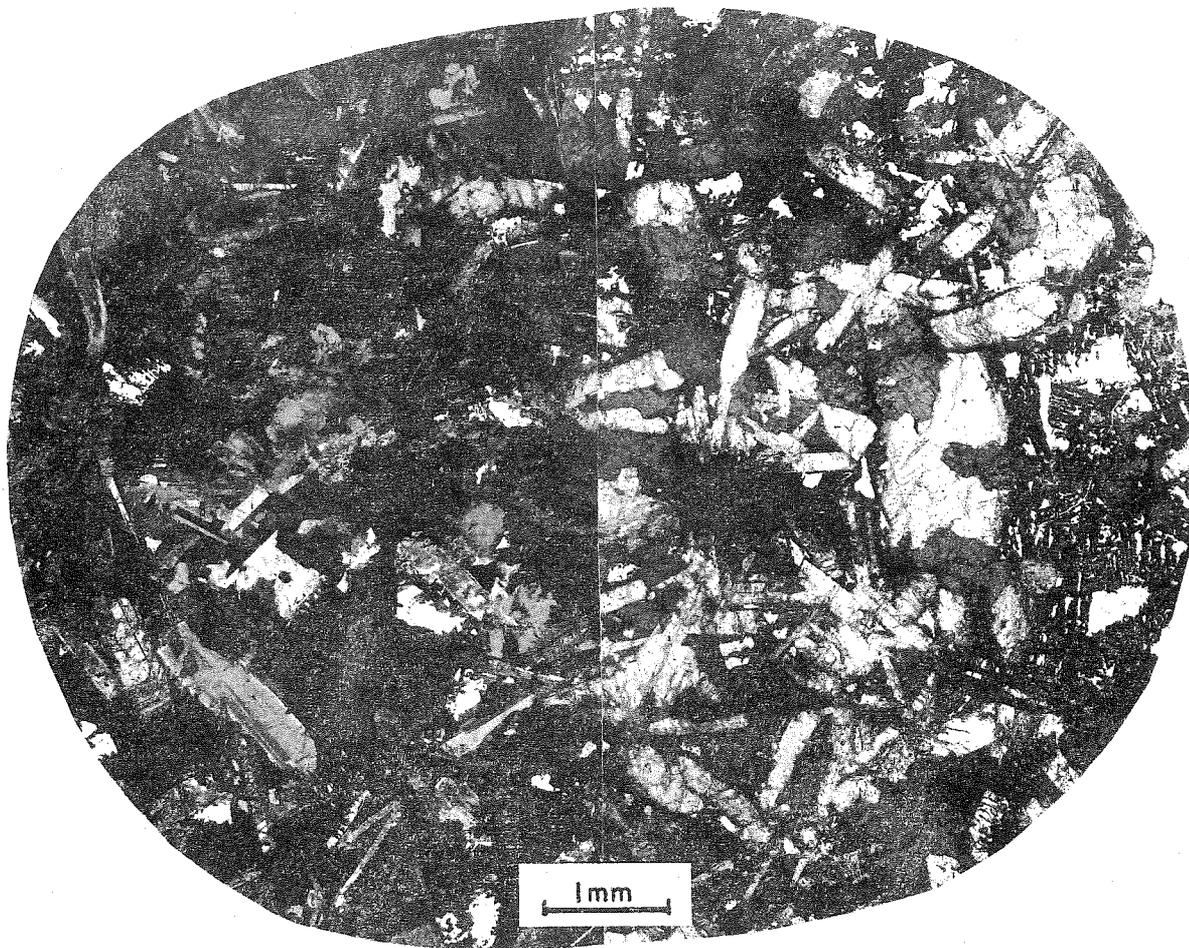
Lumière naturelle

Contact entre dolérites supérieure et inférieure

fig. 31 - SITE DU BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD - Echantillon provenant du sondage R S 246 à 70 mètres. La dolérite supérieure est microcristalline avec seulement quelques microlites alors que la dolérite inférieure est inchangée.

Le pourcentage des feldspaths est ici légèrement inférieur à celui des minéraux noirs. La texture est très souvent pœcilitique, l'aspect tacheté, qui est le caractère essentiel de la dolérite supérieure, est dû aux gros cristaux de pyroxène ; jamais la dolérite inférieure ne présente ce caractère.

Dans certaines zones, la dolérite se présente sous une forme différente, à granulométrie beaucoup plus grossière avec une texture ophitique très distincte et une disparition complète du petit matériel micro-cristallin chloriteux (figure 32). La zone spéciale mentionnée lors de l'étude de la mise en place de la dolérite supérieure appartient à ce type.



Lumière polarisée

Dolérite supérieure

Lumière naturelle

fig. 32 - SITE DU BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD - Echantillon provenant du sondage P S 132
à 14 mètres.

Passée exceptionnelle de dolérite très grenue, à texture ophitique. Le passage de cette dolérite à la dolérite classique est progressif.

2.33. Les contacts des dolérites avec les sédiments dans la zone de simple cuisson

Les sédiments (argilites) montrent du quartz en très petits cristaux et un fin matériel chloriteux ; l'ensemble est seulement durci, la frange de transformation est extrêmement nette et se présente sous la forme d'un très petit ruban mesurant seulement 0,1 mm.

Après le contact, la dolérite montre également une frange de transformation de 0,1 mm où elle est micro-cristalline avec simplement quelques cristaux de feldspath, puis elle redevient progressivement normale.

2.34. Les dolérites altérées - Mécanisme de l'altération (figure 33).

Il semble que l'altération chemine d'abord dans un réseau de petites craquelures s'ouvrant dans les petits amas de micro-cristaux de chlorite et de biotite présents dans le rocher à un degré variable. Ces craquelures sont colmatées par des oxydes opaques avec une notable augmentation de volume.

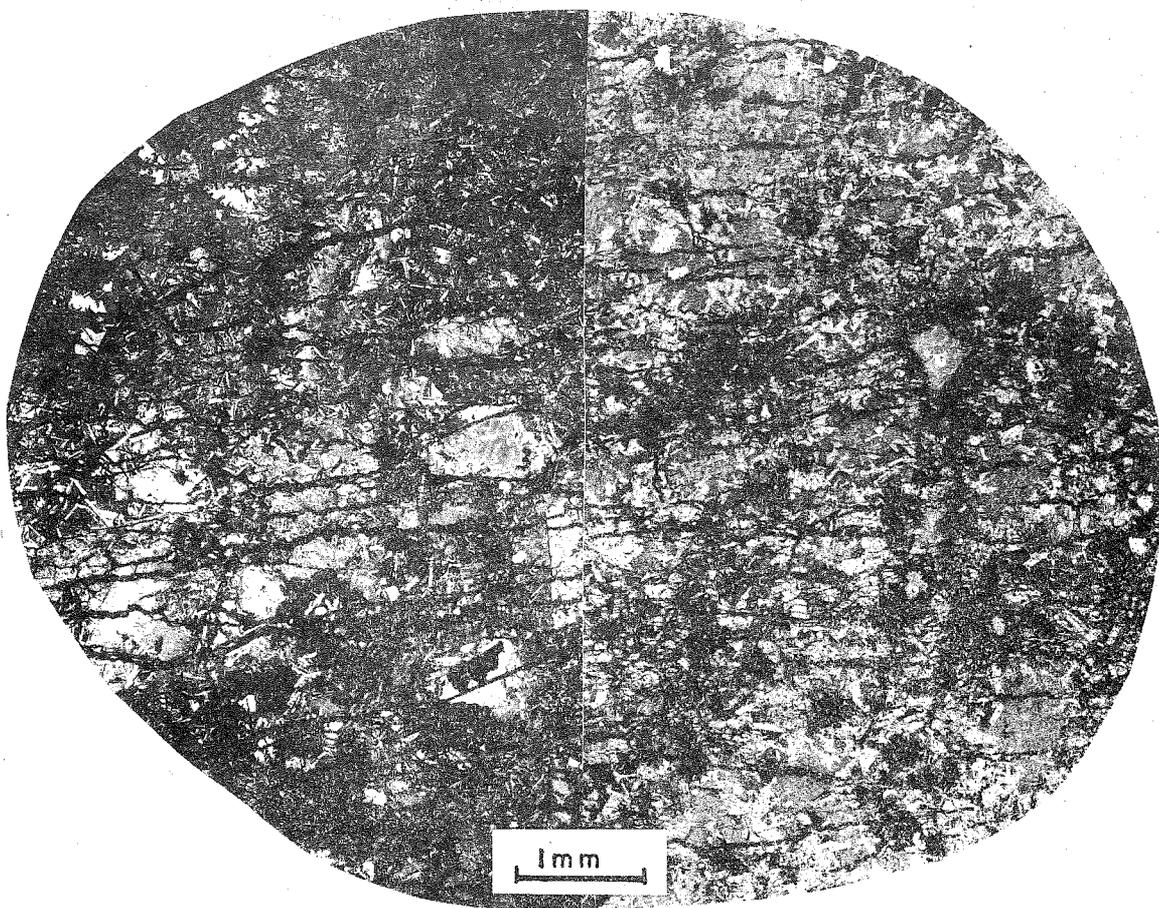


fig. 33 Lumière polarisée Lumière naturelle
Dolérite supérieure altérée

SITE DU BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD - Echantillon prélevé à l'affleurement.

Les petites fractures, remplies d'oxydes gonflants parcourent généralement les interstices distribués entre les cristaux de plagioclases et coupent quelques cristaux de pyroxène. La roche ainsi décomposée s'émiette d'abord en paillettes puis se transforme en arène.

Dans le premier état d'altération, les feldspaths et les pyroxènes et même souvent l'olivine ne sont absolument pas altérés, il y a simplement division et écartement des cristaux le long de lignes empruntant de préférence les concentrations de phyllites extrêmement fines. Puis, dans un état un peu plus avancé, l'altération attaque les cristaux plus larges : elle commence par l'olivine, continue avec les pyroxènes pour terminer avec les feldspaths. La présence des petites concentrations d'éléments chloriteux est donc particulièrement influente puisqu'elle semble dicter la susceptibilité de la roche à l'altération. Il est malheureusement impossible d'en présenter une répartition géographique ; on peut simplement affirmer qu'ils sont beaucoup moins nombreux dans la dolérite inférieure. L'altération s'opère extrêmement lentement et la présence des oxydes tend à montrer qu'elle est superficielle.

D'autre part, la limite d'altération est très nette, soit qu'elle affecte des joints avec production de boules, soit même qu'elle affecte de grandes dalles (figure 34).

2.4. Les discontinuités structurales

L'étude des joints et des diaclases est très intéressante puisque c'est un des facteurs qui régit la géométrie du site. Les réseaux de discontinuités sont extrêmement développés : leurs directions ont été étudiées par la méthode statistique. On a opéré par cheminements orthogonaux, soit dans les tranchées et dans les galeries horizontales, soit dans le puits et les tranchées à tendance verticale. Les deux rives présentent des résultats à peu près analogues.

Par contre, on peut déceler des différences notables entre les discontinuités mécaniques des dolérites et celles des argilites. Nous avons décomposé ces discontinuités en surfaces étendues et planes, et en petits joints souvent très irréguliers.

Le graphique polaire de la figure 35 montre la répartition spatiale statistique des surfaces étendues.

a) dans l'argilite

Les joints de sédimentation horizontaux à maille de 1,50 m sont très visibles.

- Deux réseaux orthogonaux verticaux orientés ESE-WNW et NNE-SSW à maille moyenne métrique existent également.

b) dans la dolérite

Les joints parallèles au pendage du sill, de faible pente : 10° à tendance ENE, dont la maille moyenne est 1 m, résultent sans doute de la mise en place des dolérites. Les différences de vitesses existant dans l'écoulement ont favorisé des laminages dans la masse, isolant finalement des "bancs" lors de la solidification. Cette division est invisible à l'échelle de l'échantillon.

On peut aussi relever un réseau de diaclases verticales dont les horizontales sont NE-SW et un autre beaucoup moins net, dont les horizontales sont SE-NW, de pendage 60° vers le SW. La maille moyenne est de 6 m à 10,00 m rive droite et seulement de 5,00 m rive gauche.

Fréquemment, ces surfaces très planes de discontinuité sont soulignées par un film secondaire dont l'analyse a été faite en différents points du site. La moyenne de 7 échantillons est la suivante :

- Laumonite	46%
- Apophillite	21%
- Girolite	4%
- Chlorite gonflante et talc	10%
- Calcite	19%

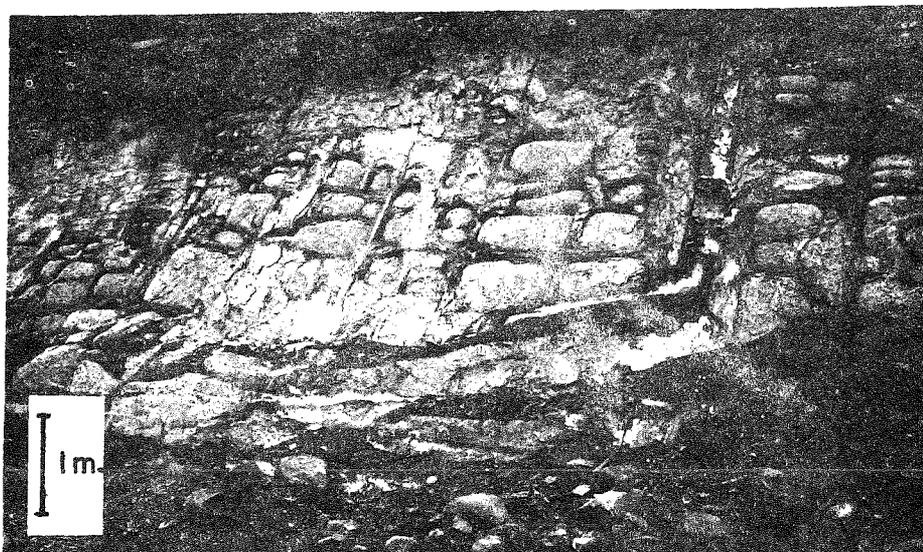


Photo No 8

Décomposition de la dolérite suivant deux systèmes de joints orthogonaux avec formation de blocs arrondis de dolérite encore saine.

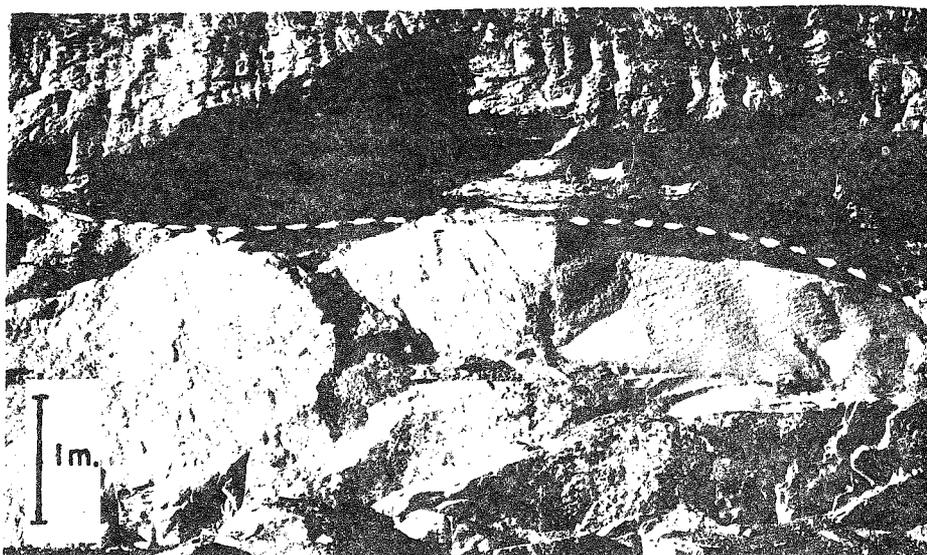
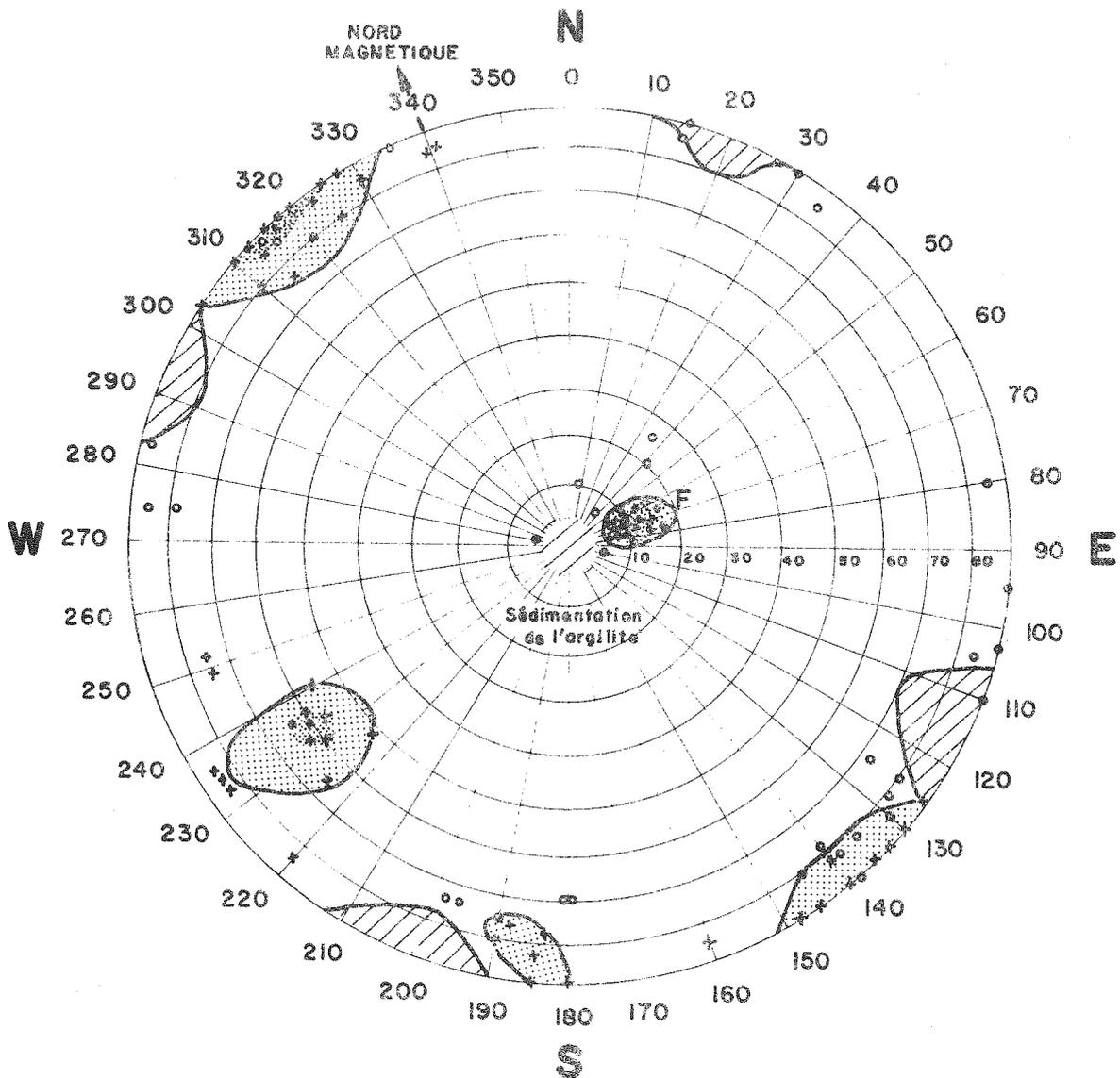


Photo No 9

Limite de décomposition très nette d'une dalle de dolérite, la partie inférieure est exempte de toute altération, la partie supérieure est transformée en arène.

fig 34.

- SITE DU BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD.



 JOINTS DANS L'ARGILITE, ECARTEMENT 1,00 A 1,50mètres

 JOINTS DANS LA DOLORITE { F joints parallèle au pendage du SIII. Ecartement: 1,00 m.
 joints rive droite. Ecartement: 6,00 m. a 10,00 m.
 joints rive gauche. Ecartement: 5,00 m.

EPAISSEUR DES JOINTS CHLORITEUX CALCITEUX OU REMPLIS DE ZEOLITE: 0,20 A 2mm.

fig 35.

Les zéolites (apophillites, girolites et laumonites) sont assez épaisses, parfaitement cristallisées, alors que les épontes, formées principalement de chlôrite et de talc, n'ont que 0,1 mm d'épaisseur ; la calcite n'est pas toujours présente dans tous les échantillons.

Le graphique polaire de la figure 36 montre la répartition spatiale statistique des petits joints. Il s'agit là beaucoup plus de cassures potentielles ouvertes par l'explosif que de diaclases proprement dites.

On peut toutefois reconnaître la direction de la sédimentation de l'argilite, la direction de pendage du sill de dolérite et des réseaux diffus analogues aux réseaux des discontinuités principales. Les mailles moyennes dans l'argilite sont de 0,3 m à 0,4 m ; dans la dolérite, de 1 m à 2 m rive droite et 1 m rive gauche.

2.5. Résumé

L'examen des conditions géologiques générales et l'analyse détaillée du site font ressortir un certain nombre de points qui demanderont à être analysés par des essais et pris en considération par le projeteur.

L'altérabilité à l'air et la division potentielle des argilites en font un matériel fragile incapable de constituer une fondation de barrage en béton. De plus les argilites sont très susceptibles d'être érodées lors du déversement de grands volumes d'eau à forte énergie.

Bien que la topographie de la gorge à 1 km à l'aval du site actuel soit très favorable à la mise en place d'un barrage voûte, les fondations auraient été alors entièrement dans les argilites. On a donc reporté l'implantation beaucoup plus à l'amont, pour que toutes les fondations soient dans la dolérite.

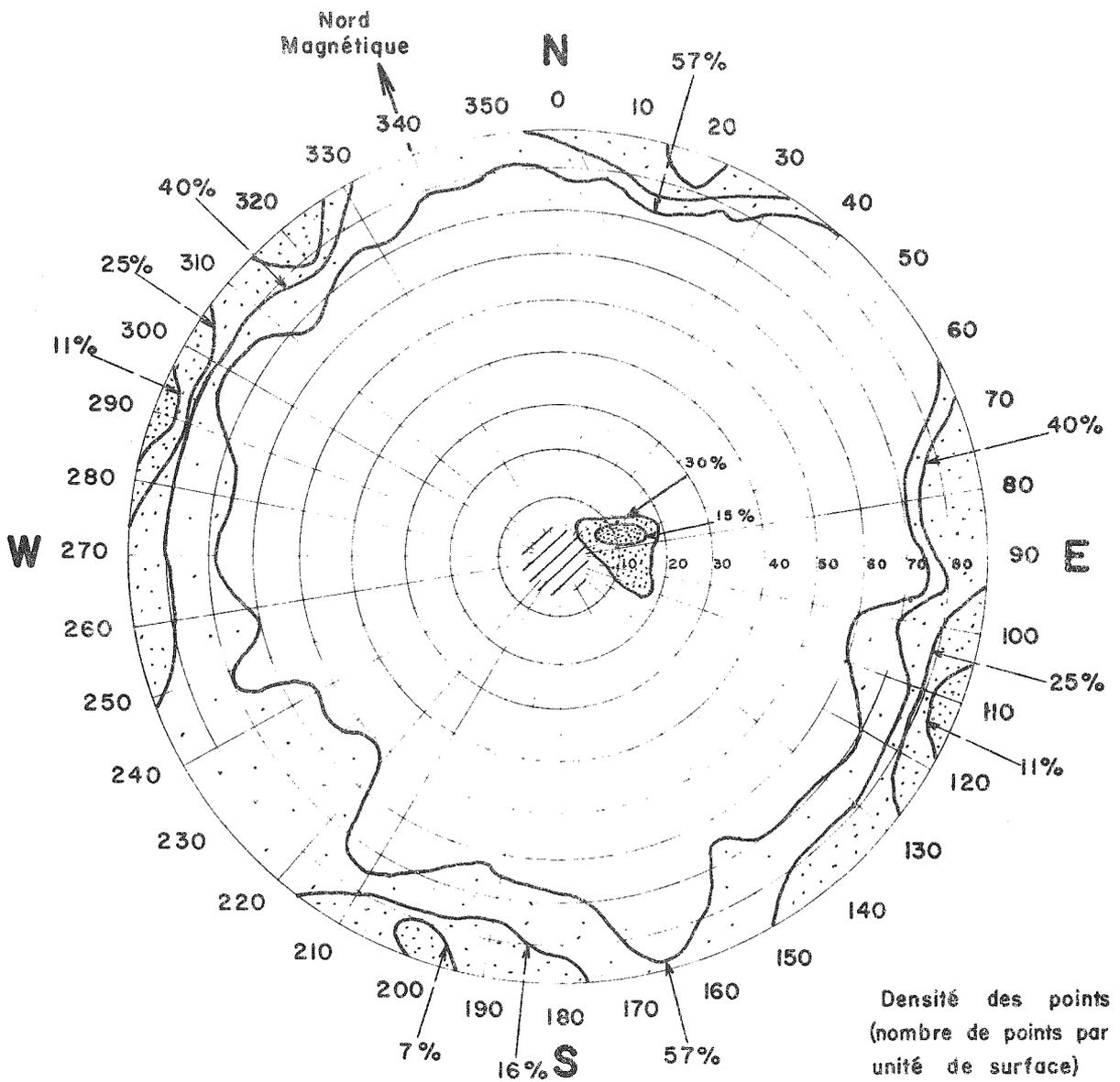
Il n'en reste pas moins le problème de la tenue des argilites affleurant à 100 m à l'aval du barrage prévu actuellement. Il semble délicat de compter sur la langue de dolérite, d'épaisseur faible, qui les protège car un déversement met en œuvre des phénomènes dynamiques qui peuvent arracher cette dolérite même de bonne qualité.

Les dolérites étant un matériel intrusif, on peut donc penser qu'après refroidissement, elles aient retenu un certain degré de contraintes internes qui peut être dangereux dans les cas d'ouverture de fouilles assez grandes ou d'ouvrages souterrains.

La présence d'argilite sous la fondation pose ensuite le problème du comportement de cette roche supportant de la dolérite lorsque le terrain sera complètement imbibé par l'eau de la retenue. On a vu, en étudiant la géologie particulière, que l'argilite n'est pas en communication directe avec la retenue puisqu'elle en est séparée par le sill de dolérite qui est continu et dont l'épaisseur a une trentaine de mètres. L'étude de l'étanchéité de cette dolérite est donc primordiale ; elle a été examinée par une campagne d'essais d'injection d'eau qui a montré que seule, la zone de contact dolérite-argilite, était un peu moins imperméable tout en satisfaisant largement aux critères habituels.

La dualité dolérite-argilite pose également le problème de la tenue mécanique de la liaison. Nous avons vu que cette liaison était satisfaisante, mais nous avons néanmoins fait un certain nombre d'essais de déformabilité tendant à comparer argilite et dolérite.

Lors de l'étude du contexte géologique, nous avons vu que les argilites et dolérites, formant le Karroo, avaient émergé dès le Trias. Ne pourrait-on craindre une altération qui aurait cheminé en profondeur et aurait affaibli généralement les roches ? C'est peu probable car du fait de la surrection continue de l'Afrique du Sud, l'érosion est active : le creusement de la vallée du site est récent. D'autre part, l'imperméabilité remarquable des deux roches n'est pas favorable aux cheminements de l'eau.



Densité des points
(nombre de points par
unité de surface)

Les pourcentages donnent la proportion de points
existant à l'intérieur de la courbe correspondante

/// SEDIMENTATION DE L'ARGILITE

ECARTEMENT DES JOINTS DANS LA DOLERITE RIVE GAUCHE 1,00 metre

ECARTEMENT DES JOINTS DANS LA DOLERITE RIVE DROITE 1,00 à 1,50 metre

ECARTEMENT DES JOINTS
DANS L'ARGILITE 0,30 metre

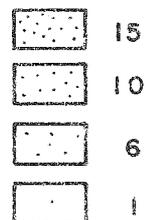


fig 36.

3. SITE DU BARRAGE DE TACHIEN

Dans les deux sites envisagés précédemment, nous avons étudié plus spécialement le problème de la fondation rocheuse de l'ouvrage lui-même. Dans le cas du site du barrage de Tachien, les reconnaissances ont été orientées surtout vers l'étude d'un éperon particulièrement aigu dont l'équilibre, après mise en eau, pouvait être précaire. Nous étudierons donc les fondations du barrage comme dans les précédents paragraphes et, de plus, la structure de l'éperon naturel.

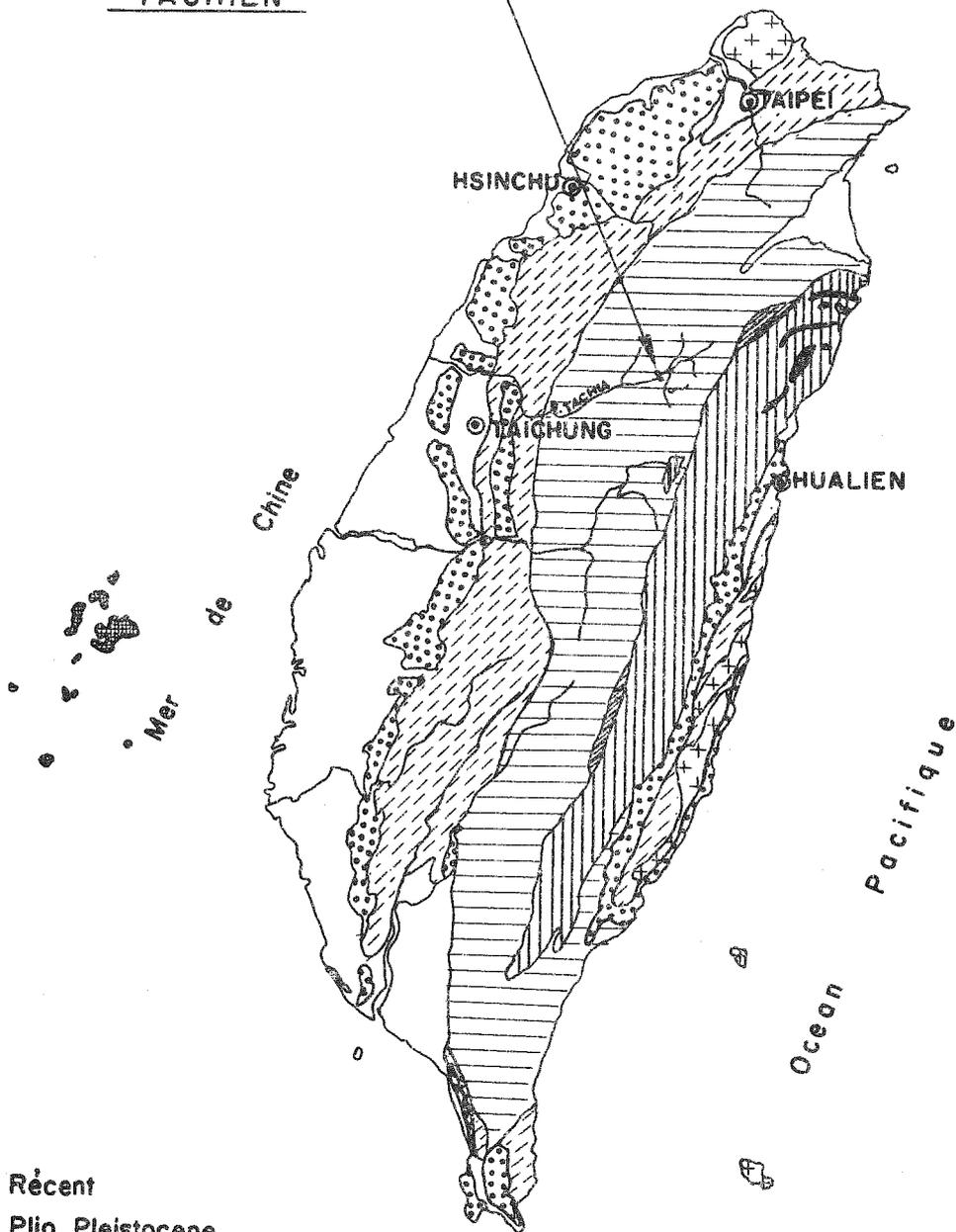
Le site du barrage de Tachien est situé sur la rivière Tachia, à 90 km au SSW de Taïpei, dans l'île de Formose (figure 37). On y prévoit la construction d'un barrage voûte en béton d'une hauteur de 200 m dans une vallée aux parois très raides.

3.1. Conditions géologiques générales

Le tableau ci-dessous donne l'échelle stratigraphique des principales formations rencontrées à Formose dans la région du site étudié :

ERES	ETAGES	FORMATIONS	AGE en millions d'années
Récent. Quaternaire	Pléistocène	Alluvions Graviers et terrasses	2
Tertiaire (Cénozoïque)	Phase de tectonisme intense - Pliocène Néogène - Miocène	Tokazan Takuran Maanrys Makumo Oryukei	25
	Phase de tectonisme intense - Oligocène Nummulitique - Eocène	Siutyoryu) Série Hakurei) SUO	60
Secondaire (Mésozoïque)	Crétacé Supérieur	Série PIHOU	80
Primaire (Paléozoïque)		Socle métamorphique	220

Site du barrage de
TACHIEN



- Récent
- Plio-Pleistocene
- Miocène & Pliocène
- Eocène & Oligocène
- Cretacé
- Mésozoïque & Paléozoïque
- Andésite
- Basalte
- Granite & Gneiss



ESQUISSE GEOLOGIQUE
DE L'ILE DE FORMOSE

(d'après lexique stratigraphique, Vol III , fasc. 4)

fig 37.

3.11. Histoire géologique du massif

(Lexique Stratigraphique International, 1956 - Teiichi Kobayashi, 1954).

Nos connaissances de la genèse de l'île commencent au moment où un dépôt géosynclinal de sédiments tertiaires d'une épaisseur d'à peu près 10 000 m se forme dans un bassin constitué par des matériaux métamorphiques. L'axe du géosynclinal est grossièrement N-S ; le complexe métamorphique du socle est une masse compliquée et indifférenciée comprenant des schistes, des calcaires cristallins, des grès avec un certain nombre de gneiss, de migmatites et de porphyres quartzeux injectés de diabases ; les calcaires cristallins sont attribués au Permien.

Les premiers sédiments qui reposent sur le socle métamorphique sont principalement des argilites sombres, parfois gréseuses, parfois ardoisières, intercalées de séquences massives de grès blancs grossièrement grenus contenant des lits phylliteux et charbonneux. Ces dépôts sont datés depuis le Crétacé supérieur jusqu'au Nummulitique. Cet ensemble formé des séries Pihou et Suo est remarquablement calme : les étages sont concordants.

A la fin de l'Oligocène, une grande activité tectonique commence à se manifester. Au cours de cette orogénèse, il y eut formation d'une cordillère qui fit émerger le socle métamorphique à l'Est. Les sédiments nummulitiques déjà déposés ont été ainsi pliés et très largement métamorphisés.

Pendant le Miocène, une transgression créa des conditions spéciales de dépôts de chaque côté de l'arrête centrale émergée, dans les deux petits géosynclinaux séparés, qui sont différenciés à partir de ce moment dans leur histoire sédimentaire et même tectonique.

Alors que dans le bassin de l'Est les dépôts miocènes commencent par une éruption de laves andésitiques, suivie par une accumulation de débris volcaniques, dans le bassin Ouest, celui du site, les sédiments se forment dans une mer peu profonde au Nord et un peu plus profonde au Sud. On passe ainsi de dépôts d'origine marine et continentale mélangés, formés de grès grossièrement grenus, de lits de charbon et de fins lits de silt et d'argile, à des dépôts monotones où alternent grauwakes et argilites sombres, massives ou litées. On constate partout des changements latéraux de faciès sur de courtes distances.

Au cours du Pliocène, on constate un approfondissement très net du bassin de sédimentation sud.

Au Pléistocène, une très forte activité tectonique commence et favorise l'émergence de la nouvelle île de Formose.

3.12. Structure

Les deux phases tectoniques principales ont découpé la partie centrale de l'île en unités limitées par de nombreuses failles linéaires verticales de direction NE-SW sur de très grandes distances, et par des cassures un peu plus diffuses et avec un moindre rejet, de direction orthogonale. On relève évidemment de nombreuses failles mineures, satellites des premières et sensiblement de même direction. TEIICHI KOBAYASHI (1954) avance que les failles majeures de la région sont encore actives ; le centre primaire de l'île se trouve dans une zone où l'accélération horizontale due aux séismes est estimée à 0,2 g.

La structure particulièrement faillée de la dorsale de l'île est très favorable à la formation de sources thermales très souvent sulfureuses. On constate souvent d'une part, que leur température est constante (voisine souvent de 80°) et que d'autre part, leur débit est indépendant des pluies.

3.2. Géologie Régionale

3.21. Aperçu géologique

La rivière Tachia, sur laquelle est situé le site du barrage de Tachien, est une des principales rivières de Formose ; elle prend sa source à 3.740 m d'altitude et coule grossièrement vers l'Ouest à travers la principale structure de l'île. Sur presque tout le long de son cours, elle est entourée de très hautes montagnes ; la pente de son lit est très importante : 2 à 3% en moyenne.

Le site est localisé dans les schistes et quartzites de la formation de Hakurei. Les quartzites sont des sédiments marins de faible profondeur comme en attestent les ripplemarks qui sont très communément visibles sur le site dans les plans de sédimentation. Les schistes ont été déposés dans une mer légèrement plus profonde en parfaite concordance. De tels dépôts offrent des changements de faciès latéraux sur de relativement faibles distances de sorte que les corrélations sont généralement difficiles.

Le réservoir est entièrement inclus dans les argilites de la formation Siutyoryu ; ces roches, en profondeur, sont denses et saines, mais les nombreux joints qui les parcourent et les fractures que l'on y trouve parfois favorisent en surface une altération importante ; le rocher s'ouvre et on signale de nombreux glissements de terrain.

A quelques kilomètres, en amont du barrage, dans le réservoir, existent deux failles majeures importantes qui n'intéressent pas l'ouvrage. Par contre, de nombreuses failles mineures, qui, en général, cisailent des bancs faibles sont fréquentes sur le site.

On passe d'une formation à l'autre, c'est-à-dire des formations feuilletées fines du réservoir aux formations plus quartzieuses du site, très graduellement ; la rivière qui, coulait dans une vallée relativement ouverte, emprunte une gorge aux parois verticales : c'est le site.

3.22. Les formations

3.221. Hakurei

Cette formation est distribuée dans la partie médiane du bassin de la Tachia. Elle est constituée de quartzites intercalés avec du schiste dont l'épaisseur est à peu près de 200 m. Les horizontales sont orientées NNE-SSW. Le pendage est amont d'une soixantaine de degrés. La grande fragilité de la formation a favorisé la création de nombreuses discontinuités.

3.222. Siutyoryu

Cette formation est composée d'argilites noires, parfois d'ardoises ; ce sont des roches assez plastiques et très susceptibles d'altération. Les joints, extrêmement nombreux, facilitent les éboulements. L'épaisseur de la formation est à peu près de 2000 m.

3.223. Formations néogènes

En discordance sur les formations précédentes, à l'aval du site, on trouve la série des formations néogènes qui forment la suite des gorges qu'emprunte la route traversant l'île d'Est en Ouest.

3.224. Les terrasses et les graviers

On trouve des terrasses d'alluvions tout le long de la Tachia, à différents niveaux. La plus importante atteint une centaine de mètres d'épaisseur et la plus mince 30 m. D'une manière générale, l'épaisseur de ces terrasses augmente de l'amont vers l'aval. Leur âge et leur faciès permet de suivre l'histoire de l'érosion de la rivière qui

est actuellement dans une phase active.

3.3. Géologie du site (figure 38)

3.31. Topographie

Le site est formé par une gorge (figure 39) creusée dans des quartzites plus ou moins épais intercalés de bancs de schistes. Les parois sont subverticales au-dessus du fond de la rivière sur presque 100 mètres, puis s'évasent en gardant malgré tout une pente de 50° rive gauche et de 65° rive droite.

Les quartzites sont très durs avec des granulométries variant depuis le sable fin jusqu'au conglomérat. Les schistes sont noirs, denses et beaucoup plus altérables avec des bandes graphiteuses et argileuses. Structuralement, le site est un simple monoclinal avec des strates de pendage 60° à 75° vers l'amont, les horizontales étant NS à NNE-SSW;

La dualité des roches dures du site, à pendage amont, et des roches plus tendres de la retenue, est à l'origine de l'existence du ruisseau du Piton qui coule à l'amont le long des couches dures et vient se jeter dans la Tachia.

Celle-ci traverse perpendiculairement les bancs durs de quartzite et tourne ensuite à angle droit pour couler parallèlement aux bancs.

Cette érosion a créé, entre les deux cours d'eau, un éperon étroit aux flancs escarpés. La stabilité de l'éperon, sous l'effet de l'eau, a été étudiée par les ingénieurs avec le même soin que celle du site lui-même où est implanté une voûte de 200 mètres de hauteur. Les problèmes posés sont un peu différents, mais les reconnaissances géologiques et géomécaniques ont été menées en parallèle.

3.32. Reconnaisances

Les campagnes de reconnaissances ont été nombreuses. En effet, le projet a d'abord été étudié par les Japonais qui ont fait quelques sondages et creusé une demi douzaine de petites galeries.

Puis le Maître de l'Oeuvre s'est orienté vers les reconnaissances par galerie, les sondages n'étant utilisés que pour une reconnaissance de la position du bed-rock par exemple.

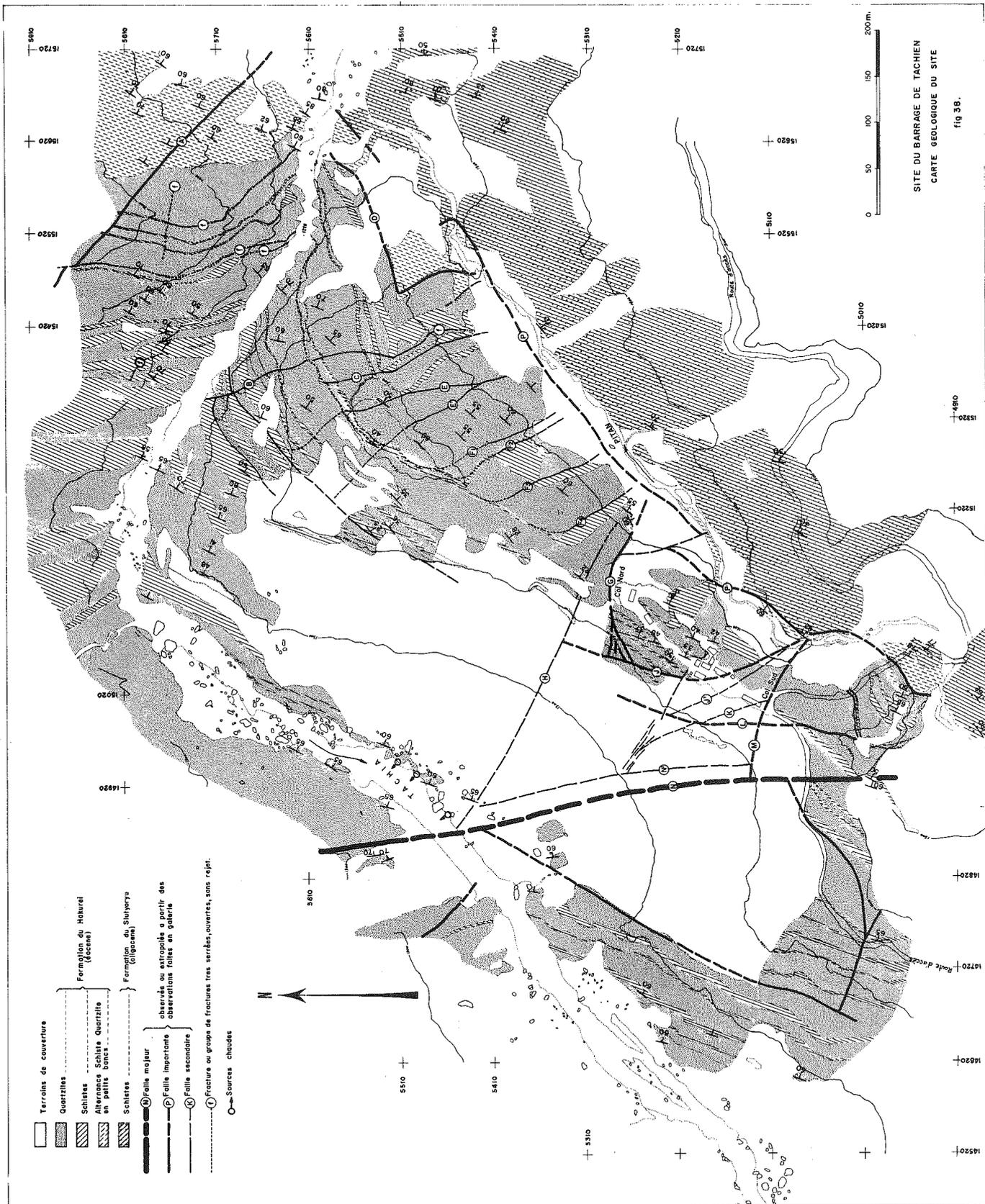
Nous ne décrivons ici que les travaux dont nous avons eu à nous occuper personnellement au cours de l'année 1962. Avant notre intervention, le projet comprenait une voûte de 237 m et un barrage auxiliaire en terre, destiné à éviter de saturer l'éperon. Pour l'étude du site, à ce stade, la gorge avait été percée de 34 galeries rive gauche et rive droite totalisant une longueur d'environ 3000 m, les rives de l'affluent amont, le Piton, étaient percées d'une cinquantaine de galeries totalisant environ 5000 m et la face aval de l'éperon d'une dizaine de galeries totalisant 800 m.

Pendant que nous étudions le site principal, la hauteur du barrage, pour des raisons économiques, a été réduite à 200 m et le barrage annexe supprimé. L'éperon étant alors baigné par l'eau, la suite des reconnaissances a été orientée vers l'étude de sa stabilité. Pour cela, 4 galeries longitudinales de 480 m chacune, situées à 4 niveaux différents, ont été excavées ainsi que 9 galeries perpendiculaires qui devaient servir d'accès.

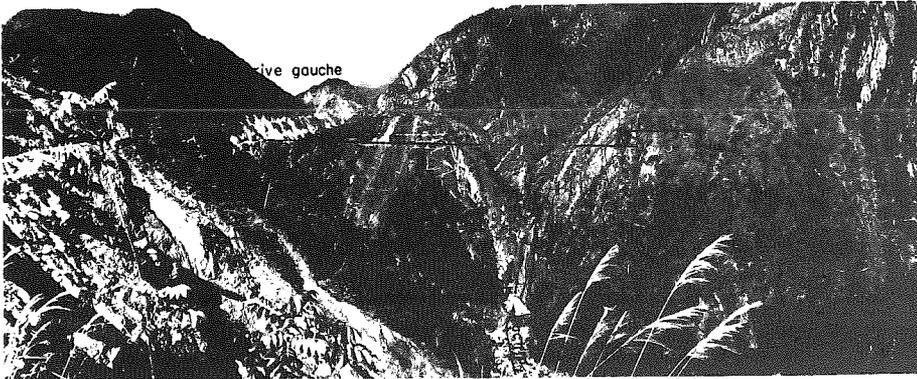
En même temps, 350 m de galeries étaient excavés pour reconnaître les tracés des évacuateurs et prises d'eau.

La figure 40 donne l'ensemble des reconnaissances effectuées ; on y reconnaît :

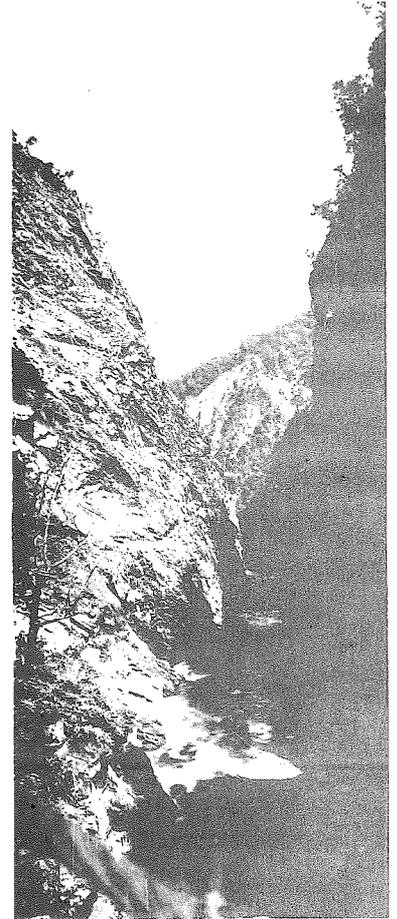
- a) Les galeries de reconnaissance de la voûte (galeries MA)



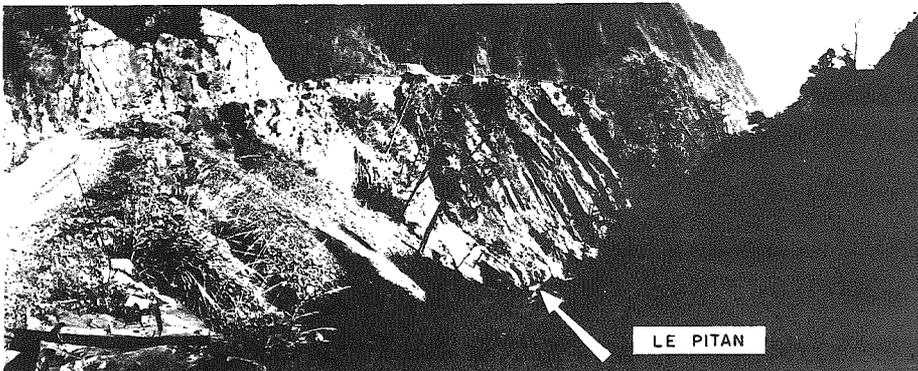
SITE DU BARRAGE DE TACHIEN
 CARTE GEOLOGIQUE DU SITE
 fig 38.



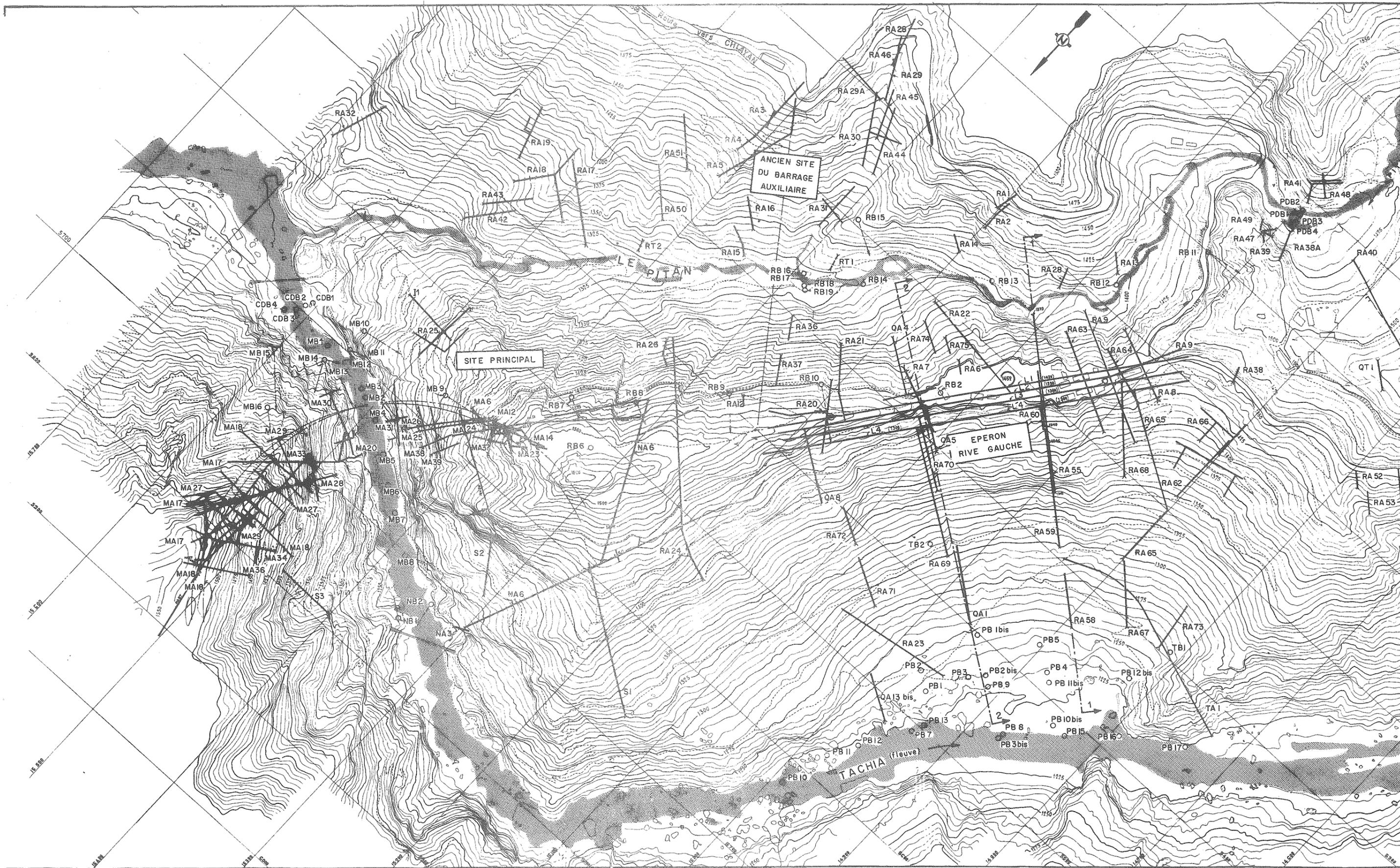
a Site principal
et éperon rive
gauche vu de
l'amont

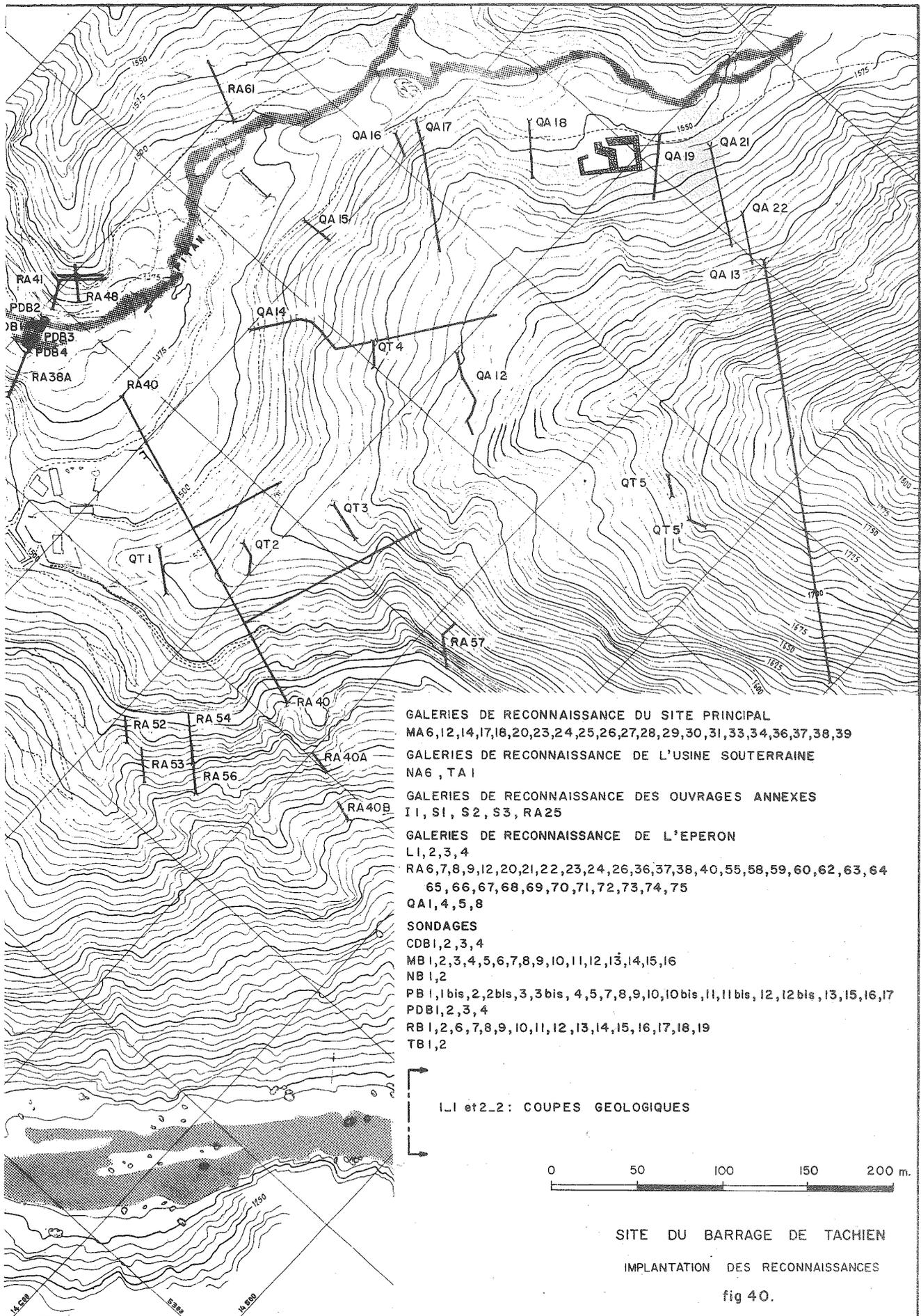


b Site principal
vu d'amont



c Face amont de
l'éperon rive
gauche vue de
la route d'ac-
cès. On remar-
quera le balan-
cement des
couches





- b) les reconnaissances **de** la rive droite du Piton (galeries RA)
- c) les reconnaissances **de** l'éperon (galeries RA, L et quelques QA)
- d) les reconnaissances effectuées pour d'éventuelles carrières (galeries QA et QT)
- e) les reconnaissances **sp**éciales effectuées pour reconnaître les tracés d'évacuateurs ou de prises d'eau à l'aide des galeries II et S1, S2, S3. La grande galerie NA 6 a été forée pour la reconnaissance d'une éventuelle usine souterraine.

Notre travail sur le site a consisté à faire **le** relevé des galeries exploitables afin de dresser une carte géologique détaillée ; en plus, nous avons dirigé **des** séries d'essais, soit sur le site principal, soit sur l'éperon pour répondre aux questions posées par l'étude de la **st**abilité des ouvrages.

3.33. Résultats des reconnaissances

Bien que les moyens de reconnaissances **ai**ent été les mêmes pour l'éperon et la gorge, nous les distinguons les uns des autres car leurs structures **décou**vertes sont assez différentes.

3.331. Le site principal (fondations de la voûte)

a) les couches

Le massif est formé d'une succession de **ban**cs de quartzite moyennement grenus à cassure claire, d'épaisseur 5 à 15 m, de bancs de schistes plus tendres **de** 1 à 5 m et de bancs de composition intermédiaire ; de plus, 5 lits minces (0,10 m à 1,00 m) de matériaux **pl**astiques graphiteux ont été reconnus. Le pendage des couches dans les zones saines est constant : 65° ESE, **hor**izontales NNE-SSW.

Etant donné la rapidité de succession des **ban**cs et leur variation de faciès, il ne nous a pas paru possible de présenter la série stratigraphique ; la carte **g**éologique de la figure 38 rend compte des bancs principaux.

b) diaclasses et joints

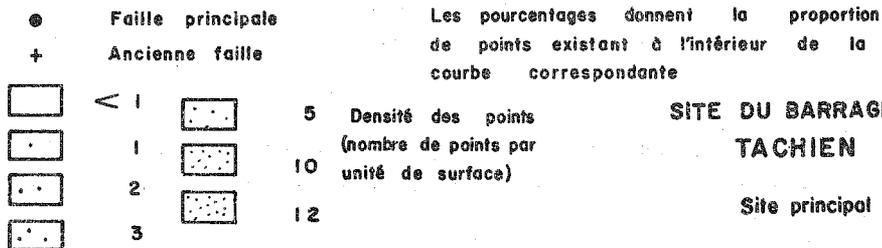
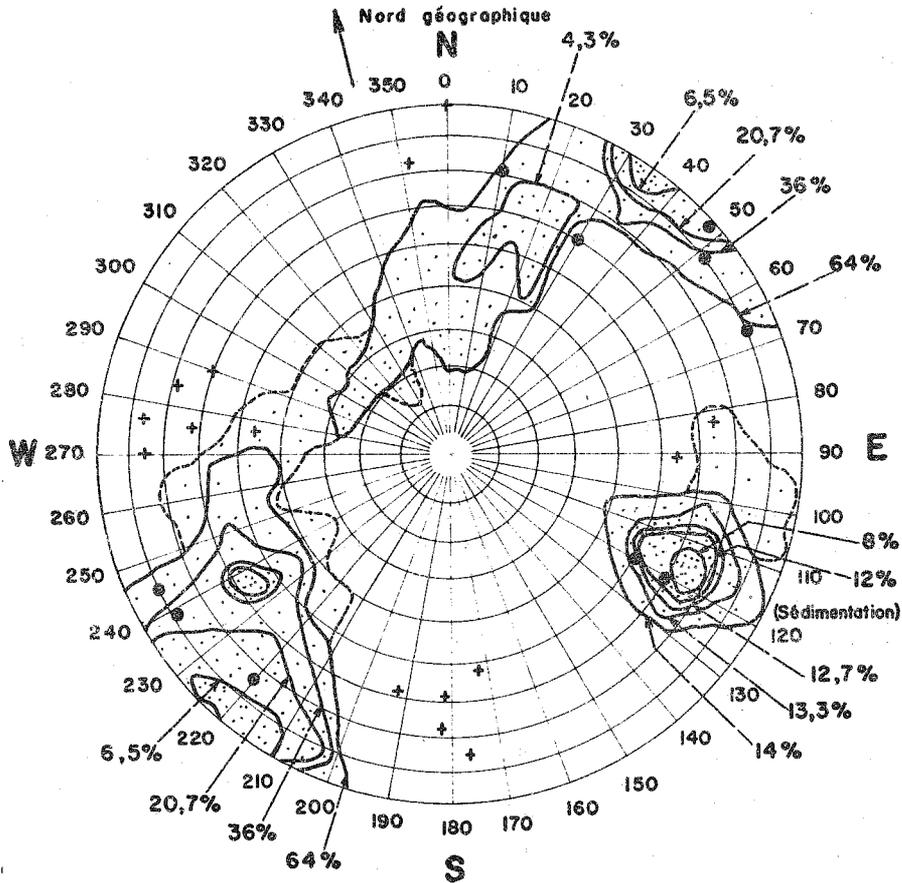
Les diaclasses et les joints de **séd**imentation sont nombreux. Nous avons obtenu leur direction moyenne par une série de mesures nombreuses statistiques **don**t le résultat est mis sous forme de diagramme polaire (figure 41). On y reconnaît les joints de sédimentation, très **con**centrés :

Horizontale NNE-SSW
Pente 60° à 70° ESE

et un réseau de joints à tendance verticale **orient**é SE-NW. Il faut aussi mentionner quelques autres surfaces, plus diffuses, orientées NE-SW, avec une pente **de** 20° à 30°.

c) les failles

La structure du site principal est calme ; **é**tant donné les pentes raides, le rocher affleure partout. Les failles relevées, sur le site, appartiennent très **dist**inctement soit au même réseau que les joints verticaux, soit au pendage des couches qui ont été cisaillées **dans** leur plan de faiblesse. Elles ont des rejets extrêmement faibles. En profondeur, elles sont assez irrégulières et toujours soulignées par des produits argileux ; les épontes sont très vite saines. Ces failles semblent toutes **du** même âge ; elles sont dues probablement au paroxysme pléistocène. Un autre type de failles, d'allure **toute** différente, peut passer inaperçu. Le diagramme de la figure 41 donne leur direction : EW ou NS à **forte** inclinaison. Ce sont sans doute de vieux accidents datant du Néogène inférieur, car ils sont recoupés par les **acc**idents précédents. Ils sont très irréguliers et toujours parfai-



SITE DU BARRAGE DE TACHÏEN
Site principal

tement cimentés par du quartz bien cristallisé.

Le nombre des failles étendues est très réduit. En particulier, il ne semble pas qu'il y ait à craindre un accident de ce genre dans le lit de la rivière. D'une part, les sondages effectués ont montré un rocher exempt de matières broyées ou d'argile, d'autre part, on peut aisément trouver une corrélation géométrique entre les bancs de la rive droite et ceux de la rive gauche.

Sur le plan de la figure 38, nous avons cartographié les accidents :

Zone "A" - C'est un groupe de failles parfois réunies en un seul accident, parfois divisées en 3 cisaillements distants de 2 à 3 mètres. En général, verticales ou très légèrement NW, elles ont un remplissage peu plastique de 0,30 m maximum. Les épontes sont peu altérées. Leur irrégularité de direction est telle que parfois sur quelques mètres, elles se poursuivent dans le plan de sédimentation en tournant de 90° avant de reprendre leur direction générale, adoptant une forme en marche d'escalier.

Faïlle "B" - Cet accident affecte le rocher sur 2 à 3 cm seulement. Il baille en surface, mais ne s'étend pas en profondeur. De même que A, il se relaie souvent, sur quelques mètres, dans un interbanc plastique.

Faille "C" - C'est un petit accident très net et très fermé à l'amont. En profondeur, il se ferme aussi. A l'aval, il vient buter sur un interbanc argileux cisailé.

Faille "D" - Cet accident, au Nord, est légèrement sécant aux bancs. Par contre, au Sud, il emprunte un banc plus tendre qu'il a cisailé et affecté sur 1,00 m. On note quelques traces d'argile dans la zone altérée.

d) fracturation

Outre la présence de ces quelques failles, dont l'incidence sur la voûte a été envisagée par les ingénieurs, un autre phénomène mérite une attention spéciale : par effet de surface, les joints existants s'ouvrent et la poussée au vide, due à la raideur des pentes, crée des zones basculées, parfois instables, séparées par de profondes fractures ouvertes. La cartographie des zones ouvertes en surface et dans les galeries, a permis de tracer la limite probable du rocher sain. La coupe de la figure 42, extraite des cahiers de coupes horizontales, donne pour le niveau 1450, un aspect des observations faites. On a ainsi pu obtenir, pour de très nombreux niveaux, la structure du site, ce qui a permis aux ingénieurs d'estimer, avec le maximum de rigueur, la position du fond de fouille de l'ouvrage.

Les fractures appartiennent presque toutes au réseau SSE-NNW subvertical ; certaines d'entre elles ont pu être recoupées par deux ou trois galeries à des niveaux différents mais, en profondeur, elles se ferment normalement sans produits plastiques.

e) conséquences pour la suite de l'étude

M. GIGNOUX et R. BARBIER (1955), p. 156, ont attiré l'attention des projeteurs sur les zones de fondation à structure hétérogène qui seront, en principe, moins favorables que celles à roches homogènes.

La pluralité de roches (quartzites, schistes et graphites) a donc conduit à soigner particulièrement l'étude des déformations d'une part et l'étude de petits bancs plastiques d'autre part.

Deux sortes d'essais ont été élaborés à cette fin :

- a) des essais de charge par vérin
- b) des essais d'érosion, de gonflement et de libération de contrainte aux alentours des lits d'argile graphiteuse. Les résultats sont analysés au chapitre B.

3.332. L'éperon

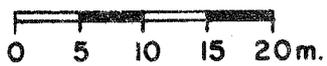
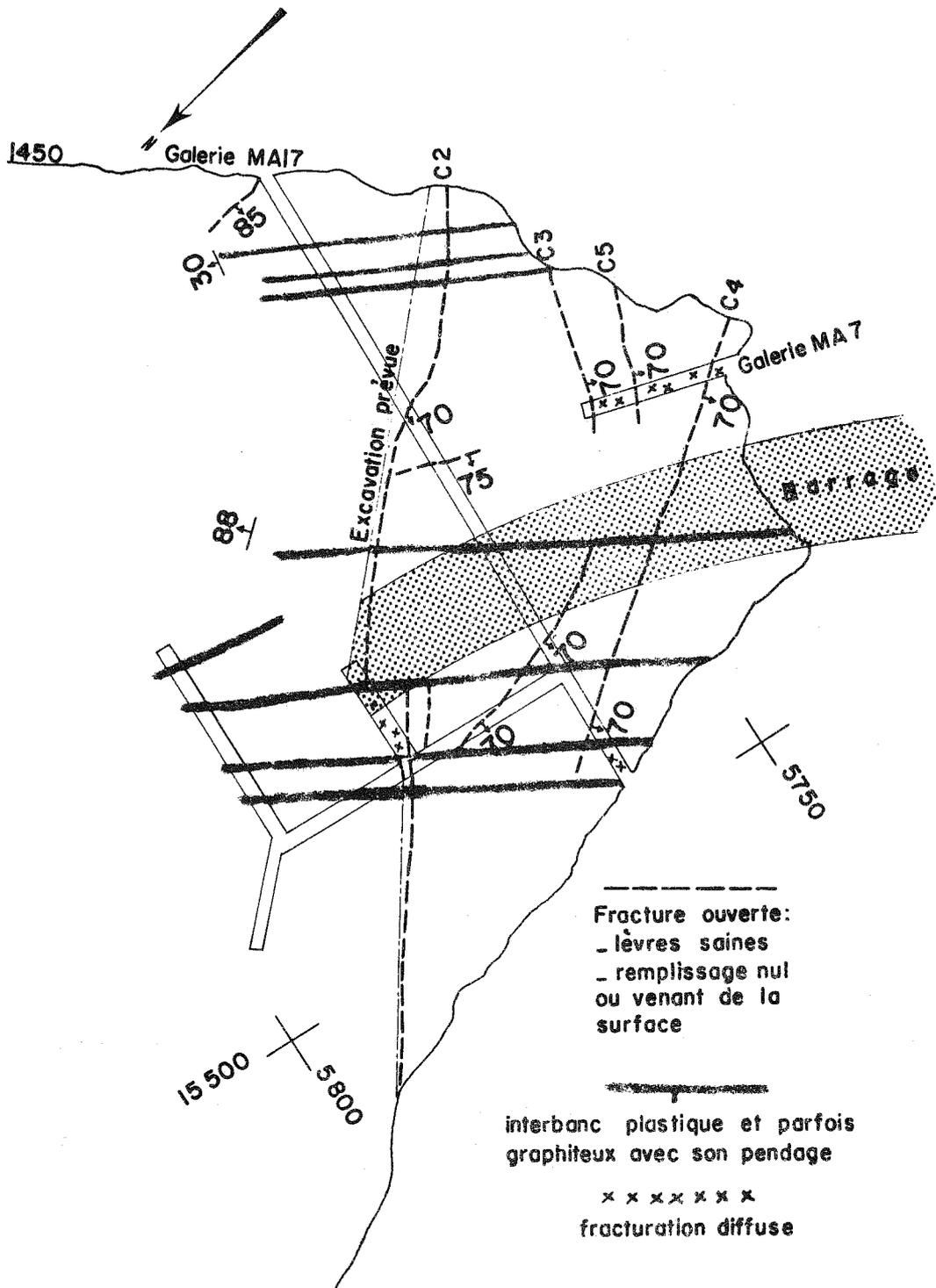
En fait c'est lui qui constitue le problème essentiel du site depuis que la digue auxiliaire qui devait l'isoler de la retenue a été supprimée.

En effet, sur la coupe de la figure 44, on peut voir que cet éperon est à peine plus étoffé qu'un barrage-poids, et comme il formera un barrage naturel de plus de 200 m de hauteur, sa structure doit être étudiée avec beaucoup de soin. Nous avons vu que les reconnaissances qui ont été faites permettent de la préciser convenablement.

a) Structure

La carte géologique de la figure 38 montre la structure de l'éperon : couches NS à pendage 60° Est dans la masse. Les roches constitutives ont le même faciès de base que celles du site dont elles sont la continuation : ce sont des alternances de bancs de quartzites, de schistes et de schistes quartzeux ; on retrouve de même les bancs argilo-graphiteux interstratifiés.

Alors que le site principal a une structure relativement calme, celle de l'éperon est tourmentée par de très nombreuses failles ; leur orientation est extrêmement variable, mais on peut toutefois reconnaître sur le diagramme statistique (figure 43):



SITE DU BARRAGE DE TACHIEN
FRACTURATION AU NIVEAU 1450

Rive droite

fig 42.

- le pendage des couches
- des directions concordantes avec le réseau de diaclases subverticales SSE-NNW,

Sur le plan de la figure 38, nous avons cartographié les accidents principaux relevés sur les affleurements ou extrapolés à partir des galeries. On peut ainsi voir la très grande complexité de la structure de l'éperon.

Failles E - E' - Ces accidents sont très nets et comportent à l'amont un remplissage plastique de quelques centimètres.

En-dessous de la cote 1400, ils se combinent pour devenir une seule et même faille. A l'aval, la zone affectée autour de l'accident lui-même, augmente et on peut relever des traces de broyage sur plusieurs mètres d'épaisseur avant qu'il ne disparaisse dans un interbanc plastique de 0,50 m très cisailé.

Failles F1 - F2 - F3 - F4 - Sensiblement parallèles, ces accidents n'ont qu'un faible remplissage à l'amont et deviennent des zones broyées à l'aval avant de passer dans un banc argileux cisailé.

Faille G - C'est une faille importante dont le pendage moyen est de 75° à l'amont et au-dessus de la cote 1425. A l'aval et en-dessous de cette cote, elle se couche jusqu'à 50° avant de venir buter sur la faille "J" par l'intermédiaire d'une zone très broyée.

Faille H - Le remplissage plastique de cet accident est parfois important (0,50 m) au-dessous de la cote 1400. Au-dessus, le rocher est broyé sur quelques mètres sans plans bien marqués.

Faille J - C'est un gros accident qui passe dans un banc argileux au Nord ; en général le remplissage plastique atteint 0,50 m et le rocher est très cassé sur 7 à 8 m de chaque côté de l'accident proprement dit.

Faille J' - C'est un accident annexe de J ; son type est pourtant différent ; pas de remplissage plastique et épontes saines.

Faille K - C'est un accident dont le remplissage plastique peut être important (0,50 m à 1 m) mais dont les épontes sont saines. En profondeur, il se ferme et vient buter sur M.

Faille L - Le remplissage plastique de cet accident est également épais. Au Nord, la faille tourne pour venir dans un interbanc argilo-graphiteux cristallisé.

Faille M - C'est une zone de 5 à 10 m où le quartzite est extrêmement broyé. Chaque petit morceau est souligné par un film argileux blanchâtre très plastique.

Faille N - C'est un très gros accident qui s'étend loin. La zone affectée est de 10 à 20 m, mais se réduit au Nord quand la nature du terrain est moyennement plus schisteuse. Cet accident est à l'origine du tracé du ruisseau du Piton dans sa partie amont. La zone de rocher très broyé, qui souligne l'accident, a été érodée plus facilement, ce qui explique la dépression et la grosse épaisseur de terrain de couverture sur la face aval de l'éperon, au passage de la faille.

Faille N' - Satellite de N, elle vient buter sur M et sur H. Son remplissage est parfois important.

Faille P - C'est une zone de cisaillement faisant transition entre les deux formations du site et de la retenue. Au Sud, elle semble se redresser très fortement.

Ce sont ces failles qui ont modelé l'éperon. En particulier, la présence des deux petits cols (col Nord et col Sud) est due à la traversée de failles redressées du type SSE-NNW qui viennent buter sur un banc cisailé qui

relaie alors le déplacement dans une direction différente. Le remplissage des failles ou même parfois la zone de roches broyées qui les souligne, ont fait l'objet d'essais qui seront décrits au chapitre B. Il semble que ces remplissages soient stables quant à l'action de l'eau (gonflement, altérabilité).

Outre les failles, on note aussi des diaclases qui sont nombreuses mais ont des directions plus floues que sur le site principal. Le diagramme de la figure 43 fait cependant ressortir un réseau SE-NW presque vertical.

b) Stabilité des pentes

La présence de ces discontinuités, et probablement aussi la pluralité des qualités des roches constitutives ont donné à l'éperon une allure bien caractéristique qui a tout de suite alerté les ingénieurs : à l'amont, des surfaces structurales de quartzite délimitent une pente dont l'angle diminue très distinctement avec l'altitude. Il y a eu basculement des couches par gravité ; à l'aval, la pente est beaucoup plus irrégulière, parfois verticale, parfois plus douce et recouverte d'éboulis ; on note également ici, un fauchage des couches dont certaines arrivent à être horizontales.

Cette variation de pendage n'est certainement pas d'origine tectonique ancienne, mais due à la poussée - au vide des bancs fortement inclinés. Ce phénomène signalé déjà par M. LUGEON (1933) est bien connu.

Les nombreuses galeries qui sillonnent l'éperon ont permis de définir quelques sections ; la figure 44 montre une d'entre elles. On a ainsi pu isoler 3 parties :

- le cœur, réputé sain
- une zone intermédiaire moyenne, encore en place mais dont le pendage des lits n'est plus le pendage originel
- une zone extérieure affaissée et fissurée.

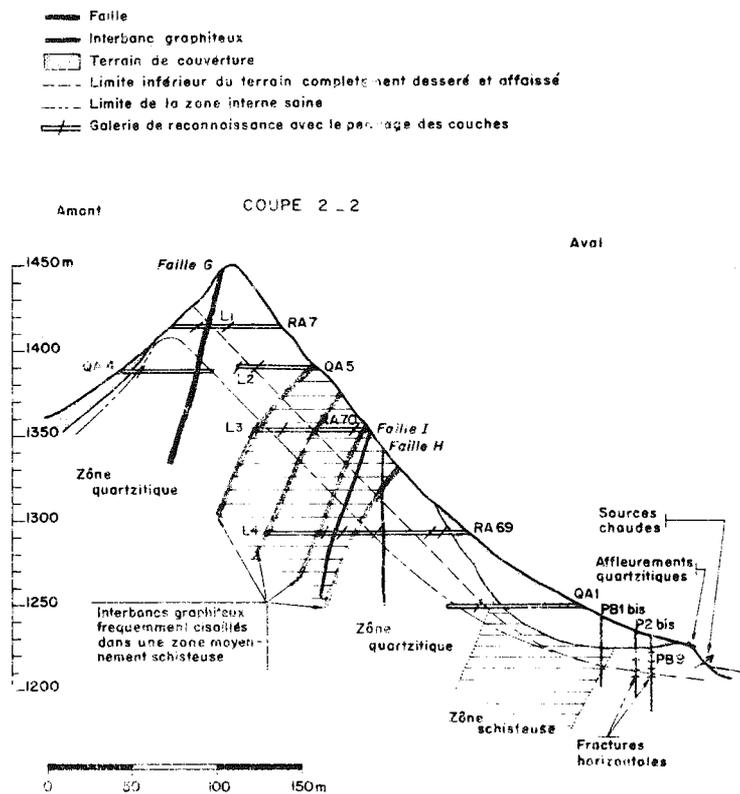
Dans la zone externe, les observations des différentes galeries qui la traversent montrent que les fissures ouvertes n'ont pas le même aspect dans les roches de qualité différente. Dans le quartzite, les fissures ont un pendage de 20° à 25° vers l'extérieur près du talus aval ; dans les niveaux schisteux, les fissures sont moins étendues mais plus ouvertes, plus irrégulières et souvent verticales. Le phénomène est tout particulièrement remarquable dans la galerie RA 69.

Il nous paraît intéressant de relier les observations que nous avons faites sur l'éperon avec celles faites ailleurs par MULLER (1963 b - 1964) et par STINI (1962). Ces auteurs ont trouvé qu'il existait dans une forte pente, des zones de tensions réparties au 1/3 inférieur du talus ; il s'agit en fait d'une des contraintes principales, l'autre restant une compression. Ils en déduisent que la destruction de la pente est un phénomène ébouléux d'avance vers la vallée, avec distorsion des éléments en cours de mouvement.

Sur l'éperon rive gauche de TACHIEN, nos observations sont les suivantes :

- pas de fractures ouvertes, verticales, en arrière de la crête du talus sur la plateforme décapée.
- pas de traces de glissement dans les fractures observées dans les galeries. Ces fractures sont peu étendues, très irrégulières et nous n'avons pas pu faire de corrélation entre galeries.
- les galeries basses et les sondages au pied du talus montrent des fissures ouvertes horizontales.
- les éboulis de pied sont exempts de gros blocs, et la pente n'est pas boisée, alors que les surfaces, de part et d'autre, sont couvertes de végétation.

Il peut alors s'agir d'un baillement de la partie inférieure du talus, sans apparition de plan de cisaillement étendu. La destruction du talus est lente et continue.



SITE DU BARRAGE DE TACHIEN ... COUPE DE L'EPERON fig 44

Au pied aval de l'éperon, des sources chaudes sulfureuses existent. Il n'est pas possible de trouver une corrélation certaine entre leur débit et la pluviométrie locale ; de même, leur température, 80°, est remarquablement constante. Ce sont donc des venues profondes, mais leur apparition à cet endroit est peut-être liée à la fracturation de pied de la pente signalée par MULLER (1963a) dans d'autres cas.

3.4. Résumé

Les reconnaissances, tant du site principal que de l'éperon, ont permis de fixer convenablement la géométrie du massif.

Le pendage des couches, les réseaux de diaclases, les fractures et les failles ont circonscrit des zones de rocher sain, que les projeteurs utilisent pour définir les fouilles du barrage et les protections assurant la stabilité de l'éperon.

Des essais, dont il sera question au chapitre B, sont faits pour donner une base de comparaison dans l'étude des différentes catégories de roches rencontrées (essais au vérin et sur échantillon) et pour chercher à connaître la réaction à l'eau des parties faibles du massif (remplissages argileux des failles et lits argilo-graphiteux).

La galerie, employée comme instrument de reconnaissance, a été utilisée au maximum.

Nous avons pu ainsi acquérir de la structure du site, une idée bien supérieure à celle qu'aurait permis d'obtenir une campagne de sondages.

II - PARTICULARITES FONDAMENTALES DES TROIS SITES ETUDIES

ET

COMPARAISON DES MOYENS DE RECONNAISSANCES UTILISEES

Nous venons de faire l'étude détaillée de trois sites de caractéristiques très différentes, tant au point de vue topographique que géologique. Nous allons pouvoir dégager d'utiles renseignements de cette étude ; mais nous pouvons également tirer quelques conclusions pratiques instructives de la comparaison des différents moyens de reconnaissance employés.

1. SITE DU BARRAGE DE MALPASSET

- La tâche d'analyser la fondation du barrage est à la fois simplifiée et compliquée par la catastrophe qui, d'une part a mis à jour une très grande surface de rocher invisible avant, et d'autre part, peut conduire à porter des jugements trop hâtifs sur les facteurs prédominants entrant dans l'analyse des causes de l'accident.

- La géologie régionale nous a montré que la caractéristique majeure du massif était une certaine instabilité tectonique caractérisée par le rejeu successif de vieilles failles. Il faut y ajouter la longue émergence du massif avant son enfouissement et son érosion récente, qui a dû favoriser des formes d'altération particulières.

- Le relevé de la géologie de détail est grandement facilité par le décapage général du site. Les quelques ouvrages de reconnaissances profonds (puits, galeries, sondages) ne viennent que préciser les structures.

- La roche est un gneiss riche en éléments phylliteux, pauvre en feldspath, dont la texture particulière, due à la foliation, peut le faire confondre avec un micaschiste. La matrice rocheuse se caractérise par une altération des micas qui donne à la roche sa couleur spéciale et par une intense fissuration que soulignent, à très petite échelle, la foliation et à échelle plus grande, les petites diaclases très serrées.

La structure du site est dominée par un maillage exceptionnellement dense de cisaillements et de failles appartenant souvent à deux réseaux : un à tendance NS et un autre plus récent à tendance EW. Les remplissages de ces accidents sont également remarquables : ce sont des mylonites et des brèches à ciment argileux.

2. SITE DU BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD

- Les conditions techniques locales rencontrées en Afrique du Sud pendant la période de reconnaissance des fondations du barrage ont imposé les sondages comme principal moyen de reconnaissance ; les galeries n'ont été utilisées que comme contrôle et en vue d'effectuer des essais. A l'aide de tranchées, on a pu acquérir une bonne connaissance de la surface du massif rocheux.

- La géologie régionale a révélé une totale absence de faille ; l'étude du mode de mise en place des matériaux éruptifs formant la fondation de l'ouvrage laisse prévoir la possibilité de contraintes internes résiduelles.

- La géologie de détail est traduite à l'aide de coupes verticales orthogonales serrées, car tous les sondages ont été implantés suivant un carroyage systématique.

La roche de fondation est une dolérite à grain moyen qui repose sur une argilite à sédimentation horizontale. Le contact est très bon. Sur 3 à 10 mètres en général, l'argilite a été cuite, ce qui lui donne des caractéristiques améliorées formant zone de transition.

La structure du site est simple dans son ensemble, mais l'ondulation des contacts nous a obligés à multiplier les sondages. Les diaclases forment des réseaux bien définis, le premier presque horizontal et deux autres verticaux et orthogonaux.

3. LE SITE DU BARRAGE DE TACHIEN

- Dans le cas de cette étude, il faut distinguer le problème des fondations de l'ouvrage principal, une voûte de 200 mètres de haut et celui de la stabilité d'un éperon rocheux au large. Principalement pour des raisons économiques, les reconnaissances ont été en majorité effectuées à l'aide de galeries. Les pentes raides offrent des affleurements de qualité, par contre les surfaces moins raides sont couvertes de terre masquant la surface du rocher.

- L'étude géologique générale a montré que deux phases tectoniques s'étaient produites après la mise en place des terrains formant le site ; les accidents qui ont résulté de l'ajustement du massif au cours de ces phases peuvent être classés en deux types : les premiers, les plus anciens, sont bien cimentés par du quartz, les seconds sont souvent soulignés d'argile et certains d'entre eux peuvent encore être actifs.

- La géologie de détail du site principal a été traduite à l'aide de coupes horizontales faites au niveau de chaque galerie. Dans le cas de l'éperon, nous avons dû tracer des coupes verticales, utilisées pour des épures de stabilité, les reconnaissances étant préférentiellement implantées dans une série de plans verticaux.

La roche de fondation est un mélange interstratifié de bancs de quartzite durs et de schistes parfois argileux ou graphiteux. Dans sa masse, le rocher est compact et très sain.

La structure du site principal est simple : c'est un monoclin à pendage amont de 60° coupé par quelques accidents mineurs très ondulés. L'éperon présente la même caractéristique de pendage de couches, mais les failles y sont extrêmement nombreuses. Elles créent des zones verticales broyées et argileuses qui ont facilité le fauchage des couches vers l'aval avec ouverture de fissures sur une plus grande épaisseur.

4. IMPORTANCE DES CARACTERES GEOLOGIQUES REGIONAUX

4.1.

L'étude géologique générale d'un massif est un facteur important de l'analyse. Il nous semble nécessaire de distinguer la formation du terrain de son histoire ultérieure.

En effet, dans le cas de la dolérite par exemple, les types de roches obtenus et les tensions internes rémanentes sont fonction de la vitesse de mise en place et de refroidissement ; il semble même que l'altérabilité soit également liée aux variations de mise en place.

L'histoire du massif fait ressortir des cycles de paroxysmes tectoniques et des relaxations. Les efforts se succèdent en grandissant au gré des plissements ou des sédimentations et en diminuant avec les périodes de calme et d'érosion. Nous avons vu que la structure des sites reflétait fidèlement les phases de leur histoire géologique : failles nombreuses se coupant les unes les autres à Malpasset, failles groupées en deux types à Tachien, absence de faille à Hendrik Verwoerd.

Si elle ne peut pas fournir la clef du problème, l'étude régionale fournit, toutefois, un guide précieux pour la recherche des défauts structuraux du site.

4.2.

A l'échelle du site, nous avons vu successivement apparaître l'influence prépondérante de la matrice dans le cas de Malpasset, des diaclases, fractures et failles, dans le cas de Tachien, de la dualité de roches dans le

cas de Hendrik Verwoerd.

Nous aborderons ainsi des problèmes différents qui devront être étudiés avec des techniques d'essais différentes. Néanmoins, on peut affirmer qu'une étude pétrographique et l'étude de détail des discontinuités et de leur origine sont nécessaires dans tous les cas.

5. ETUDE COMPARATIVE DES MOYENS DE RECONNAISSANCE

5.1. Généralités

Dans les cas envisagés, les reconnaissances ont été effectuées par des moyens très particuliers chaque fois. On ne peut pas définir de moyen idéal de reconnaissances car celles-ci dépendent :

a) - de la structure du massif rencontré. A Tachien, la recherche des zones ouvertes, les mesures de déviations de pendage et de la fracturation n'auraient pas été aussi rigoureuses dans un forage que dans une galerie. Par contre, sur le site de Hendrik Verwoerd, la définition de la géométrie des contacts ne pouvait être faite que par forages.

b) - des possibilités du chantier. Il s'est trouvé que l'excavation de galeries à Formose était plus économique que les forages ; en Afrique du Sud, l'emploi de ceux-ci était plus fréquent alors que celui des galeries n'était qu'exceptionnel en génie civil.

c) - du genre de barrage envisagé. Nous avons analysé trois fondations de voûtes en béton, mais on conçoit bien que l'étude de fondation de barrages en terre ne demanderait pas les mêmes reconnaissances.

5.2.

A la suite d'une série de reconnaissances géologiques complètes de sites de barrages, il nous semble intéressant de dégager brièvement quelques observations faites sur les chantiers.

5.21. Les travaux de surface

C'est la première étape de la série des reconnaissances. Parmi elles, il en est une qui doit être systématique : c'est le déboisement qui doit intéresser une surface débordant largement le site à l'aval et à l'amont. Si, sur le site aride du barrage de Hendrik Verwoerd, ce travail était réduit, par contre, sur les pentes douces de l'éperon de Tachien, la végétation était si dense que l'on dû se contenter d'un quadrillage de layons de 2,00 m de large.

Les tranchées et les décapages forment la suite logique du déboisement. Cependant, nous avons trouvé que si les affleurements ne forment pas plus de 50% de la surface dégagée, c'est souvent le signe de grandes épaisseurs de terrains de couverture qui condamne alors le procédé. Dans le cas contraire, le but est de former un maillage continu, auquel n'échapperont pas les accidents découpant le site. Il n'est pas nécessaire d'atteindre la surface de rocher sain : en effet, une roche altérée, mais en place, livre parfaitement sa structure. Sur le site de Hendrik Verwoerd, seulement 12% des 2000 m de tranchées ont touché le rocher sain.

Nous avons trouvé que dans le cas d'un site de barrage, l'échelle la plus commode pour le relevé géologique détaillé d'une tranchée était le 1/50 ou le 1/100, le rapport sur le plan général du site se faisant au 1/500 ou au 1/1000 si le site est vaste.

5.22. Les reconnaissances en profondeur

Nous avons disposé de galeries et de sondages. Nous avons toujours implanté ces ouvrages en collaboration avec l'ingénieur projeteur, afin de leur garder un maximum d'efficacité ; certaines galeries par exemple seront réutilisées par la suite dans le voile de drainage.

5.221. Les sondages

Ce sont des reconnaissances idéales pour définir les contacts, les terrains de couverture, les altérations, les gros accidents ; mais il ne faut jamais en faire l'instrument unique de définition du massif. Dans tous les cas, même si la géométrie des surfaces que l'on cherche à définir est très complexe ; on cherchera à implanter les sondages suivant un quadrillage systématique : les coupes en seront grandement simplifiées.

Nous avons pu faire les observations suivantes au cours de séjours sur le chantier :

a) - la dimension minimale d'une carotte doit être de diamètre Bx (41 mm). En-dessous, la qualité de l'échantillon est telle qu'on peut se poser la question de son utilité.

b) - la sondeuse doit être scellée pour éviter toute vibration nuisible à la bonne tenue de la carotte et, dans le cas de terrains hétérogènes, on doit imposer la boue légère de forage.

c) - le géologue doit dialoguer avec le sondeur dont l'expérience, souvent masquée par un vocabulaire rudimentaire, est pourtant très précieuse. *Pour que le géologue, ingénieur ?..*

d) - le relevé de la carotte se fait au 1/50 ; tout doit figurer (discontinuités avec leur position, angle et remplissage, pourcentage de carottage, nature des éléments, etc...).

e) - à l'occasion d'essais d'eau, on devra essayer d'employer une méthode conforme aux essais lugeon mondialement en usage, mais dans certains cas, on aura toujours avantage à demander, pour un niveau d'essais donné, des pressions largement supérieures aux 10 bars communément utilisés et des temps d'essais bien supérieurs aux 10 minutes prescrites dans l'essai type.

f) - il est impératif que les trous de forage situés à l'amont de l'ouvrage, soient injectés avant la mise en eau. En effet, ils pourraient créer des cheminements préférentiels pour les sous-pressions ou même créer des fuites gênantes lors des opérations d'injection. Nous avons trouvé pratique de leur garder un bout de tubage de 0,50 m à 1,00 m peint en blanc, qui forme ainsi un excellent repère pendant la phase de reconnaissance et permet de localiser le trou au moment de l'injection.

5.222. Les galeries

Leur utilisation est souvent orientée vers la définition des qualités physiques du massif. Aussi, aura-t-on toujours avantage à noter les vitesses d'avancement, les consommations d'explosif, la forme et la taille des déblais obtenus.

Le relevé des faces de galeries se fait au 1/50 après un lavage énergétique.

5.223. Les puits.

En général, il vaut mieux éviter de faire du puits le seul moyen de reconnaissance. Ce sera un moyen d'accès à une galerie basse par exemple et les renseignements qu'il fournira seront en supplément. Le relevé se fait également au 1/50.

Nous avons trouvé qu'on ne pouvait pas faire le relevé géologique de plus de 50 m de galerie ou de puits par jour.

5.3. Comparaison entre les prix des sondages et des galeries

En dépouillant les différents prix des marchés de reconnaissances, nous avons trouvé :

- a) - qu'un mètre de galerie vaut 5 à 10 m de sondages très ordinaires, carottés, avec essai d'eau.
- b) - que si l'on exige un carottage parfait, le prix du mètre de sondage peut valoir le prix d'un mètre de galerie.

Contrairement à l'opinion trop souvent admise, ce n'est pas le prix qui doit permettre de choisir entre les deux types de reconnaissance, mais les délais d'exécution, la profondeur désirée et le type d'information souhaitée.

III - GEOLOGIE SOMMAIRE
ET
CARACTERISTIQUES ESSENTIELLES DE QUELQUES AUTRES SITES

Tant au cours de l'étude des échantillons que de celle des essais en place, nous serons amenés à comparer les résultats que nous avons obtenus sur les trois sites décrits précédemment avec des résultats acquis sur d'autres sites.

Dans ce chapitre, nous allons non plus étudier la géologie du site dans son ensemble, mais surtout insister sur un point particulier : structure, pétrographie... , qui a suscité la comparaison.

Le tableau ci-après donne les caractéristiques des ouvrages retenus qui sont, soit à l'état de projet, soit en cours d'exécution, soit déjà en exploitation.

SITE	SITUATION	TYPE	HAUTEUR	ETAT	TYPES D'ESSAIS EFFECTUES
LAOUZAS	France	voûte	50 m	construit	in situ (vérin)
BESERVE	"	enrochements	70 m	"	" "
MONTEYNARD	"	voûte	150 m	"	" (vérin, échantillons)
GREOUX	"	enrochements	67 m	"	" (vérin)
GITTAZ	"	voûte épaisse	66 m	en cours	" (vérin, sismique)
ST-CASSIEN	"	terre	66 m	construit	" " "
VAN DER KLOOF	Afrique du Sud	voûte	105 m	projet	" " "
STE-CROIX	France	voûte	110 m	"	" " "
ST-JEAN DU GARD	"	enrochements	60 m	"	" (sismique)
KARDJALI	Bulgarie	voûte	100 m	construit	" "
KASSEB	Tunisie	voûte	57 m	en cours	" "
LANOUX	France	voûte	45 m	construit	" (sismique, vérin)
GRANDVAL	"	voûtes multiples	85 m	"	échantillons
YATE	Nle-Calédonie	voûte	57 m	"	"
ST-CHAMOND	France	voûte	45 m	"	"
SALAGOU	"	enrochements	70 m	en cours	"
NAGUILHES	"	voûte	60 m	construit	"
KYLE	Rhodésie	voûte	65 m	"	"
BANGALA	"	voûte	53 m	"	"

1. SITE DU BARRAGE DE LAOUZAS

Le barrage sur la Vèbre est implanté dans le granite du massif de l'Espinouisse, à 50 km au NW de Béziers. Le rocher de fondation se classe entre deux types extrêmes :

- granite clair à grandes taches de cordiérite
- roche à texture contournée (nébulite), micacée, foncée.

La roche est affectée de cassures verticales ou fortement pentées (70°) et par des cassures sensiblement parallèles aux versants. Particulièrement dans ses parties hautes, le rocher est parfois altéré.

La maille des discontinuités est inférieure au mètre.

2. SITE DU BARRAGE DE BESSERVE

La vallée de la Sioule est taillée dans un granite à biotite formant, à 30 km au NW de Clermont-Ferrand, un plateau dans lequel s'est enfoncée la rivière. La matrice rocheuse est bonne, mais la fracturation a fait du massif un ensemble très altéré, parfois jusqu'à 30 mètres de la surface.

On connaît deux failles principales perpendiculaires à la vallée, encadrant le site.

Sur le site même, la division du rocher est extrême ; il n'est pas possible de trouver des réseaux de direction donnée. En particulier, les blocs rocheux visibles en surface sont isolés en tous sens par des zones de rocher altéré ou broyé. Les mailles des discontinuités sont très faibles, souvent inférieures au mètre.

Dans un tel matériau, l'altération peut cheminer profondément, ce qui explique que beaucoup de joints profonds soient oxydés.

3. SITE DU BARRAGE DE MONTEYNARD

Le site est formé par une gorge étroite creusée par le Drac, à 30 km au Sud de Grenoble, dans les calcaires marneux, relativement homogènes du Lias. Le pendage peu apparent, est de 45° aval.

De grandes failles existent et découpent régulièrement le site. Elles sont sensiblement verticales, très légèrement obliques par rapport à l'axe de la rivière. Un autre réseau, fermé et plus diffus, existe, perpendiculairement au premier.

Des fractures doublent les failles (elles sont de la même famille), et, par poussée au vide, se sont ouvertes, découpant l'appui en tranches parallèles d'une vingtaine de mètres d'épaisseur.

A une échelle plus petite, de nombreux joints, satellites des accidents majeurs, existent mais sont en général fermés. La maille moyenne est de 2 à 3 m pour les grands, un mètre pour les petits qui ne font pas toute la largeur d'une galerie.

Les blocs ayant servi à la taille des cubes essayés (chap. B.II.1) proviennent des déblais de la galerie de dérivation provisoire. Les carottes viennent des sondages de reconnaissance de la rive droite.

Composition : calcaire marneux ; calcite en microcristaux enrobés dans une pâte d'éléments argileux.

Structure : échantillons massifs ; les plans de sédimentation sont toutefois bien visibles et créent des surfaces de faiblesse soulignées par la coloration en lames minces.

4. SITE DU BARRAGE DE GREOUX

Le barrage sur le Verdon est implanté dans une gorge assez large, creusée dans les marno-calcaires et calcaires crétacés, à 45 km au Nord Est d'Aix-en-Provence. Les pendages sont horizontaux, les bancs, de dureté inégale, ont de 0,50 m à plusieurs mètres d'épaisseur. Les zones les plus dures font saillie formant des corniches que l'on peut du reste suivre sur d'assez grandes distances.

Le site est découpé par des diaclases formant trois systèmes définis dont un est représenté par les joints de sédimentation.

Une série de petits accidents à pendage 60° aval, sensiblement transversaux, découpe le site avec une maille de 5 à 20 m.

On peut également observer une autre série de failles, plus espacées, légèrement sécantes par rapport à la rivière, presque verticales (tendance à pendage vers la rive droite).

Les réseaux de failles sont notablement soulignés par des canaux de karstification qui, à la rencontre de deux accidents, prennent une certaine importance. Ces canaux sont très souvent assez bien colmatés d'argile rouge.

Les joints sont nombreux, mais réduits en extension ; leur surface est saine ; leur maille est inférieure au mètre.

5. SITE DU BARRAGE DE LA GITTAZ

Le site du barrage de la Gittaz est situé à une altitude de 1500 m dans les schistes cristallins du bord oriental du massif de Belledonne dans les Alpes françaises. Le site est formé par un verrou glaciaire aux formes vigoureuses ayant entaillé des couches verticales transversales.

L'histoire géologique complexe du massif est à l'origine des principaux caractères de la roche. Deux phases tectoniques sont prédominantes :

Phase tectonique hercynienne : -- Plissement et laminage de terrains sédimentaires (conglomérats, grès, quartzites, schistes),
(ère primaire : 300 millions d'années).
- Premier métamorphisme avec formation de micaschiste et de gneiss.
- Deuxième métamorphisme avec formation de migmatite.
- Ecrasement interne de la roche avec une intense recristallisation postérieure.

Phase tectonique alpine
(ère tertiaire : 25 millions d'années)
- Ecrasement et fracturation.
- Troisième métamorphisme avec recristallisation et développement des phyllites.
- Rejeu des failles existantes.

La roche du site est principalement composée, d'amont en aval :

- de conglomérats métamorphisés à galets de quartz plus ou moins étirés, en bancs de 10 cm à 1 m séparés par des intercalations schisteuses.
- de gneiss fins à cassures franches, gris foncés ou verdâtres, découpés en amygdales esquilleuses.
- de micaschistes phylliteux, satinés, gris plus ou moins foncé, souvent feuilletés.
- de schistes noirs esquilleux, feuilletés.

La structure du site est simple dans l'ensemble : la schistosité principale, bien marquée, est très redressée et perpendiculaire à la vallée, mais le détail est plus complexe :

- des réseaux de schistosité secondaires plus ou moins gauches se combinent au réseau principal, ce qui explique le découpage caractéristique du site en petits éléments allongés de quelques cm³.
- des zones de fracturation diffuses coupent le site suivant la direction de la schistosité en formant des bandes où la division caractéristique est augmentée.
- des cassures franches recoupent nettement toutes les directions. Elles se caractérisent par leur faible épaisseur, leurs épontes nettes légèrement gondolées, leur remplissage souvent filonien, rarement argileux.
- des diaclases extrêmement irrégulières viennent souligner la schistosité et la direction de cassures.

6. SITE DU BARRAGE DE ST-CASSIEN

Le Biançon a creusé une gorge, à 16 km à l'Ouest de Cannes, dans un massif de gneiss à deux micas, parfois ocellé. A l'exception de certains amas irrégulièrement répartis, la foliation est bien visible ; elle est, au site, perpendiculaire à l'axe de la rivière. A l'amont du barrage, son pendage est amont 70°, puis devient vertical au barrage ; à l'aval, il est de 80° dirigé vers l'aval.

Ce massif est très découpé par des failles ou diaclases très redressées, soit parallèles à la rivière, soit sécantes, à peu près dans la foliation ; à l'échelle des joints, la division peut atteindre l'échelle décimétrique.

L'altération est intense et peut atteindre 10 m dans les parties hautes.

7. SITE DU BARRAGE DE VAN DER KLOOF

L'Orange a creusé une gorge dans le massif de dolérite ressemblant beaucoup à celle du barrage de Hendrik Verwoerd, qui se trouve à 100 km en amont.

On y trouve les mêmes joints avec les mêmes mailles avec, en plus, quelques petits cisaillements verticaux. De l'argilite existe aussi en profondeur, mais à une trentaine de mètres sous les fondations.

8. SITE DU BARRAGE DE SAINTE-CROIX

Le Verdon coule dans une gorge aux parois verticales de calcaires appartenant au faciès corallien, souvent dolomitique, du Jurassique supérieur.

Le site se trouve sur le flanc ouest très peu accentué, d'un anticlinal d'axe nord-sud dont la retombée est, plus franche, forme l'entrée des gorges. La structure est simple : les bancs présentent au site un pendage de 10° vers le nord ouest ; à 90 m au-dessus du fond de la rivière, la série est très stratifiée en bancs de 0,20 m à 3 m d'épaisseur ; au-dessous, on trouve une série calcaire massive qui constitue la fondation de l'ouvrage.

La continuité des bancs montre, que dans la zone étudiée, aucun accident avec un important rejet, n'affecte les terrains. Par contre, la variation des pendages dans les environs indique une déformation en coupole à grand rayon de courbure.

La fracturation du site est très caractéristique ; elle peut se décomposer en quatre types :

- des réseaux de diaclases,
- des cassures obliques disposées en éventail, parfois argileuses. Elles sont liées à la proximité de plusieurs accidents importants soulignant l'axe de l'anticlinal,
- des discontinuités de versant affectant les éperons en saillie,
- une fissuration générale de la roche à l'échelle de quelques cm.

9. SITE DU BARRAGE DE SAINT-JEAN-DU-GARD

Situé à 5 km en amont de Saint-Jean-du-Gard, sur le Gardon d'Anduze, le site entaille une zone de gneiss compact formant la bordure sud de l'ensemble cristallin et métamorphique des Cévennes. Une tectonique intense a rehaussé ce socle, puis l'érosion a modelé les formes actuelles.

Le gneiss est grossièrement lité, parfois œillé, le pendage étant de 30° aval.

La structure du site est régie par un accident transversal à la vallée qui donne une zone très broyée à l'amont et plus massive, quoique divisée à l'aval. Un réseau secondaire, parallèle à la rivière, découpe le site et favorise ainsi la division en petits blocs de parfois 10 à 20 cm. La circulation de l'eau - par conséquent l'altération - est facile et, en haut des rives, pénètre parfois 30 m à l'intérieur. Au-delà de cette zone oxydée et ouverte, le rocher est encore diaclasé, mais devient massif.

10. SITE DU BARRAGE DE KARDJALI

Le site du barrage est situé en Bulgarie, sur la marge du massif métamorphique du Rhodope, constitué de schistes cristallins. La structure intime complexe du site en rend difficile la description succincte. Il est taillé dans une formation sombre, grise au soleil, verdâtre sous la pluie, évaluée à 250 m de puissance, composée de schistes feldspathiques à biotite et de calcschistes à chlorite mêlés en une séquence hétérogène non divisible. Dans la formation, on trouve sporadiquement des niveaux fissiles et altérés, en particulier dus à la présence de muscovite.

La formation a subi une intense compression, qui se manifeste, outre les failles, par de très nombreux joints striés de toutes directions, de brusques changements de pendage, et la présence de masses éclatées en fragments anguleux ou transformées en une fine mouture. La roche est cependant restée compacte dans son ensemble.

La direction des failles régionales est sensiblement amont-aval avec un pendage vers la rive droite (45° à 70°). Sur le site, 8 accidents satellites existent. Ils s'enfoncent parallèlement sous la rive gauche en une structure en pelure d'oignon. Les joints sont très nombreux : leur principale direction est amont-aval ou transversale à la vallée ; les pendages sont très raides, les mailles étant de l'ordre du mètre, localement bien moins.

Surtout rive gauche, les 10 ou 15 premiers mètres en dessous de la surface sont très ouverts et particulièrement

instables.

11. SITE DU BARRAGE SUR L'OUED KASSEB

A l'endroit du site, situé à 120 km à l'Ouest de Tunis, l'Oued Kasseb coule dans une gorge resserrée due à l'érosion d'une barre de calcaire éocène à pendage amont de 60°. Trois horizons peuvent y être distingués :

- au sommet, 25 m d'alternance de calcaire et calcschiste en bancs décimétriques.
- au milieu, 145 m de calcaire massif bitumineux en lits de 0,30 à 2,50 m.
- à la base, 45 m de marno-calcaires gris.

L'ouvrage est construit sur l'horizon moyen, qui est divisé par de petites failles de dislocation, sans grand rejet, marquées par des filons de calcite.

Les joints de stratification sont étendus et très nets ; les diaclases groupées en deux réseaux orthogonaux favorisent une certaine circulation de l'eau qui, par endroit, a légèrement karstifié certains lits. Les mailles des discontinuités tirées des graphiques statistiques donnent :

- 10 cm pour la fissuration très fermée et locale,
- 1 m pour les joints.

L'altération de surface est nulle ; seule l'ouverture des joints fait une transition d'une dizaine de mètres avec la zone interne compacte.

12. SITE DU BARRAGE DE LANOUX

Le barrage est construit à l'aval de l'étang naturel du Lanoux (Ariège), dans un resserrement creusé dans des schistes très redressés qui sont en contact, à l'amont, avec un massif de gneiss massif.

Au site, la foliation est transversale à la vallée ; le rocher affleure partout. Les feuillets ont une épaisseur décimétrique et les plans de foliation sont très marqués. Un système de très petits joints découpe ces feuillets d'une façon discontinue. On ne signale pas d'accident sur le site ou au voisinage immédiat. Sur quelques mètres, après la surface, le rocher est légèrement desserré, mais devient vite très compact.

13. SITE DU BARRAGE DE GRANDVAL

Le barrage de Grandval, sur la Truyère, est construit dans une vallée assez largement ouverte, creusée dans des micaschistes très plissés qui, au fur et à mesure, que l'on s'approche de la surface, se divisent en blocs de plus en plus petits. Dans l'ensemble, ces schistes plongent légèrement vers l'aval. Le site est exempt d'accident important ; seuls quelques délits schisteux sont cisailés et une zone de matériaux brisés vient couper en écharpe la rive gauche. La division due aux joints est très irrégulière ; en moyenne la maille est de 1 à 2 mètres. L'altération superficielle est très profonde.

Les blocs dans lesquels ont été taillé les cubes essayés (chapitre B.II.1) proviennent des déblais des fouilles et les carottes des sondages de reconnaissance faits sur le site.

La roche est un gneiss composé de :

- nombreux cristaux de quartz,
- feldspath orthose très clair en larges cristaux,
- biotite très saine,
- très nombreux oxydes opaques,
- quelques cristaux d'augite.

Les lits de micas donnent à la roche une foliation nette. Les échantillons sont massifs.

14. SITE DU BARRAGE DE YATE

Situé à l'Est de l'île de la Nouvelle-Calédonie, à 60 km au S.E. de Nouméa, le site du barrage se trouve dans une gorge creusée dans un épais massif de serpentinite massive. Celle-ci est parcourue par des cassures verticales qui ont été agrandies par dissolution et sont fréquemment remplies de dépôts anciens argileux.

Les joints sont très affirmés et sur la rive gauche, une grande épaisseur de latérite recouvre le rocher qui affleure par contre, sur la rive droite.

Les blocs dans lesquels ont été taillés les cubes essayés (chapitre B.II.1) ont été prélevés à l'aval immédiat du barrage.

La roche est une serpentinite provenant de l'altération presque complète d'une péridotite. Sa composition est la suivante :

- résidu d'olivine craquelée,
- pyroxène orthorhombique (enstatite) complètement ouralitisé,
- lamelles d'antigorite orientées suivant les clivages de l'olivine,
- fibres de chrysotile peu nombreuses,
- nombreuses taches opaques de titano-magnétite.

La roche est très massive, à cassure conchoïdale. Parfois, un filonnet de chrysotile fibreux secondaire forme une petite surface de faiblesse. La coloration effectuée sur la lame mince souligne toutefois quelques micro-discontinuités extrêmement fines.

15. SITE DU BARRAGE DE ST-CHAMOND

Le site est constitué par une gorge assez ouverte creusée par le Gier dans les micaschistes constituant l'un des éléments de l'ensemble cristallin du Pilat. On peut, au voisinage de l'ouvrage, distinguer :

- des bancs riches en micas et feldspaths, de 10 à 20 cm,
- des niveaux plus micacés de faible épaisseur,
- des bancs quartzeux, durs, à cassure claire de 1 à 2 m. Ces bancs sont mêlés et pen- dent en moyenne de 25° vers la rive droite aval.

Quelques discontinuités mineures sont visibles, constituées principalement de diaclases franches, à tendance verticale, sensiblement perpendiculaires à la vallée.

Les blocs ayant servis à la taille des cubes essayés (chapitre II, B. 1) ont été prélevés à l'aval du barrage dans les déblais venant des fouilles.

La roche est un micaschiste composé de :

- lits de quartz en petits cristaux indentés,
- lits micacés (biotite et chlorite primaires),
- feldspath très rare.

Les lits d'éléments foncés et clairs sont d'égale importance, la schistosité est très nette. On peut observer des microdiscontinuités le long des lits, mais aucune sécante.

16. SITE DU BARRAGE DE SALAGOU

Au site, la vallée assez large taillée par le Salagou à quelques km en amont de son confluent avec la Lergue (Hérault), est constituée par des argilites rouges du Permien déposées sur une grande épaisseur et surmontées de basalte. Les joints de sédimentation, très étendus, sont subhorizontaux. La division du rocher, imposée par deux réseaux orthogonaux, peut s'opérer jusqu'à l'échelle du centimètre.

Des accidents assez irréguliers et très injectés d'argile, viennent rompre la monotonie des dépôts.

Les blocs ayant servis à la taille des cubes essayés (chapitre II, B.1) proviennent des affleurements dans la rivière à l'aplomb de l'ouvrage et de la galerie R.D. Les carottes viennent d'un sondage vertical de 50 m, implanté rive gauche.

La roche est une argilite composée de :

- microcristaux de quartz,
- paillettes de mica hydraté,
- oxyde de fer,
- pâte d'illite avec très peu de vermiculite,
- calcite secondaire en filonnets très plans.

La roche est massive mais tendre ; les plans de sédimentation sont très nets et forment avec les filonnets de calcite de très nombreuses surfaces de faiblesse.

17. SITE DU BARRAGE DE NAGUILHES

L'ouvrage est construit sur un verrou naturel fermant le lac de Naguilhes à 30 km au SE d'Ax-les-Thermes (Ariège). Le rocher est un granite massif découpé seulement par de rares diaclases franches, orthogonales, marquées par une légère oxydation.

Les carottes essayées (chapitre II, B. 1) proviennent de sondages de reconnaissance.

La roche - un granite - est composée de :

- quartz en cristaux moyens,
- feldspath très clair potassique,
- biotite saine.

Les échantillons sont massifs ; quelques surfaces de faiblesse sont tachées d'oxydes rouillés.

18. SITE DU BARRAGE DE KYLE

Situé à 20 km au S.E. de Fort Victoria (Rhodésie), le site est une gorge creusée dans le socle granitique affleurant souvent sous forme de coupes caractéristiques. La gorge montre partout un granite sain et massif, découpé parallèlement aux versants, par de grandes discontinuités. Cette desquamation peut s'étendre à quelques dix mètres de la surface. Des diaclases verticales, parallèles à l'axe de la vallée, très espacées, existent également.

Les blocs d'où ont été tirés les cubes essayés (chapitre B. II.1) proviennent des fouilles du barrage.

La roche est un granite composé de :

- quartz très abondant en grandes plages de petits cristaux indentés,
- feldspaths potassiques, orthose rare,
- microcline abondant, en gros cristaux clairs,
- plagioclases, peu nombreux : oligoclase partiellement altéré,
- muscovite très rare,
- biotite partiellement altérée en chlorite,
- épidote, hornblende verte,
- oxyde magnétique en amas opaques.

La roche est massive, à cassure conchoïdale sans plan de faiblesse apparent.

19. SITE DU BARRAGE DE BANGALA

Situé à 80 km au SSE de Fort-Victoria (Rhodésie), le site est creusé dans les paragneiss massifs, non loin de leur contact avec le socle granitique. Le litage grossier est très redressé et transversal à la vallée.

Les joints sont très nombreux et étendus ; ils forment deux réseaux verticaux parallèles ou perpendiculaires à la vallée.

Les accidents sont également verticaux et parallèles à la rivière : l'un d'eux, dans le lit, est injecté d'une bande de 20 m de dolérite.

L'altération superficielle s'étend jusqu'à 10 m de la surface.

Les blocs d'où ont été tirés les cubes essayés (chapitre B. II.1) proviennent des fouilles du barrage.

La roche est un gneiss composé de :

- quartz en cristaux moyens,
- feldspaths : microcline, plagioclase,
- micas rares.

Les échantillons, très massifs, sont formés de très petits lits de micas et d'un fond de microcristaux de quartz enrobant des gros cristaux de feldspath. La foliation est rudimentaire, la cassure est conchoïdale.

B - ESSAIS MECANIKES ET MESURES DES CARACTERES PHYSIQUES
PARTICULIERS DE MASSIFS ROCHEUX.

Lors de l'analyse géologique des sites, nous avons rencontré et souligné certaines caractéristiques du massif rocheux de fondation susceptibles de poser des problèmes après construction et mise en service de l'ouvrage. La simple étude descriptive, aussi minutieuse soit-elle, ne peut pas résoudre ces problèmes.

Il faut alors essayer de reproduire, à une échelle pratique, les conditions futures auxquelles la roche sera soumise dans la réalité : efforts, contraintes, filtration, cycles climatiques.

Le but de l'essai consiste à isoler le mieux possible le facteur à étudier pour le faire varier entre certaines limites.

Nous envisagerons dans ce travail :

- les mesures sur échantillons : essais mécaniques, essais de percolation et de claquage, observation de lames minces colorées.
- les mesures in situ : essais au vérin, essais de petite sismique, essais de percolation, mesures de contraintes.

Notre travail s'est limité à l'étude de détail d'un certain nombre de techniques. Afin de le situer dans le contexte général d'une reconnaissance complète in situ, il faut citer pour mémoire :

- les essais de cisaillements en place exécutés par exemple à Korubé au Japon ou à Vouglans en France
- les essais pressiométriques en forages (instruments : Mederatec ou C.E.B.T.P.)
- les observations par photos ou télévision en forage
- les mesures géophysiques en sondage (sismiques et électriques).

Mais avant d'aborder l'étude des essais proprement dits, il faut déterminer leur domaine de validité. Pour cela, l'analyse des discontinuités de la roche est indispensable ; c'est donc par elle que nous commencerons ce chapitre consacré à la géomécanique.

I. ETUDE STATISTIQUE DES DISCONTINUITES

1. Généralités

Les moyens de description d'un massif, longtemps limités à la définition de détails pétrographiques, sont aujourd'hui très efficacement complétés et élargis quant à la caractérisation de la structure du massif, par l'étude systématique des discontinuités.

Celles-ci déterminent des volumes dont les dimensions sont mesurées depuis l'Angström jusqu'au kilomètre ; pratiquement pour l'étude d'une fondation rocheuse, on va du millimètre à quelques centaines de mètres.

SANDER (1948), MULLER (1963), CLAR (1963) ont défini un certain nombre de méthodes qui tendent à faciliter l'exploitation systématique des données de structure connues de longue date.

Dans le même but - celui d'une exploitation plus systématique de mesures simples - nous allons étudier les paramètres géométriques des réseaux de discontinuités par la méthode statistique. Soulignons que cette étude a été menée, avant tout, dans le but de fournir au géologue des moyens reproductibles de classer les sites, la définition mécanique de ceux-ci étant une étape supplémentaire que nous n'avons pas franchie.

2. Définitions des discontinuités

Les discontinuités qui séparent des volumes élémentaires d'un massif sont, soit originelles (sédimentation), soit le produit de déformations déterminées (schistosité), soit encore des surfaces de rupture (fissures, diaclases, failles). Cette classification, basée sur la genèse, est difficilement exploitable car d'une part, elle ne met pas clairement en évidence les paramètres géométriques et d'autre part, la superposition de phénomènes géologiques peut mélanger les caractères et rendre toute reconnaissance impossible.

Dans le système de classement adopté, nous avons retenu des critères basés sur la reconnaissance ou la morphologie.

On définit un réseau de discontinuités par une orientation moyenne dans l'espace, une extension moyenne et une maille des éléments constitutifs, par l'épaisseur des discontinuités et éventuellement par la matière qui s'y trouve. Dans les pages qui suivent, nous entendons par écartement, la distance qui sépare deux discontinuités ; la maille du réseau est l'écartement moyen des constituants du réseau.

Nous nous contenterons, dans ce travail, de définir une méthode d'étude des orientations et des écartements ; pour une étude générale, il faudrait envisager les autres caractères avec autant de soin.

2.1. Classification

Les discontinuités d'un massif intéressent des échelles tellement différentes qu'il nous faut d'abord les classer et définir le moyen d'étude. Nous nous sommes arrêtés sur les quelques définitions simples suivantes :

- Microdiscontinuités : discontinuités mécaniques de la roche, décelables au microscope, qui comprennent pratiquement toutes les petites fractures de moins de 5μ , coupant ou contournant les cristaux, mais laissant toutefois l'échantillon entier. Elles présentent donc une certaine cohésion.

- Fissures : discontinuités décelables à vue à l'affleurement, ne revêtant pas un caractère systématique en orientation et de faible extension. On constate pratiquement que la roche se divise facilement le long des fissures ; les épaisseurs n'excèdent pas quelques dixièmes de mm.

Il ne faut pas confondre ces fissures existant dans la roche avec des surfaces de ruptures, plus ou moins irrégulières, que l'on peut observer en paroi de galerie et qui sont dues à l'action mécanique de l'explosif.

- Joints (diaclasses, plans de sédimentation) : discontinuités visibles à l'affleurement, revêtant un caractère systématique en direction et présentant des surfaces relativement planes et étendues.

- Cisaillements : discontinuités où des évidences de mouvements relatifs sont visibles. Les surfaces en contact sont, soit striées (slickenside anglais), soit revêtues de minéraux d'altération formant miroirs - chlorite par exemple - soit même de faibles épaisseurs de mylonite. On constate très souvent que les cisaillements sont groupés (shear zone anglais).

- Failles : discontinuités planes ou non où les rejets sont notables. Les remplissages sont parfois importants, mais surtout, l'extension de l'accident est grande.

2.2. Comparaison de différentes classifications

Nous nous sommes quelque peu écartés des définitions données par THENOZ et FARRAN (1965) qui classent les discontinuités des roches en :

- microfissures matricielles ($\leq 1 \mu$) composées par des fissures inter et intra granulaires.
- microfractures (≤ 0.1 mm) s'étendant au-delà de la dimension des cristaux,
- macrofractures (> 0.1 mm) parfois ouvertes et bourrées de minéraux d'altération.

BERNAIX (1966) ajoute des macrodiscontinuités à partir de la diaclase et au-delà.

Nous avons préféré faire un classement basé sur le mode de reconnaissance (microscope ou affleurement) ou sur la morphologie : parallélisme ou non, trace de mouvements relatifs. On trouvera dans le tableau ci-après la correspondance des différentes définitions. L'école autrichienne, spécialement attachée à l'étude des discontinuités mécaniques d'un massif, analyse essentiellement les joints et les cisaillements appelés "fractures".

Nous avons indiqué les différents moyens envisagés pour l'observation et l'étude des discontinuités ainsi définies.

3. Etude des orientations

Dans le cas d'une distribution systématique de plans de discontinuités mécaniques, la définition de l'orientation est basée sur la détermination d'angles situant dans l'espace les plans étudiés. Pour éviter une interprétation de l'observateur dans la définition moyenne d'un réseau, on a l'habitude de procéder par relevés statistiques. En effet, il peut parfois paraître immédiat de caractériser le réseau après une simple vue d'ensemble, mais il faut se méfier d'un jugement hâtif, car d'un point à un autre du site les orientations peuvent changer sans que l'observateur puisse le constater. De plus, l'intérêt du relevé statistique est de permettre de chiffrer la dispersion.

Le relevé statistique tel que nous le pratiquons comporte donc deux impératifs :

- a) relever toutes les orientations au cours d'un cheminement,
- b) combiner les axes de cheminement pour ausculter le volume du massif et non pas une direction, ou une surface seulement.

Pratiquement sur les sites que nous avons prospectés, nous avons parcouru 100 à 150 m en profondeur dans chaque rive dans des galeries de reconnaissances, une centaine de mètres en amont et en aval de l'emplacement du barrage dans des tranchées horizontales et toute la hauteur du site dans des tranchées selon la plus grande pente. Une vaste surface d'affleurement et des puits nous ont parfois aidé à prospecter le site encore mieux en volume.

Types de discontinuités	Classification de J. Bernaix	Moyens d'observation	Moyens d'étude	Essais à faire
Microdiscontinuités	Microfissures	- Sur lames minces	- Statistique des écartements	<ul style="list-style-type: none"> - Lames minces colorées - Essais sur échantillon (percolation)
Fissures	Microfractures			
Fissures	Macrofractures	<ul style="list-style-type: none"> - A l'affleurement - Sur échantillons - Sur carottes 	- Statistique des écartements	
Joints		- A l'affleurement parfois sur carottes	<ul style="list-style-type: none"> - Statistique des écartements - Statistique des orientations 	
Cisaillements	Macrodiscontinuités	- A l'affleurement	<ul style="list-style-type: none"> - Statistique des écartements - Statistique des orientations - Cartographie 	<ul style="list-style-type: none"> - Etude des remplissages, - Essais de cisaillement
Failles		- A l'affleurement et sur photos aériennes	<ul style="list-style-type: none"> - Cartographie - Statistique des écartements 	<ul style="list-style-type: none"> - Etude des remplissages - Essais de cisaillement - Calcul de stabilité des rives

Essais de charge
à la paroi (vélin)
Petite sismique

Nous caractérisons la direction d'un plan (figure 45) par l'azimuth α (par rapport au Nord magnétique par exemple) de la normale ascendante au plan considéré et par l'angle β qu'il fait avec le plan horizontal. Deux chiffres sont donc suffisants pour le caractériser.

Ces deux chiffres sont reportés sur un diagramme polaire ; le premier correspondant à des rayons repérés de 0 à 360° (toute la rose de la boussole), le deuxième correspondant à des cercles concentriques de 0° au centre à 90° pour le cercle extérieur.

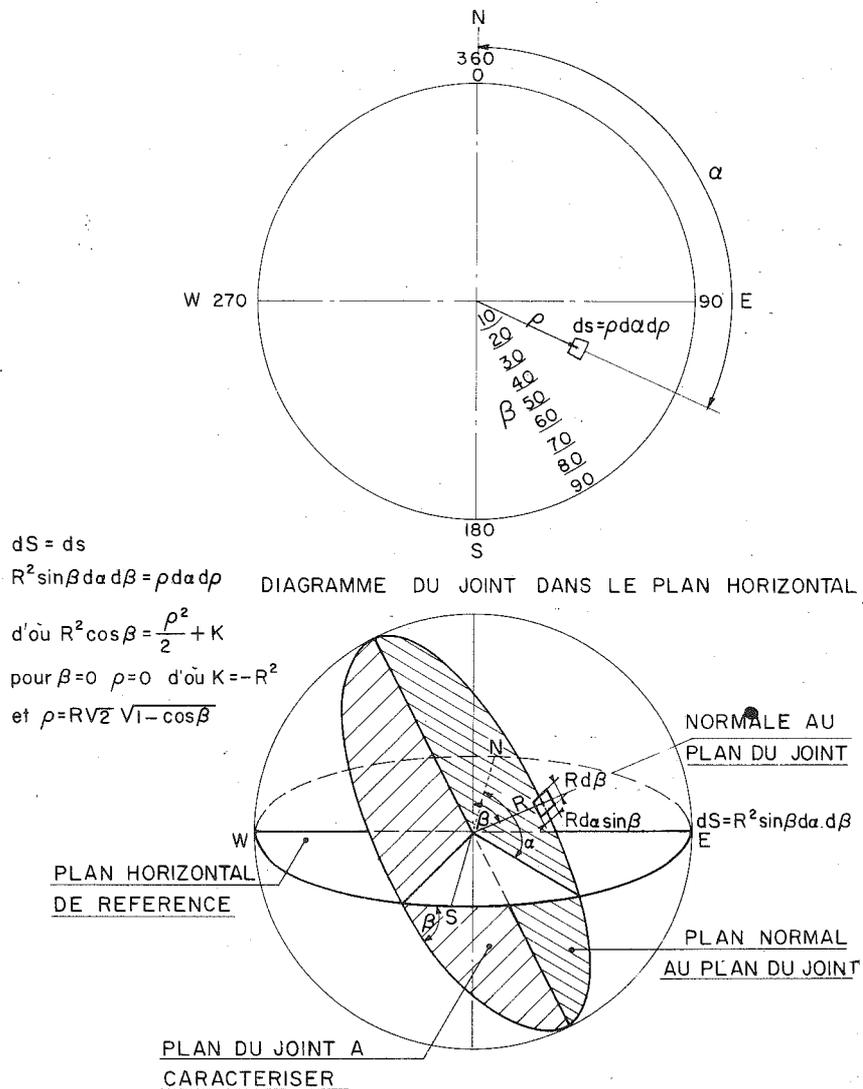


Fig. 45 - DIAGRAMME POLAIRE DE DEFINITION STATISTIQUE DES JOINTS D'UN MASSIF

Pour construire les diagrammes polaires, bien des auteurs ont proposé des méthodes basées sur divers systèmes de projection (SCHMIDT 1925 - SANDER 1926 - MULLER 1963 - TERZAGHI 1965).

Chaque plan est représenté dans le diagramme par un point P ; l'association de tous les points représentatifs conduit à des nuages de points.

Nous avons utilisé des diagrammes dans lesquels chaque petit carré sphérique, correspondant à 10° pour $\Delta\alpha$ et $\Delta\beta$ est dans le même rapport de surface en projection polaire plane. Dans ce cas, il faut que les rayons de chaque cercle coté en β soient :

$$r = K^2 \sqrt{1 - \cos \beta} \quad (\text{projection Lambert, diagramme de SCHMIDT})$$

On compte le nombre de points par unité de surface pour obtenir des chiffres de densité de points. On relie ensuite les nombres d'égales valeurs par des courbes que l'on affecte d'un pourcentage, soit :

$$\frac{\text{Nombre de points à l'intérieur de la courbe}}{\text{Nombre de points totaux}} \times 100$$

qui permet de connaître pour chaque zone la répartition des directions.

Au cours des descriptions géologiques du chapitre A, nous avons donné chaque fois des graphiques de ce genre. Pour connaître les directions des horizontales des plans, il faut ajouter ou retrancher 90° à la valeur lue sur le graphique. En effet, la définition classique d'un plan en géologie est :

- l'angle de ses horizontales par rapport au Nord (de 0 à 180°),
- son pendage en degrés par rapport à l'horizontale (0 à 90°),
- la direction de plongement qui est en fait celle du nuage de points du diagramme.

4. Etude des écartements

Depuis la microdiscontinuité jusqu'au cisaillement, le site est divisé par de nombreuses surfaces dont la cartographie est de plus en plus difficile au fur et à mesure que la maille (écartement moyen) diminue. Aussi, employons-nous la statistique des écartements pour suppléer à la cartographie et surtout pour obtenir d'un massif des données qui permettront de le classer comparativement à d'autres ou d'étudier la validité d'essais que l'on veut entreprendre.

On fait une suite de relèvements de plus courtes distances, entre surfaces de même nature, qui forment une population statistique. On aura ainsi une population pour les microdiscontinuités, une pour les fissures, une pour les joints et une pour les cisaillements. Ces relèvements doivent être systématiques. Sans aucune tentative d'interprétation de la part de l'opérateur.

4.1. Méthodes de relèvements

4.1.1. Les microdiscontinuités

Si l'étude systématique des matrices montre que des microdiscontinuités existent, on procède à leur étude en taillant dans des échantillons, préalablement colorés, trois lames minces orthogonales (chapitre B.II. 3) et on mesure au micromètre sous le microscope muni de l'objectif le moins puissant, les écartements entre microdiscontinuités. Sauf pour les discontinuités systématiques liées à des directions bien connues (foliation, sédimentation), nous ne faisons pas de correction permettant d'obtenir la plus courte distance entre plans de fissures. Notons que dans la majorité des cas, les microdiscontinuités visibles s'organisent plus ou moins en réseaux parallèles.

L'expérience montre qu'une cinquantaine de lames sont nécessaires. On obtient ainsi une population statis-

tique qui permet, quand le nombre de mesures est suffisant, de tracer une courbe de répartition des fréquences donnant la valeur la plus fréquente et la dispersion des mesures. Nous préférons garder cette courbe plutôt que celle des fréquences cumulées, car elle est plus explicite pour la représentation des discontinuités que nous verrons ci-après.

4.12. Les fissures

Quand les affleurements offrent des signes évidents de division de l'ordre de quelques centimètres et au-dessus, sans que les directions soient systématiques et que les surfaces de discontinuités soient importantes, on fait un relevé de très nombreuses séries d'écartements entre fissures.

Pour cela, nous mesurons, le long des lignes de 1 ou 2 m, tous les écartements entre fissures préexistantes rencontrées ; nous fixons les lignes de mesures suivant des directions variables, mais à des intervalles systématiques (tous les 5 m par exemple) au cours de l'examen des affleurements.

On dresse également une courbe de répartition des fréquences de cette population.

4.13. Joints

Pour cette catégorie, le relèvement des écarts ne se fait plus seulement sur des alignements locaux, mais sur toutes les surfaces disponibles. On relève dans cette série les distances qui séparent les plans de même nature franchement sécants à la direction de cheminement : sédimentation, joints parallèles voisins. On obtient ainsi une liste d'écartements.

Quand un joint est isolé, c'est-à-dire quand on ne peut pas voir le joint de même nature suivant, on l'affecte de la mesure x (dans une galerie, x est en général de l'ordre de 10 m, qui est la distance maximale de perception due essentiellement à l'éclairage et au recul). Nous avons introduit cet élément x dans les mesures pour garder au maximum la notion de statistique sans interprétation. En effet, à partir du moment où l'observateur ne peut plus voir ensemble deux surfaces, il est obligé de chercher l'une avec, en mémoire, les caractéristiques de l'autre, ce qui l'oblige déjà à une certaine interprétation.

On cherchera également à porter en graphique les populations statistiques. On obtient généralement une courbe de répartition des fréquences pour les écartements mesurés et une classification à part correspondant aux écartements x ; plus cette dernière est importante, plus le site est hétérogène au point de vue répartition des joints.

4.14. Cisaillements

Les cisaillements sont également étudiés statistiquement, mais leur cartographie devient de plus, nécessaire ; c'est en général de cette cartographie que nous tirons les éléments utilisés pour construire la courbe de répartition des écartements.

4.15. Failles

L'étude des écartements des failles est le plus souvent faite à partir de photos aériennes de la région et de vérification sur place.

4.2. Graphiques d'écartements

La représentation des mailles varie beaucoup avec chaque auteur, car les buts recherchés sont souvent assez variables. Nous donnons ici une représentation ressemblant à un classement granulométrique qui a pour avantage d'utiliser au maximum les données statistiques et dont le but est de fournir une image compacte d'un massif pouvant être, conjointement avec les graphiques d'orientation, utilisée dans des comparaisons de sites.

Chaque catégorie est représentée par un rectangle (figure 59) dont les hauteurs sont fonction des écartements extrêmes mesurés et dont les largeurs dépendent de la dispersion des mesures statistiques d'écartement

et d'orientation et de l'extension observable des discontinuités étudiées.

Nous avons simplifié la représentation en adoptant, pour nos graphiques, la convention de largeur suivante (figure 46) :

- un carreau quand le coefficient de variation $\frac{\sigma}{\bar{x}}$ de la distribution des écartements est supérieur à 0,50, quand le diagramme polaire des orientations montre des courbes très serrées et quand, dans le cas des joints, au moins 50% de ceux-ci traversent toute la galerie (soit deux mètres),
- un demi carreau quand le coefficient de variation de la distribution des écartements est compris entre 0,20 et 0,50, quand le diagramme polaire des orientations montre des courbes moyennement serrées et quand, dans le cas des joints, moins de 50% de ceux-ci traversent la galerie.
- un simple trait quand le coefficient de variation de la distribution des écartements est inférieur à 0,20 et quand, sur le diagramme polaire des orientations, les courbes sont très lâches.

Dans une catégorie de discontinuités données, on peut être amené à distinguer les écartements de différents réseaux, dont les orientations et l'extension diffèrent beaucoup ; chacun sera représenté par un rectangle élémentaire, défini à la suite de l'étude statistique du réseau. La juxtaposition des rectangles élémentaires forme le graphique représentatif de la discontinuité mécanique étudiée.

Nous avons fait figurer en regard de l'axe des écartements, sur les graphiques globaux (exemple figure 47), le domaine de validité des essais usuels dont nous étudierons quelques exemples par la suite : lames minces colorées, essais sur échantillons, essais au vérin, petite sismique. Une fois établi le graphique d'un site, on peut donc apprécier l'importance des discontinuités mécaniques, c'est-à-dire la complexité de la structure et ensuite, mieux connaître la représentativité des essais que l'on pourrait être amené à concevoir.

Nous nous rattachons aussi à l'une des idées maîtresses exprimées au cours du Premier Congrès International de mécanique des roches de Lisbonne (1966) : "La géologie détermine l'échelle à utiliser pour les reconnaissances".

5. Analyse de quelques exemples

Nous avons spécialement étudié les sites de Malpasset, Hendrik Verwoerd, Tachien, Gittaz et Sainte-Croix dans le but de définir les graphiques d'écartement et d'orientation des discontinuités.

5.1. Malpasset

La géologie du site a été décrite en détail au chapitre A.I.1. Un barrage-voûte de 66 m de hauteur y a été construit, puis ruiné en 1959.

Tous les types de discontinuité sont présents (figure 47) ; on a une représentation qui fait donc intervenir le millimètre au même titre que la dizaine de mètres. Nous voyons donc que cela impose une série d'études pour les différentes échelles.

A petite échelle, les lames minces et les échantillons nous renseigneront sur l'aspect matriciel des phénomènes ; nous en verrons quelques résultats au cours des chapitres suivants.

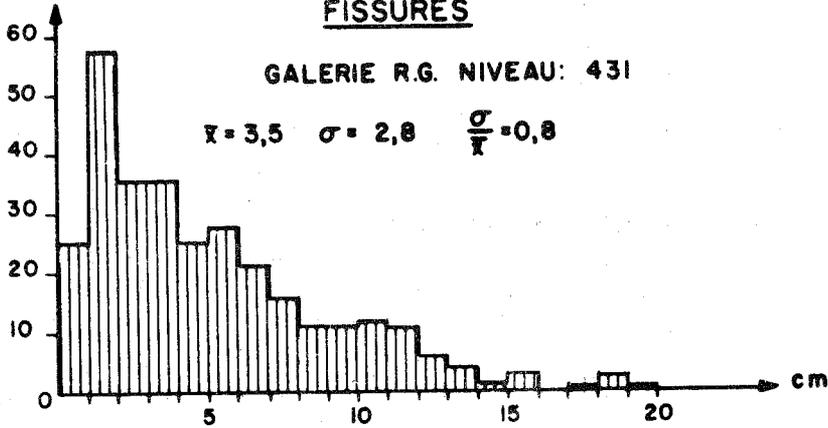
A l'échelle moyenne, les résultats des essais au vérin peuvent être représentatifs ainsi que ceux de la petite sismique, mais il reste toute la gamme des discontinuités à maille supérieure à la dizaine de mètres qui imposent un levé cartographique et des épures de stabilité.

Nombre de mesures

FISSURES

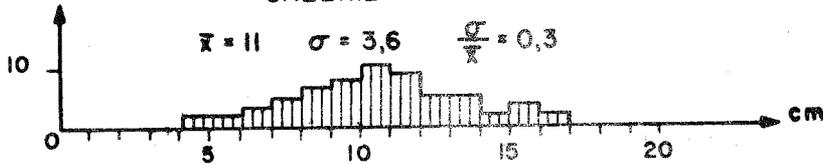
GALERIE R.G. NIVEAU: 431

$$\bar{x} = 3,5 \quad \sigma = 2,8 \quad \frac{\sigma}{\bar{x}} = 0,8$$



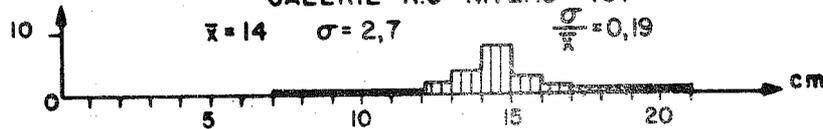
GALERIE R.D NIVEAU 427

$$\bar{x} = 11 \quad \sigma = 3,6 \quad \frac{\sigma}{\bar{x}} = 0,3$$



GALERIE R.G NIVEAU 431

$$\bar{x} = 14 \quad \sigma = 2,7 \quad \frac{\sigma}{\bar{x}} = 0,19$$



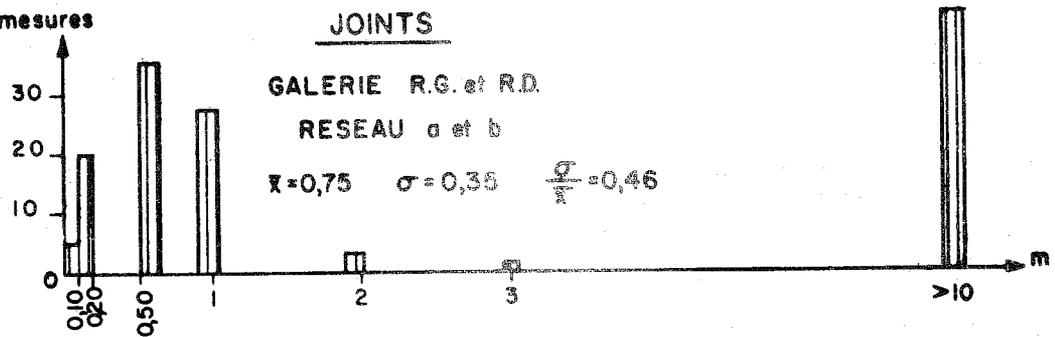
Nombre de mesures

JOINTS

GALERIE R.G. et R.D.

RESEAU a et b

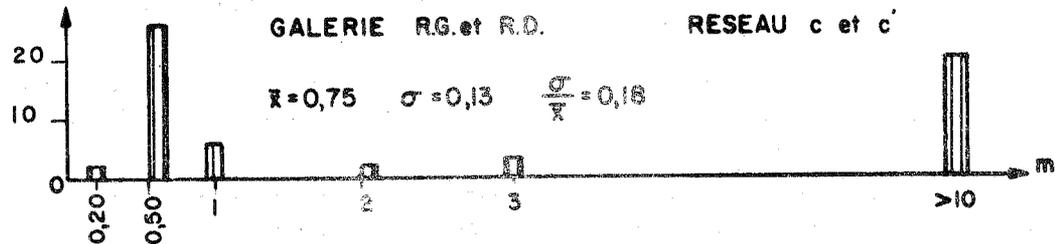
$$\bar{x} = 0,75 \quad \sigma = 0,38 \quad \frac{\sigma}{\bar{x}} = 0,46$$



GALERIE R.G. et R.D.

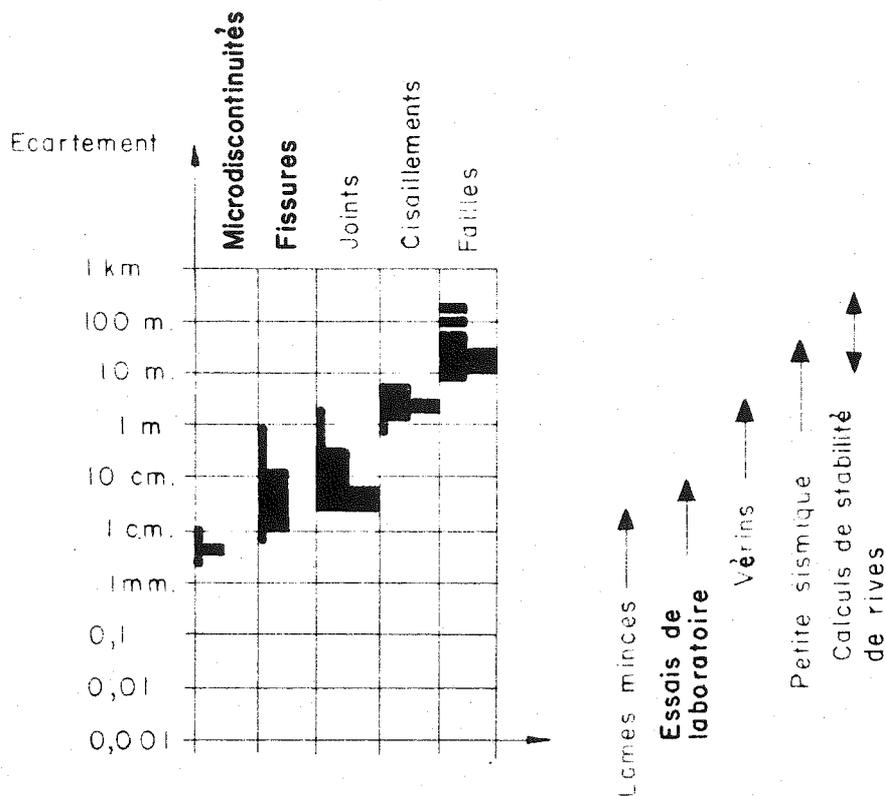
RESEAU c et c'

$$\bar{x} = 0,75 \quad \sigma = 0,13 \quad \frac{\sigma}{\bar{x}} = 0,18$$



REPARTITION DES DISCONTINUITES

SITE DU BARRAGE DE S^t CROIX
fig 46



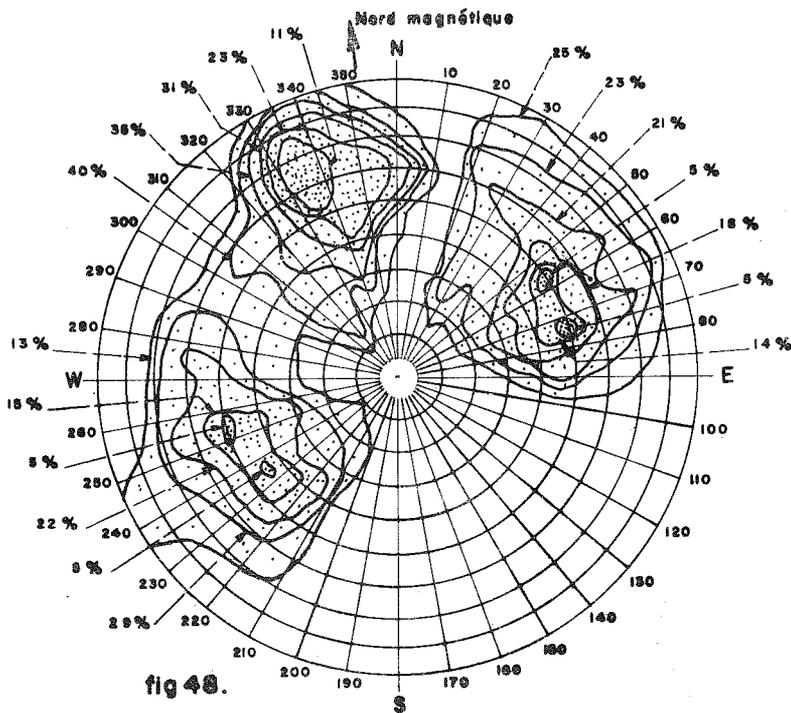
SITE DU BARRAGE DE MALPASSET

Fig. 47. -

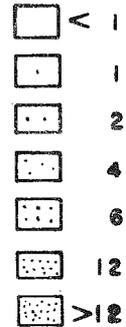
Nous trouvons sur les figures 48 et 49 les orientations des joints, des cisaillements et des failles relatives aux colonnes correspondantes du graphique d'écartement.

Dans la catégorie joints, on voit que les densités de points sont les mêmes : on doit donc considérer de façon égale les trois systèmes.

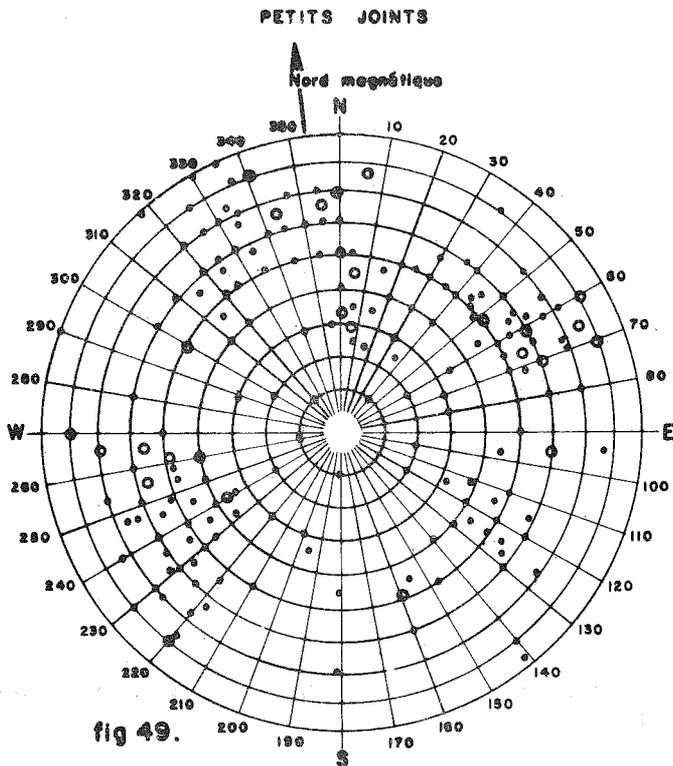
Pour les cisaillements et failles, le graphique reflète bien la complexité du site ; on peut cependant y reconnaître les deux systèmes tectoniques Nord-Sud et Est-Ouest.



Densité de points
(nombre de points par unité
de surface)



Les pourcentages donnent
la proportion de points
existant à l'intérieur de
la courbe correspondante



- Faille aval (partie basse)
- Cisaillement
- Faille

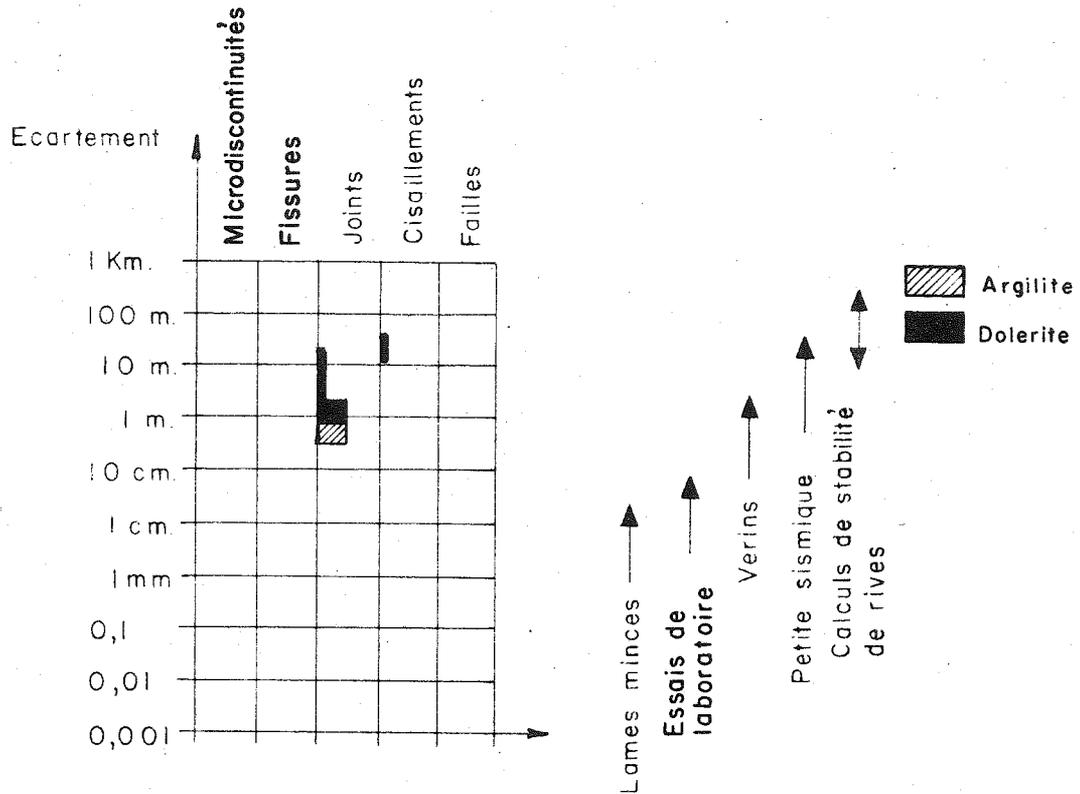
FAILLES ET CISAILLEMENTS

SITE DU BARRAGE DE
MALPASSET

5.2. Hendrik Verwoerd

La géologie du site a été décrite en détail au chapitre A.1.2. Une voûte de 90 m de hauteur y est actuellement en construction.

Dans ce cas, seuls les joints interviennent (figure 50) ; leur maille, trop grande, est telle que les essais au vérin sont à la limite de leur représentativité ; par contre, la petite sismique semble bien adaptée.



SITE DU BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD

fig 50.

Les figures 51 et 52 montrent des densités de points moyennes, indiquant que les réseaux n'ont pas des directions rigoureusement constantes. Le réseau horizontal et le réseau vertical nord ouest - sud est sont les plus marqués.

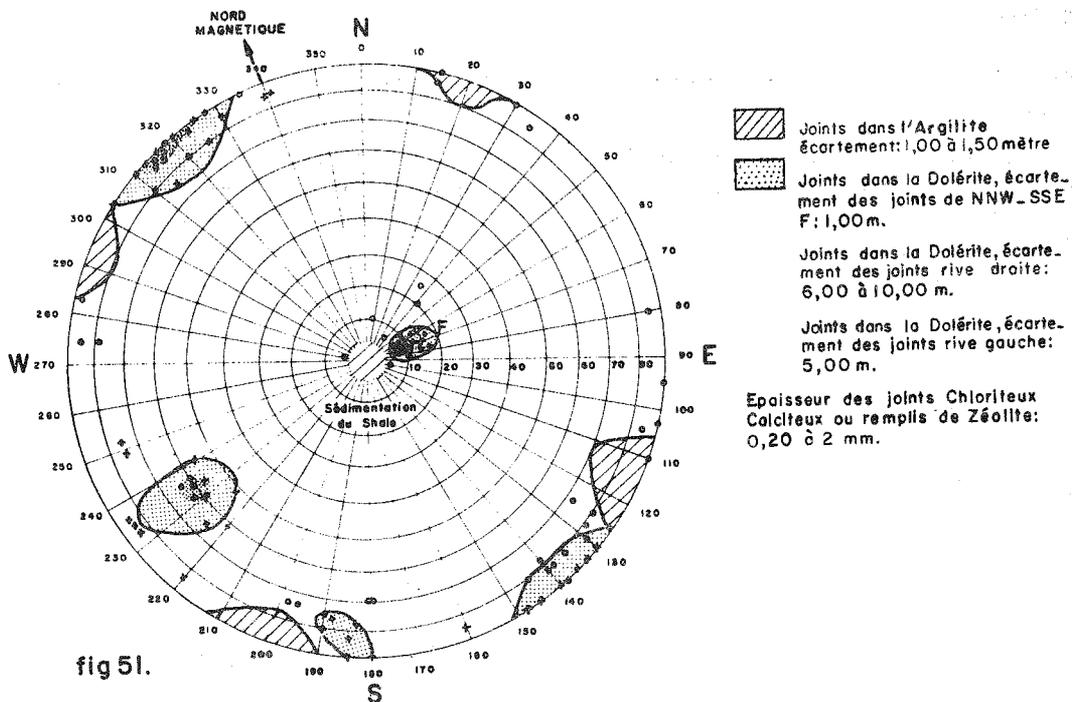


DIAGRAMME DES GRANDS JOINTS CONTINUS

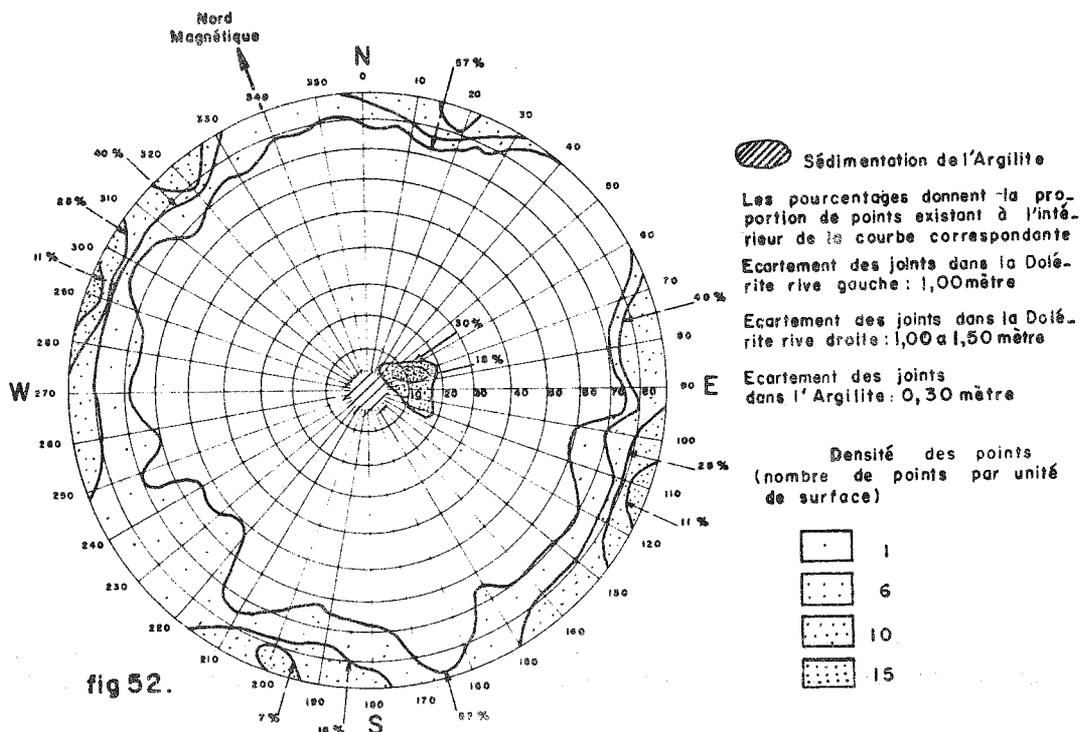


DIAGRAMME DES PETITS JOINTS

SITE DU BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD

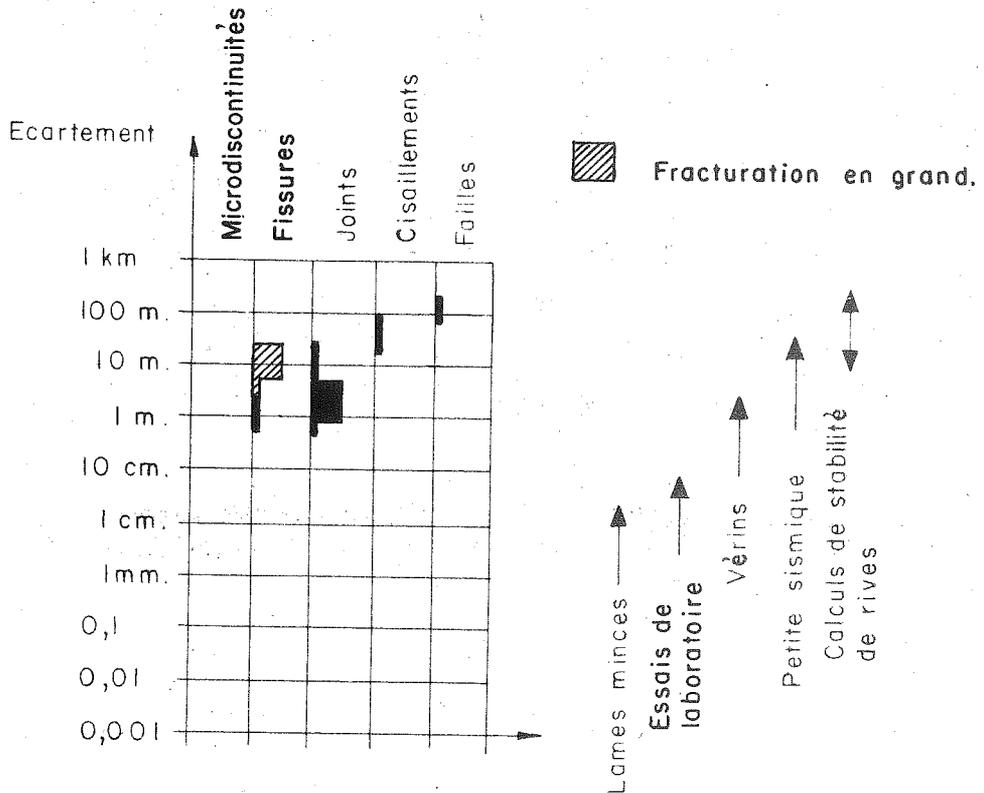
5.3. Tachien.

La géologie du site a été décrite en détail au chapitre A.1.3. Une voûte de 200 m est projetée.

Il y a lieu, dans ce cas, de dissocier le site principal de l'éperon rive gauche.

5.31. Site principal

Nous distinguons ici (figure 53), parmi les discontinuités moyennes qui définissent en majorité la structure, les joints et les "fractures" qui sont des discontinuités ouvertes, de grande extension, sans remplissage. Les écartements varient entre 0,50 m et 30 m.



SITE DU BARRAGE DE TACHIEN , Site principal
fig 53.

La maille des joints est telle que les résultats des essais au vérin risquent de ne pas être assez représentatifs ; c'est ce qui nous a obligé, dans les comparaisons de résultats d'essais au vérin et de petite sismique, à ne retenir que les emplacements où la maille était inférieure au mètre.

Les "fractures", ayant une maille importante, condamnent pratiquement les essais mécaniques de déformation. Par contre, l'emploi de procédés géophysiques est justifié.

La figure 54 montre que deux réseaux de joints ont une égale influence en ce qui concerne les directions ; l'un d'eux est formé par les joints de sédimentation.

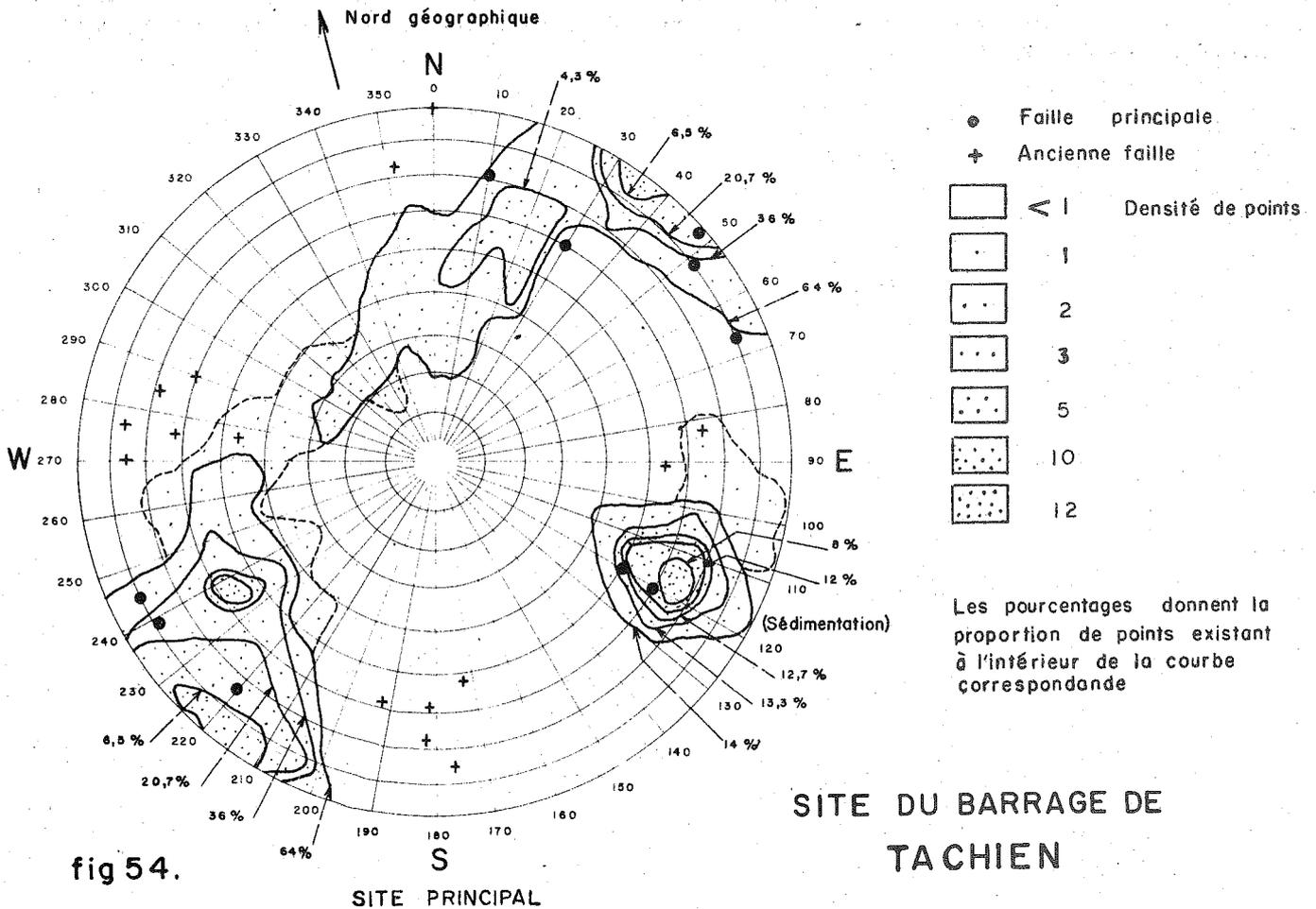
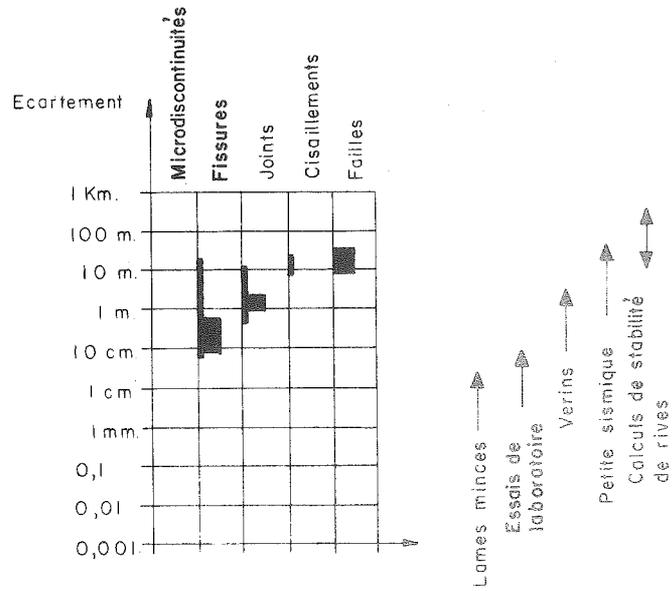


fig 54.

5.32. L'éperon rive gauche

La structure de l'éperon est quelque peu différente de celle du site car, si la maille des discontinuités est toujours du même ordre de grandeur, la présence de failles vient créer un problème supplémentaire (figure 55). On voit que leur maille étant petite, la cartographie risque d'être extrêmement difficile si on ne dispose pas d'un réseau d'investigation très serré. On a vu au chapitre A.1.3. que l'étude de cet éperon a été faite par un réseau impressionnant de galeries qui a permis de définir des zones de qualités différentes.

L'importance des failles a également nécessité des études particulières qui seront décrites au chapitre B.4. (délavage de remplissage, etc...).



SITE DU BARRAGE DE TACHIEN , Eperon

fig 55.

La figure 56 montre que les directions principales de discontinuités sont le pendage des couches et un réseau vertical NW-SE qui traverse perpendiculairement l'éperon.

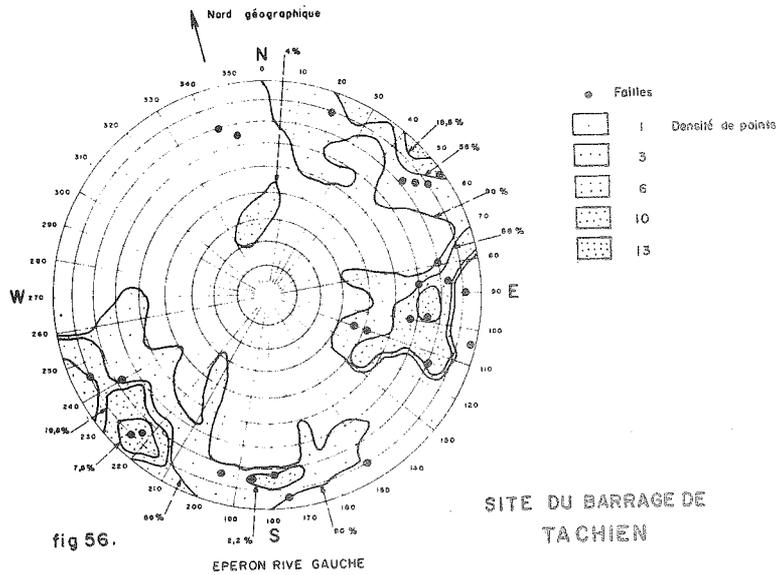


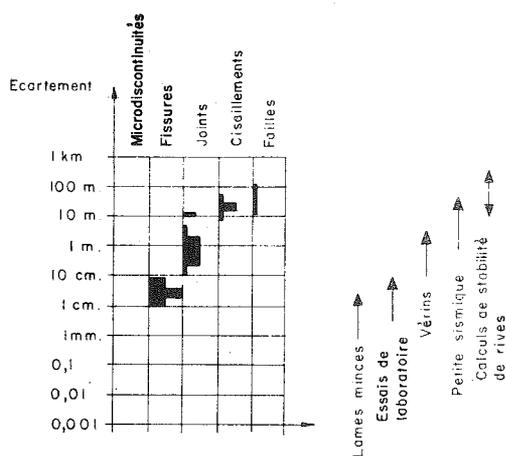
fig 56.

SITE DU BARRAGE DE TACHIEN

5.4. La Gittaz

La géologie du site a été décrite au chapitre A.III.5. Une voûte de 66 m est en construction.

L'étude des écartements des nombreuses discontinuités est donnée dans la figure 57. On peut voir que leur influence peut être connue en grande partie par des essais au vérin et, à plus forte raison, par la petite sismique. Il reste toutefois la présence de cisaillements ou failles qui impose la cartographie du site.



SITE DU BARRAGE DE LA GITTAZ
fig 57.

La figure 58 montre surtout la présence prépondérante d'une direction verticale NNE-SSW (perpendiculaire à la vallée) qui est liée à la direction de la schistosité et l'influence d'un réseau moins dense ESE-WNW. Ce deuxième réseau est à l'origine du phénomène de fauchage des bancs rive droite et de l'apparition de dalles plus ou moins instables sur la rive gauche où la surface topographique est parallèle aux joints.

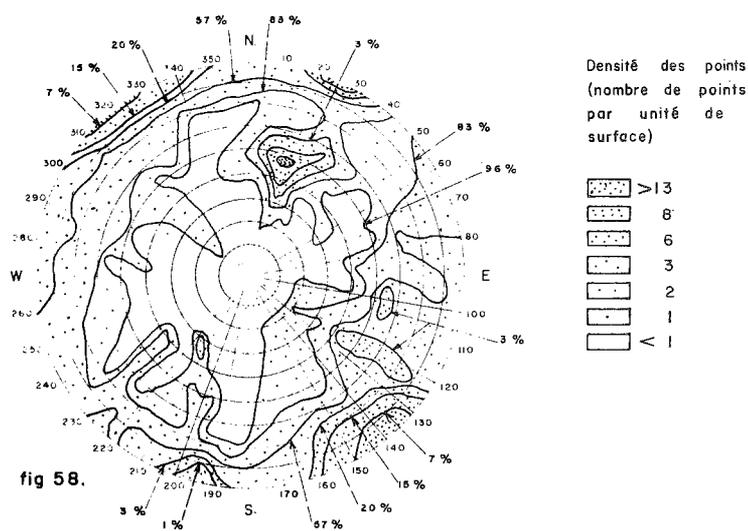


fig 58.

SITE DU BARRAGE DE LA GITTAZ

5.5. Barrage de Sainte-Croix

La géologie a été décrite au chapitre A. III. 8. Une voûte de 110 m est projetée.

On constate sur la figure 59, que c'est la présence des discontinuités à maille réduite qui régit la définition du massif. Leur étude est du ressort des essais au vérin ou de la petite sismique. On note la présence de cisaillements et de failles peu nombreuses qui imposent cependant une cartographie.

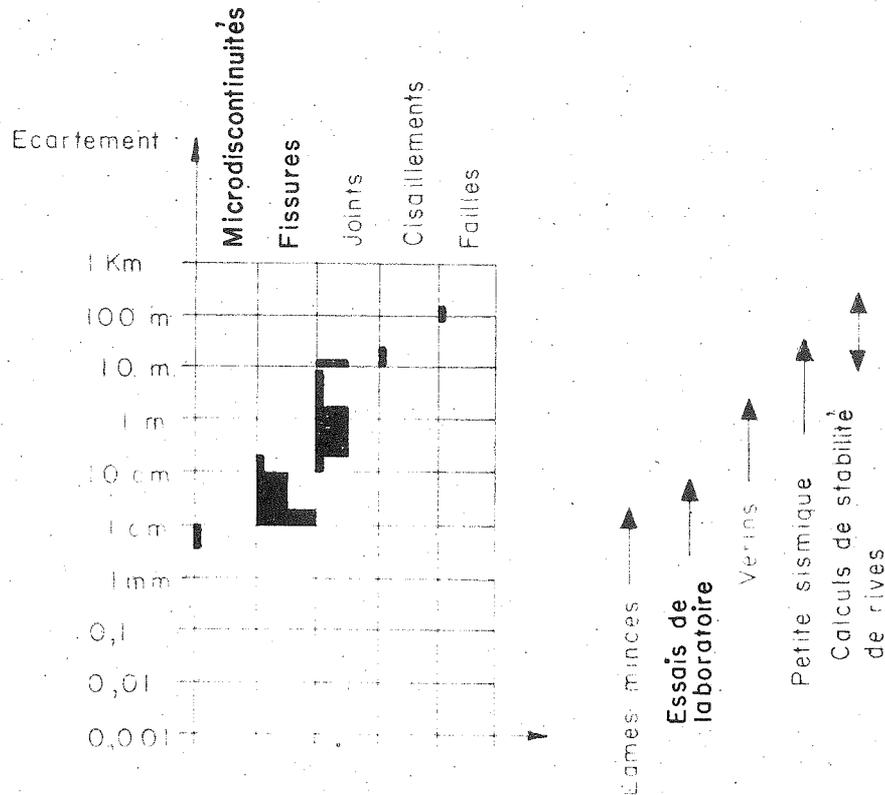


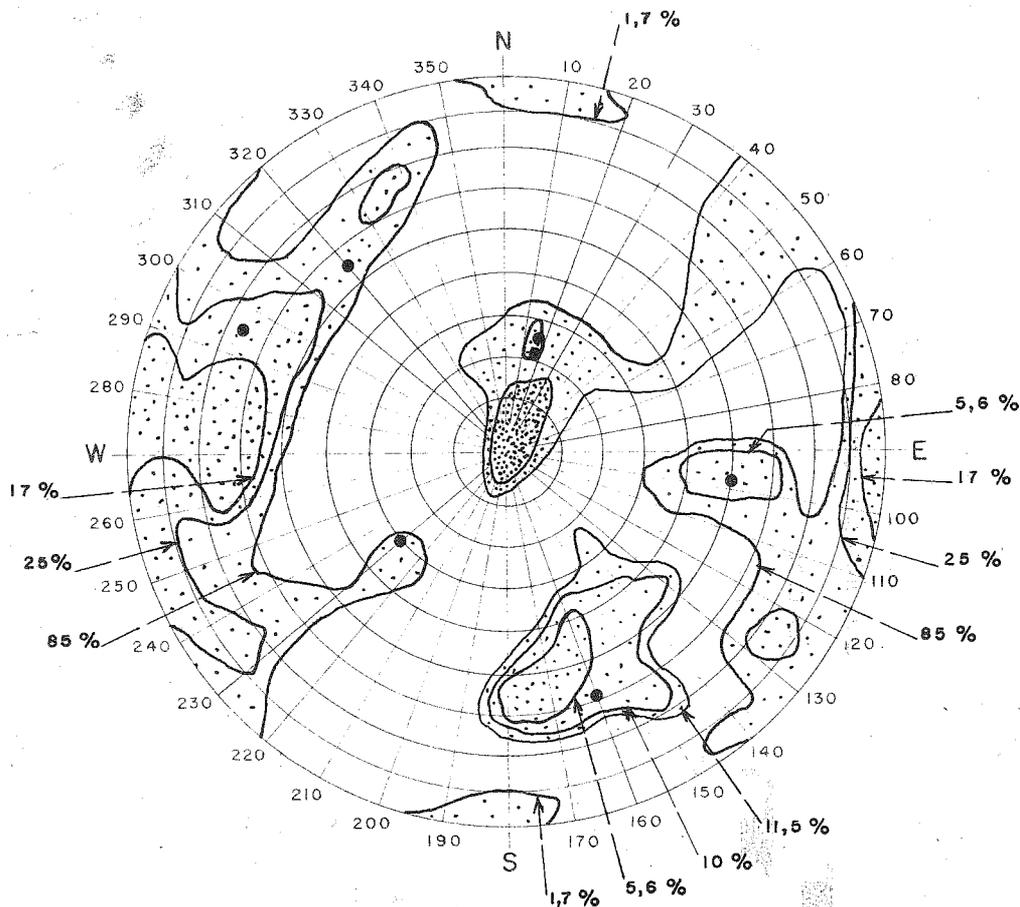
fig 59 SITE DU BARRAGE DE SAINTE CROIX

La figure 60 montre que la direction des discontinuités la plus fréquente est sensiblement horizontale : c'est la direction des couches. Les autres directions sont très floues, mais peuvent se décomposer en deux réseaux orthogonaux.

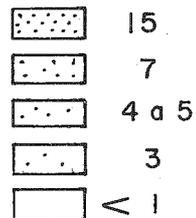
6. Conclusion

L'utilisation des graphiques d'écartements et d'orientation est multiple.

Les premiers, par leur représentation frappante, constituent une "fiche" pour chaque site, utilisable en particulier dans des comparaisons. Nous avons vu, en outre, qu'ils permettaient de connaître la validité d'un essai. On pourrait alors être tenté d'utiliser ces relevés statistiques systématiquement en appliquant à priori le système de reconnaissance justifié. Il peut toutefois exister un élément structural important, mais isolé donc non concerné par la statistique. On peut cependant penser que pour de petites dimensions de mailles, de l'ordre de quelques mètres, la méthode est satisfaisante car elle intéresse de nombreuses mesures. Mais au fur et à mesure



Densité des points
(nombre de points
par unité de
surface)



● Cisaillement

Les pourcentages
donnent la proportion
de points existant
à l'intérieur de la
courbe correspon-
dante.

SITE DU BARRAGE DE SAINTE CROIX

fig 60.

que les mailles augmentent, c'est-à-dire que le nombre de mesures intéressant directement le massif diminue, la présence d'un accident isolé peut prendre de plus en plus d'importance.

Les orientations sont utilisées dans les épreuves de stabilité des rives et par le projeteur dans la détermination des orientations des sondages, des voiles d'injection et de drainage. En effet, il est très facile, dans le graphique polaire, de représenter la direction de la poussée d'un barrage sur une rive, du poids d'un volume rocheux, des sous-pressions exercées sur les faces de ce volume. Il est toutefois préférable, dans ce cas, de faire une projection stéréographique car la projection Lambert proposée ici ne se prête pas commodément aux constructions géométriques nécessaires à l'étude de la stabilité.

Il ne faut pas non plus oublier que la mesure de tous les types de discontinuités constitue un travail de fond important qui force le géologue à parcourir tout le site, favorisant ainsi la découverte de détails qui pourraient passer inaperçus autrement.

Rappelons enfin que la nature de la discontinuité envisagée a une extrême influence sur le comportement du massif. Nous n'avons, dans cette étude, présenté que deux aspects de l'influence des discontinuités : orientation et écartement. Dans le cadre de l'étude générale d'un massif, le troisième aspect non traité ici - celui de la nature des interfaces et du remplissage - doit être étudié avec le même soin. Par exemple, les sites de La Gittaz et de Sainte-Croix montrent des graphiques d'écartements semblables, mais l'étude des interfaces montrerait, par exemple, que les fissures sont fermées et irrégulières à Sainte-Croix, ouvertes et planes à La Gittaz.

II. ESSAIS SUR ECHANTILLONS

En analysant les graphiques d'écartements définis au chapitre précédent on peut voir que, dans certains cas, les phénomènes observés sur échantillons peuvent expliquer une part notable de la réaction du massif. Dans le cas contraire, nous pensons qu'une étude sur échantillons est cependant souhaitable, car elle peut révéler un vice de la matrice, observé à l'échelle du décimètre cube, vice, plus ou moins indépendant de la structure et capable de compromettre la tenue de volumes beaucoup plus grands.

Nous allons analyser quelques cas d'essais sur échantillons.

1. Essais d'écrasement d'échantillons rocheux

Le but des essais entrepris est d'obtenir les valeurs des résistances à la compression simple par écrasement et, à la traction par écrasement brésilien (suivant les génératrices d'un cylindre), en fonction de la teneur en eau de l'échantillon et du temps d'immersion.

1.1.

La représentativité de l'échantillon est le premier écueil que l'on rencontre dans ce type d'essai. Pour effectuer nos expériences, nous avons prélevé des échantillons en des points caractéristiques des sites en cours d'étude, ces échantillons représentent un volume plus ou moins grand de roche située autour du point de prélèvement, mais pas nécessairement le volume entier du massif. Il faut donc considérer que les phénomènes mis en lumière sont seulement afférents à la roche étudiée localement. Le passage au site demanderait un nombre considérable d'échantillons que nous n'avons pas toujours pu recueillir.

Nous nous sommes particulièrement intéressé à l'effet de l'imbibition d'un échantillon sur sa résistance à l'écrasement. Il est hors question d'en déduire une valeur absolue de la charge limite que peut supporter le massif, mais il est intéressant de comparer les résultats d'essais exécutés après humidification, une variation relative notable pouvant être révélatrice d'un vice de la matrice rocheuse.

1.2. Choix des échantillons

Nous avons utilisé soit des cubes taillés dans des blocs de 50 à 200 kg, soit des cylindres extraits de carottes de sondage. Dans chaque cas, nous avons indiqué la source du prélèvement, effectué en général en un seul point du site. Le fait que le sciage ait été possible montre déjà qu'il s'agit de bons échantillons.

Les cubes mesuraient 40 mm de côté et les cylindres 41 mm de diamètre et 83 mm de longueur. Notons que les valeurs des résistances à la compression sont différentes pour un échantillon cylindrique et un échantillon cubique. Par exemple, au barrage de Pahlavi (FOX - 1964), sur des conglomérats et molasses, la valeur trouvée sur cube est 20% supérieure à la valeur trouvée sur cylindre. Dans le cas du béton, pour des résistances à la compression simple de 250 bars, G. BREUX (1965) trouve 15 à 20% de différence.

Comme nous nous intéressons surtout aux variations relatives, nous pourrions négliger cette différence.

Le tableau ci-dessous donne l'ensemble des échantillons essayés :

Sites	Emplacement, nature de l'ouvrage, hauteur	Nature de la fondation	Nombre de cubes	Nombre de cylindres
MALPASSET	Esterel - France voûte, 66 m	gneiss	104	
YATE	Nouvelle-Calédonie voûte, 55 m	serpentinite	50	
ST-CHAMOND	Vivarais - France voûte, 45 m	micaschiste	51	
SALAGOU	Languedoc - France enrochement, 65 m	argilite	42	27
GRANDVAL	Massif-Central France voûtes multiples, 88 m	gneiss	15	13
TACHIEN	Ile de Formose voûte, 200 m	quartzite		64
KYLE	Rhodésie voûte, 65 m	granite	127	
BANGALA	Rhodésie voûte, 45 m	gneiss	211	
MONTEYNARD	Dauphiné - France voûte, 155 m	calcaire marneux	40	380
NAGUILHES	Roussillon - France voûte, 60 m	granite		80

La composition pétrographique des échantillons essayés a été étudiée au chapitre A.III.

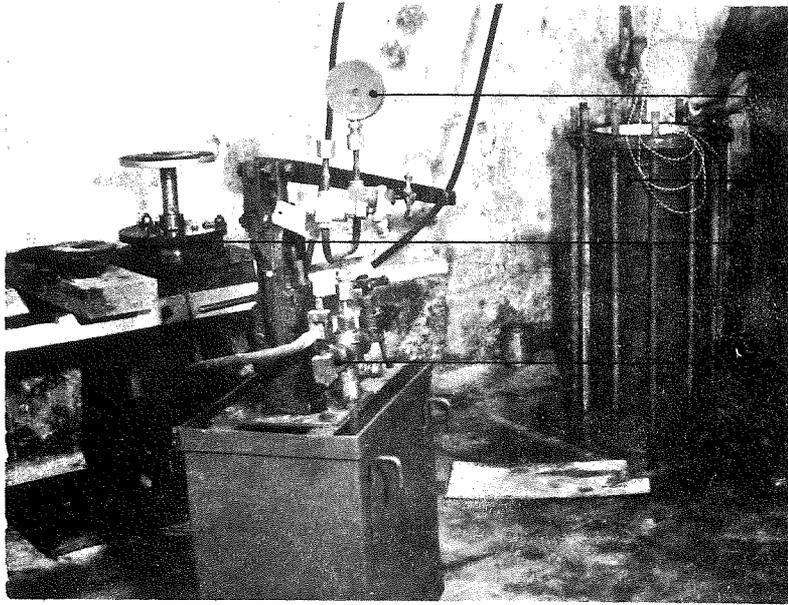
Les cubes de gneiss du site de Malpasset ont été taillés dans des blocs prélevés en bas de la rive gauche, à l'aval immédiat de la voûte. C'est un gneiss du type fibreux dont l'analyse pétrographique a été faite au chapitre A.I.1. Notons que les cubes essayés ne présentaient que peu de microdiscontinuités par rapport à la moyenne du site (1 microdiscontinuité de 1 à 2 μ par cube).

1.3. Conditions d'essai

1.31. Humidification des échantillons

L'essai dit à sec est effectué en réalité avec des échantillons à teneur en eau faible, c'est-à-dire après un séjour d'un certain temps dans un local abrité où on stocke les cubes en attente. Cette valeur est inférieure à 0,2%.

Pour obtenir l'imbibition, la série d'échantillons est placée dans une cuve (figure 61) calculée pour résister à une pression interne de 50 bars. La cuve est mise sous vide pendant une ou deux heures, afin de dégazer les échantillons, et ensuite remplie d'eau que l'on porte à la pression de 10 bars. Au bout d'un temps donné, les échantillons sont sortis, essayés sous la presse (figure 62) et la teneur en eau est mesurée sur une



Manomètre.

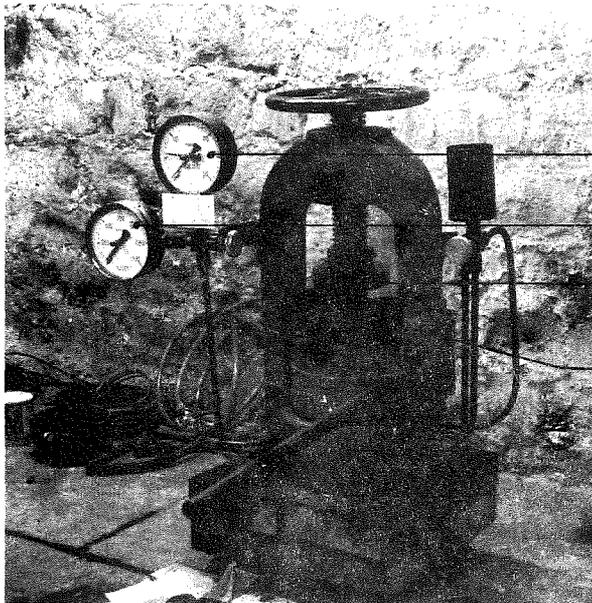
Cuve.

Plateau de réglage
maintenant la pression
constante.

Pompe de mise en
pression.

fig 61.

CUVE ET POMPE A PRESSION UTILISEES POUR LA
SATURATION DES ECHANTILLONS



Manomètre basse pression

Manomètre haute pression

Plateau supérieur de réglage

Plateau inférieur sur rotule

fig 62.

PRESSE LE PETIT DE 30 TONNES UTILISEE
POUR LES ESSAIS D'ECRASEMENT

MATERIEL UTILISE POUR LES ECRASEMENTS
DES CUBES SATURES D'EAU SOUS PRESSION

prise moyenne. Les porosités n'ont pas été mesurées directement ; par contre, nous avons pu les estimer par la méthode optique décrite au paragraphe 3.4. ; dans tous les cas, elles étaient inférieures à 0,5%.

1.32. Compression

Pour chaque série d'essais, un certain nombre de cubes ou de cylindres sont écrasés sous presse. Une feuille de carton est interposée sous chaque face. Les cylindres ont une hauteur égale à environ deux fois leur diamètre. La manœuvre de la pompe est manuelle, mais on s'est efforcé d'obtenir une montée en pression régulière : environ 10 bars par seconde ; le chiffre noté est la pression maximale atteinte pour la rupture ; nous avons également noté les pressions pour lesquelles se produisent les premiers craquements, mais n'avons toutefois pas fait usage de ces pressions trop irrégulièrement distribuées.

1.33. Traction brésilienne

Nous avons utilisé l'essai brésilien dans lequel un cylindre parfaitement dressé est écrasé sous presse suivant deux génératrices ; la valeur de la résistance à la traction est $R' = \frac{Q}{\pi DL}$

Q = charge lue sur la presse

D = diamètre de l'échantillon

L = longueur de l'échantillon

On doit toutefois remarquer que la théorie de l'essai brésilien (PELETIER - 1954) fait ressortir en milieu saturé une augmentation de la pression moyenne au centre de l'échantillon, donc sans doute également une augmentation des pressions interstitielles.

Quand nous ne disposions pas de cylindres, nous avons utilisé des cubes de 4 x 4 x 4 cm écrasés entre deux cylindres métalliques de diamètre 4 cm, car l'écrasement d'un certain nombre de cylindres et de cubes tirés d'un même site (Monteynard) a montré que l'approximation était valable en utilisant la même formule avec la même réserve que précédemment.

1.4. Résultats

1.41.

Les figures 63 à 71 donnent les résultats élémentaires de chaque essai. Nous avons traduit en graphiques, chaque fois que le nombre d'essais était suffisant, l'évolution des résistances à la traction et à la compression et des teneurs en eau en fonction du temps d'immersion dans l'eau à 10 bars.

Pour les sites de Tachien, Kyle, Bangala, Naguilhes, nous n'avons exécuté qu'une série d'essais dits à sec (en fait à teneur en eau très faible) et humide (en général 80% de la saturation). Dans ce cas, le nombre d'essais est suffisant pour obtenir une représentation statistique.

Le tableau I résume les caractéristiques notables obtenues par la série d'essais ; la figure 72 donne les variations de résistances à la compression et à la traction brésilienne par rapport à la résistance initiale en fonction du temps d'immersion.

1.411. Résistance à la compression

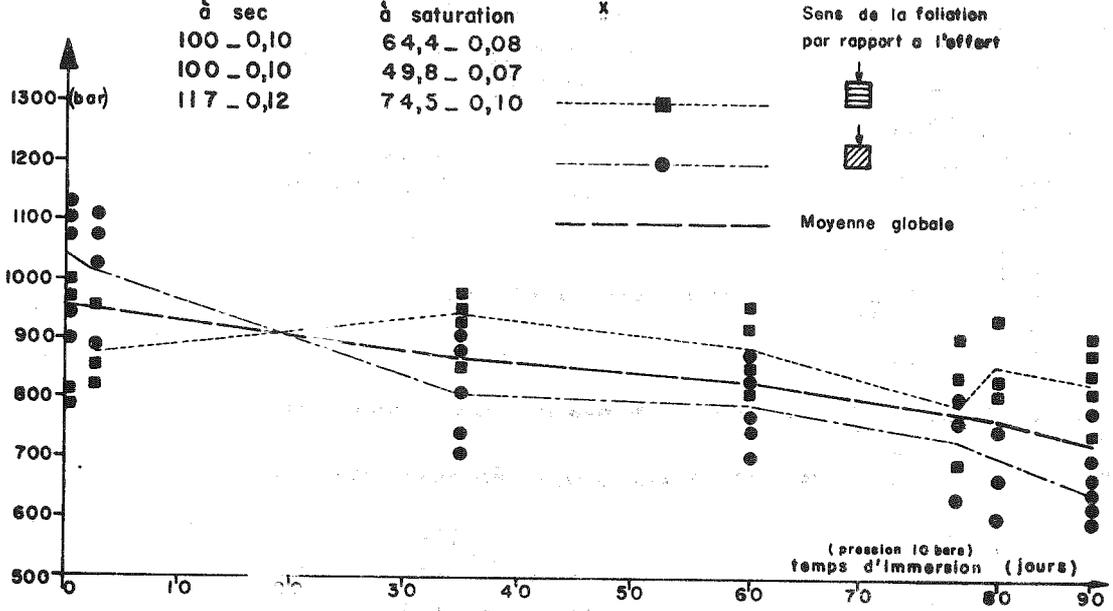
Les résistances à la compression diminuent avec la saturation et le temps d'immersion ; l'évolution est plus ou moins rapide et, sauf pour les argilites de Salagou, semble continuer à la fin de l'expérience qui a été arrêtée faute d'un nombre suffisant de cubes ; le temps nécessaire à la stabilisation du phénomène est court pour les argilites (3 jours), doit être plus long pour les calcaires et encore plus long pour les roches cristallines (voir figure 72).

La chute de résistance ne semble pas dépendre de la pression de l'eau de saturation. Ce phénomène est

COMPRESSION SUR CUBES DE 4 cm.

Écart type σ et coefficient de variation $\frac{\sigma}{\bar{x}}$

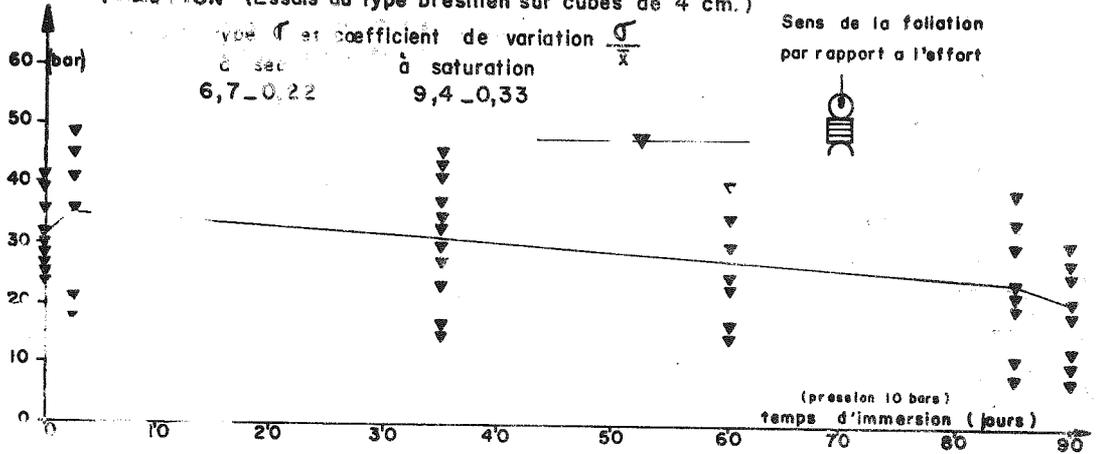
	à sec	à saturation
	100 - 0,10	64,4 - 0,08
	100 - 0,10	49,8 - 0,07
	117 - 0,12	74,5 - 0,10



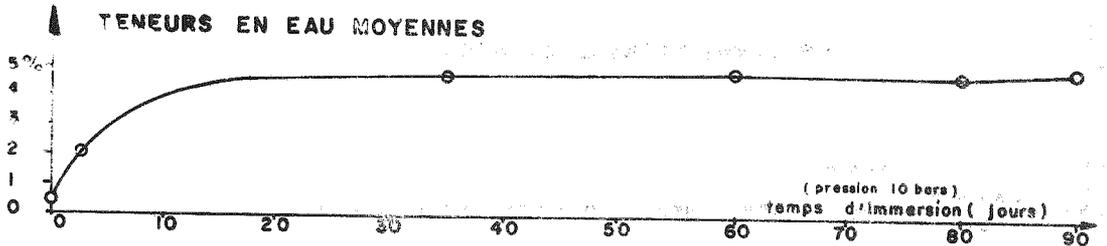
TRACTION (Essais du type brésilien sur cubes de 4 cm.)

Écart type σ et coefficient de variation $\frac{\sigma}{\bar{x}}$

	à sec	à saturation
	6,7 - 0,22	9,4 - 0,33

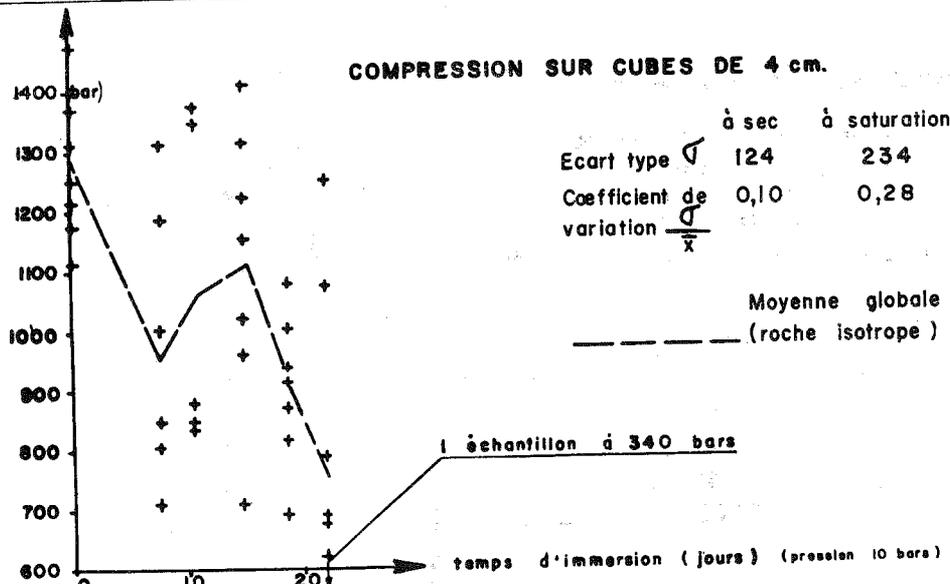


TENEURS EN EAU MOYENNES

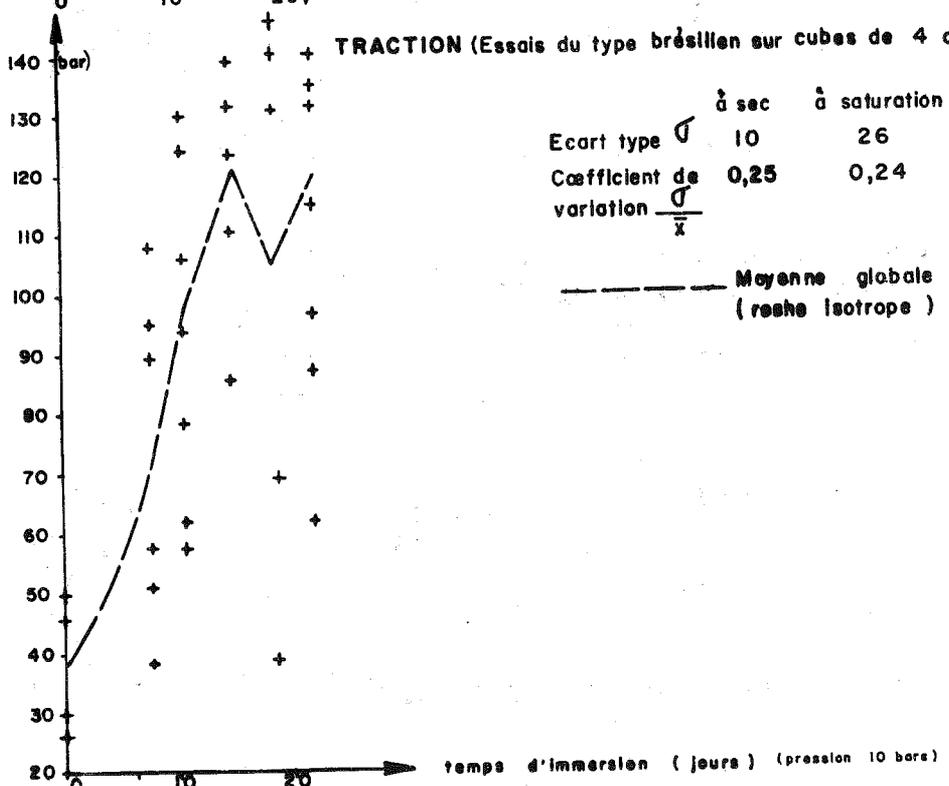


SITE DU BARRAGE DE MALPASSET
ESSAIS D'ECRASEMENT

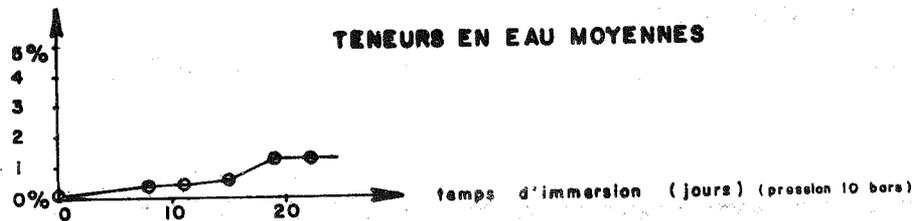
COMPRESSION SUR CUBES DE 4 cm.



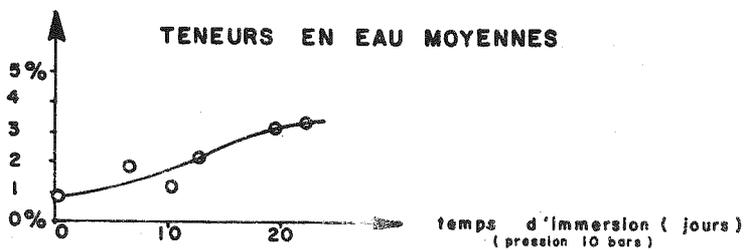
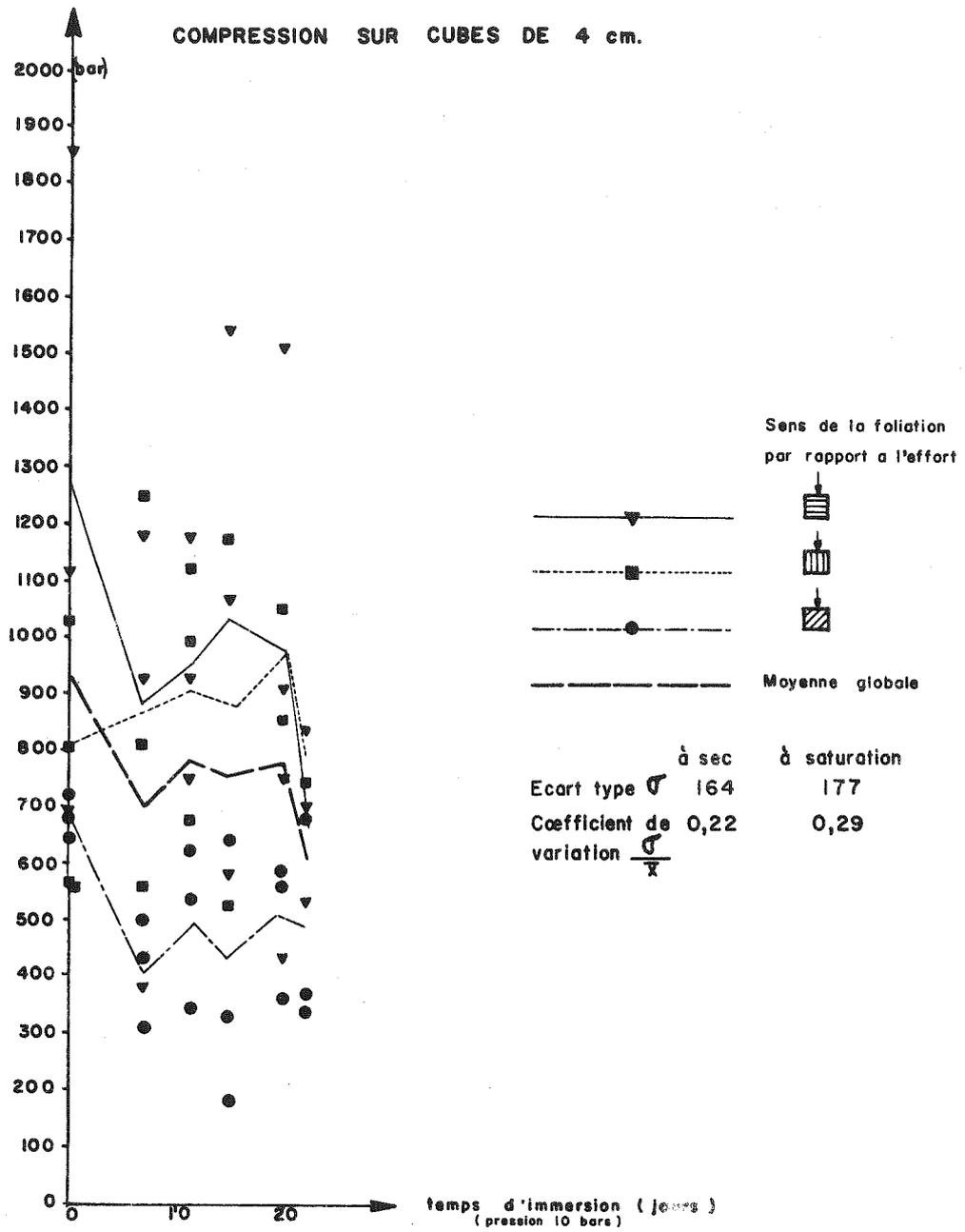
TRACTION (Essais du type brésilien sur cubes de 4 cm.)



TENEURS EN EAU MOYENNES



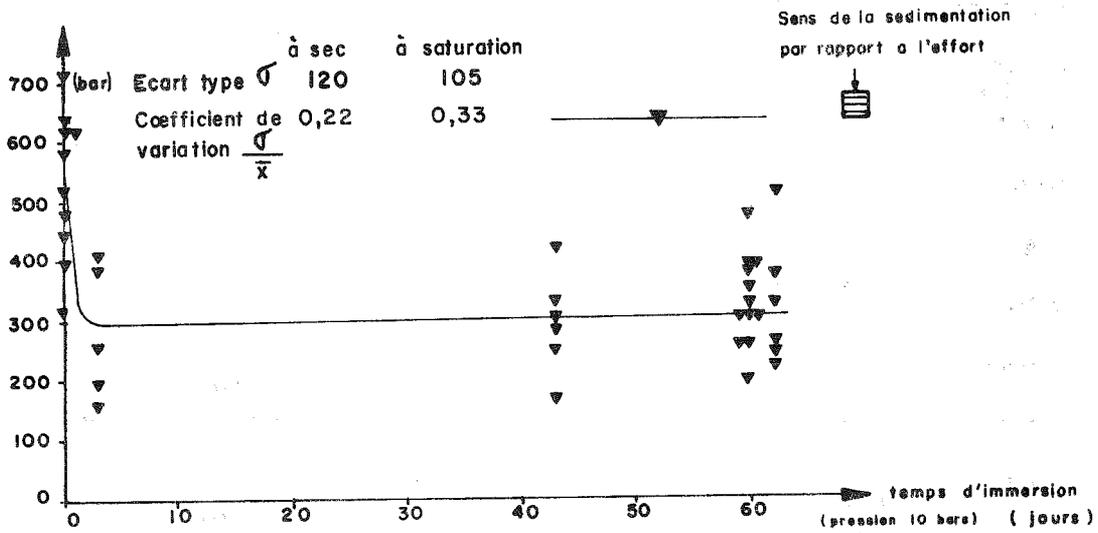
SITE DU BARRAGE DE YATÉ
ESSAIS D'ECRASEMENT



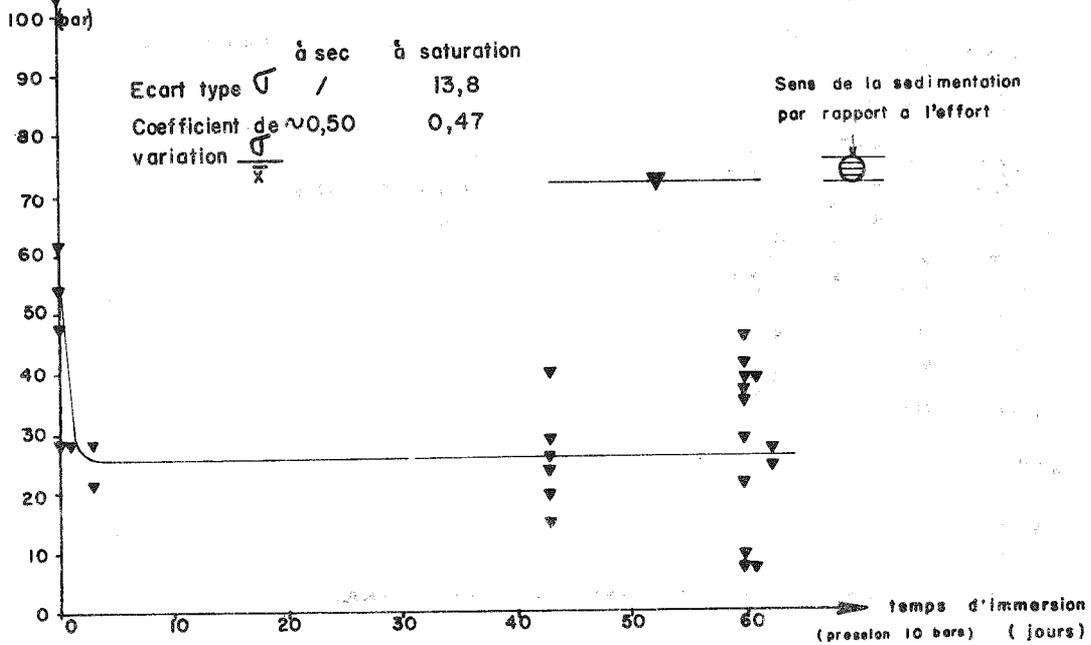
SITE DU BARRAGE DE SAINT CHAMOND
 ESSAIS D'ECRASEMENT

fig 65.

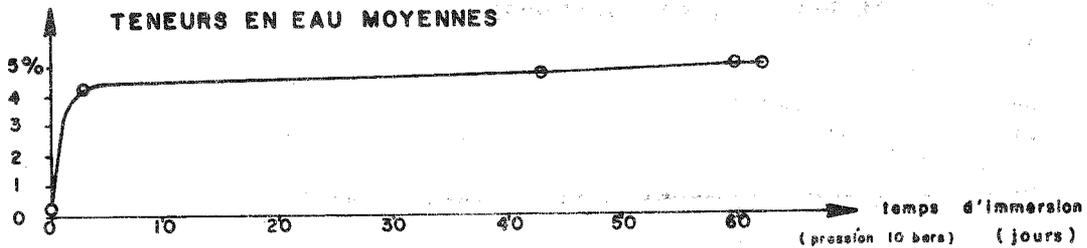
COMPRESSION SUR CUBES DE 4 cm.



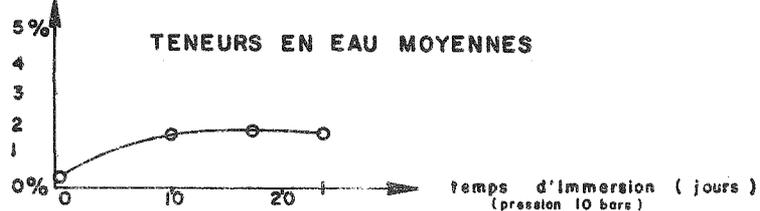
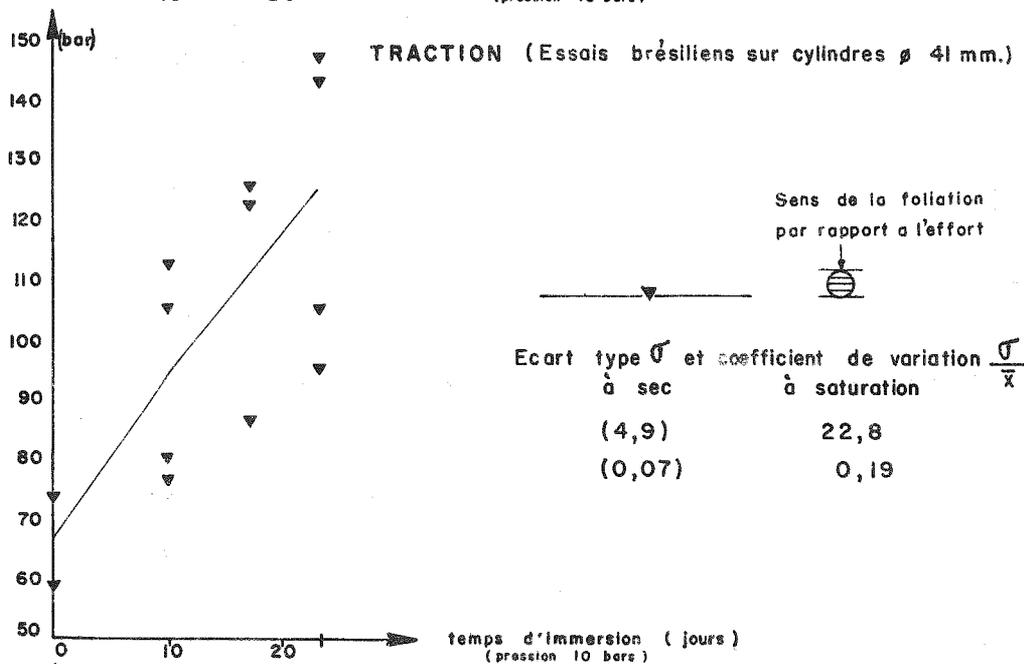
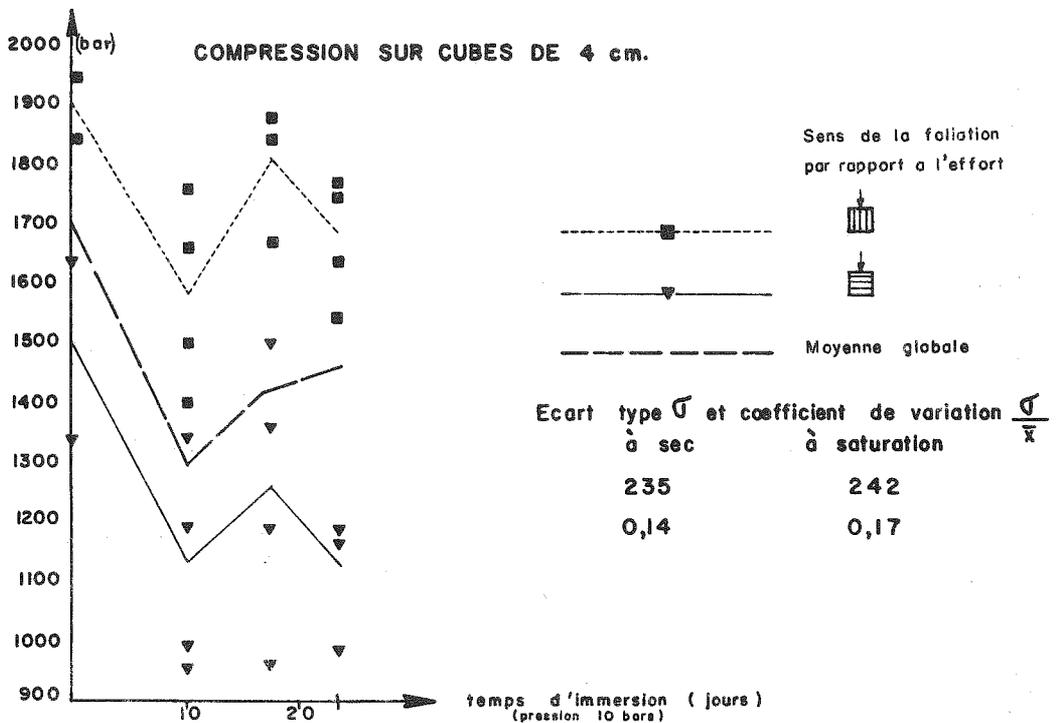
TRACTION (Essais brésillens sur cylindre de ϕ 41 mm.)



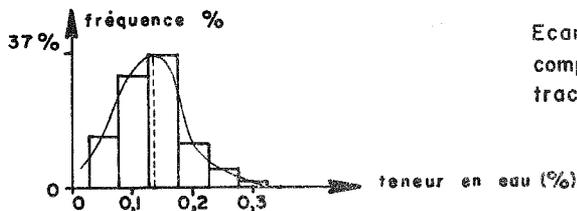
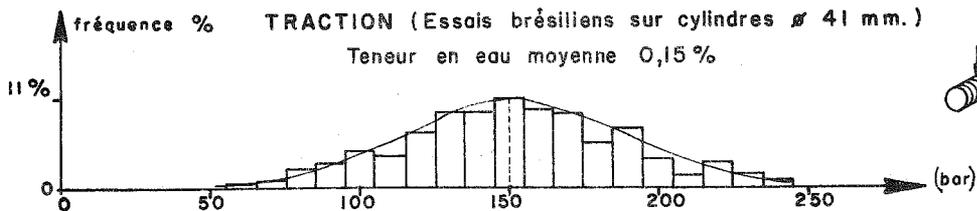
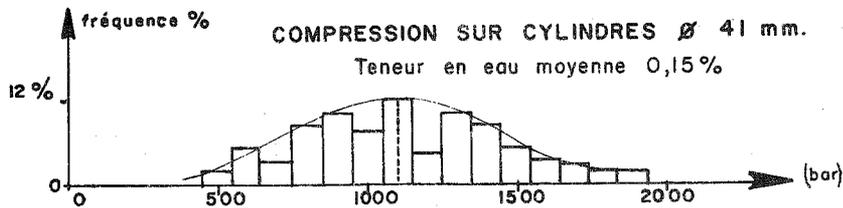
TENEURS EN EAU MOYENNES



SITE DU BARRAGE DE SALAGOU
ESSAIS D'ÉCRASEMENT

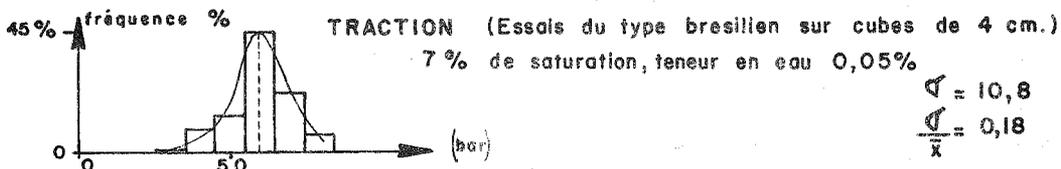
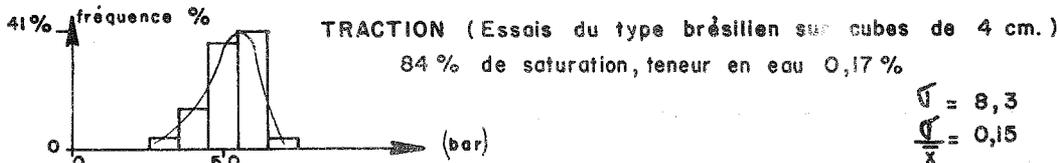
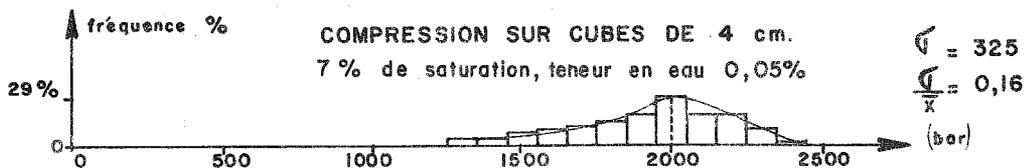
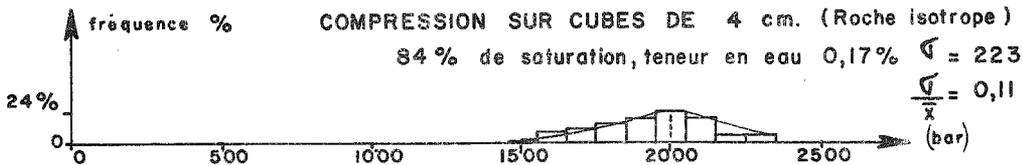


SITE DU BARRAGE DE GRANDVAL
ESSAIS D'ECRASEMENT
fig 67.



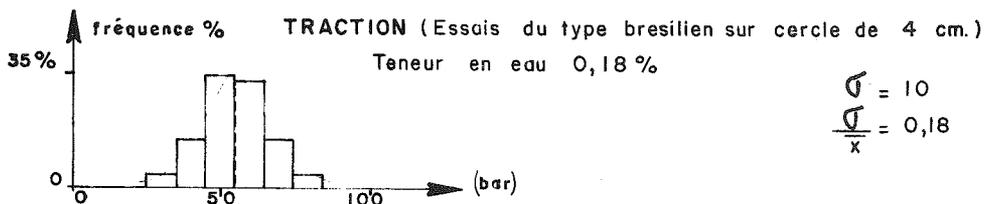
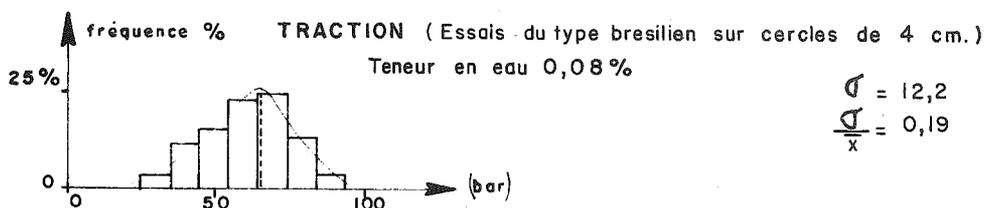
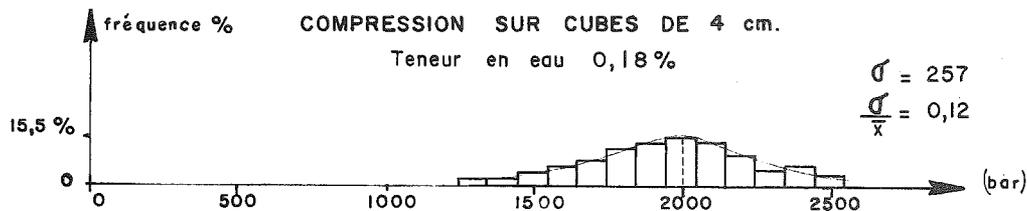
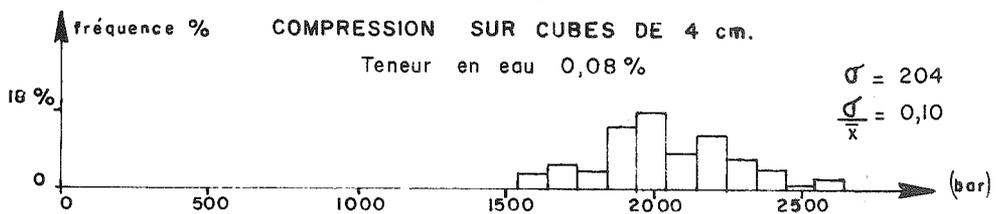
Ecart type σ et coefficient de variation $\frac{\sigma}{\bar{x}}$
 compression: 317 - 0,29
 traction: 35 - 0,23

SITE DU BARRAGE DE TACHIEN
 ESSAIS D'ECRASEMENT



SITE DU BARRAGE DE KYLE
 ESSAIS D'ECRASEMENT

Résultats groupés



Résultats particuliers

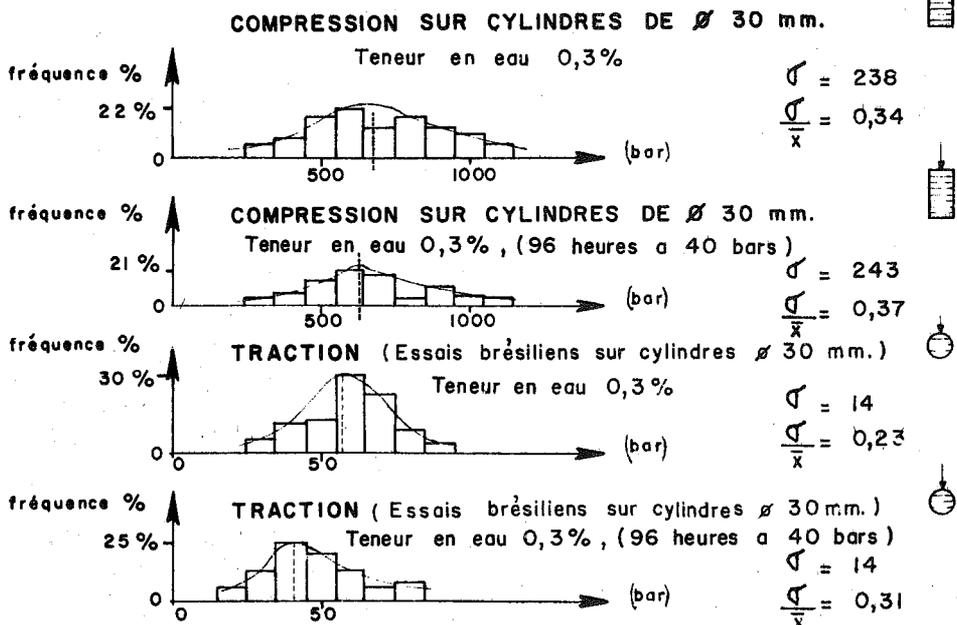
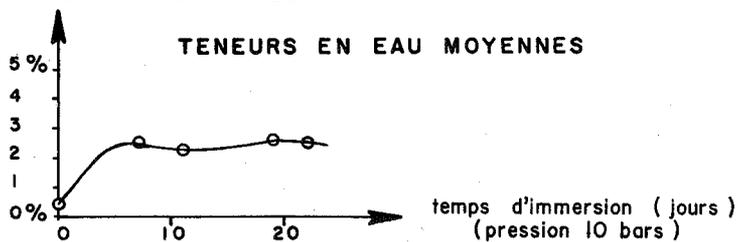
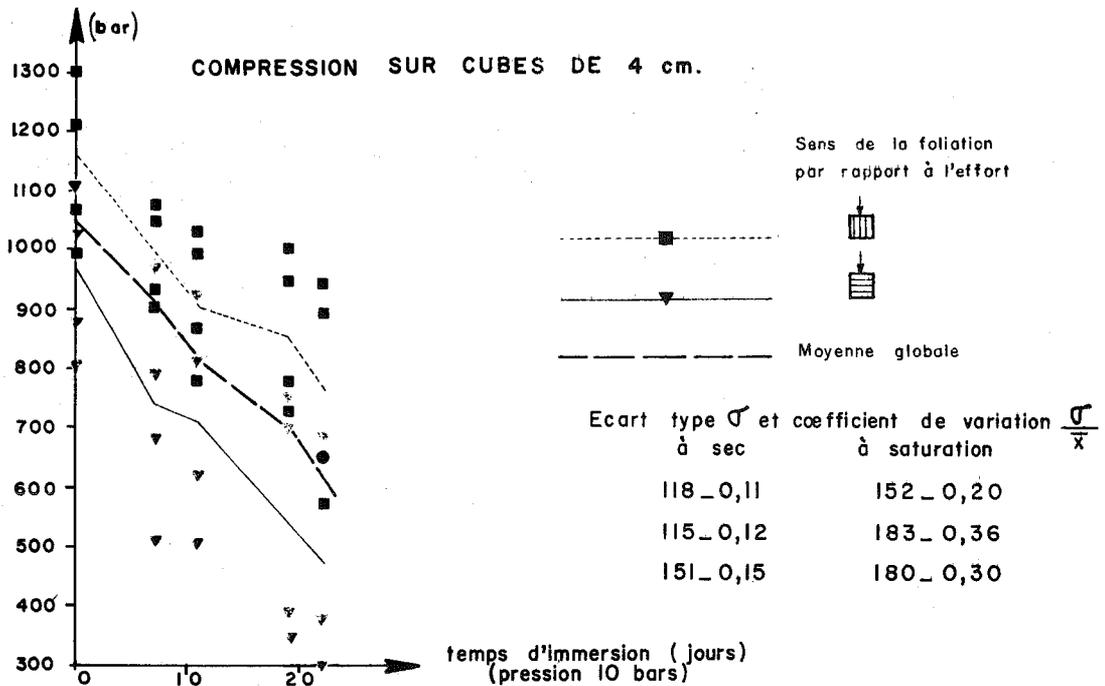
compression		orientation de la foliation	traction	
sec (0,08%)	humide (0,18%)		sec (0,08%)	humide (0,18%)
2015 bars	2090 bars		62 bars	54 bars
2120 bars	2170 bars		67 bars	57 bars
2015 bars	1915 bars		68 bars	57 bars

NOTA

σ : Ecart type

$\frac{\sigma}{\bar{x}}$: Coefficient de variation

SITE DU BARRAGE DE BENGALA
ESSAIS D'ECRASEMENT
fig 69.

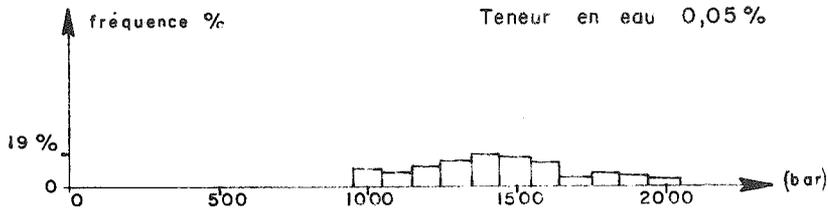


SITE DU BARRAGE DE MONTEYNARD
ESSAIS D'ECRASEMENT

fig 70.

COMPRESSIONS SUR CYLINDRES DE ϕ 30 mm.

Teneur en eau 0,05 %

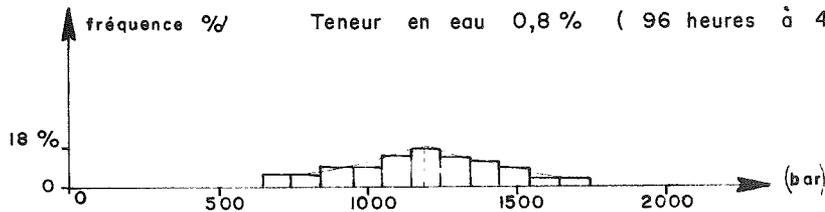


$$\sigma = 297$$

$$\frac{\sigma}{\bar{x}} = 0,21$$

COMPRESSIONS SUR CYLINDRES DE ϕ 30 mm.

Teneur en eau 0,8 % (96 heures à 40 bars)

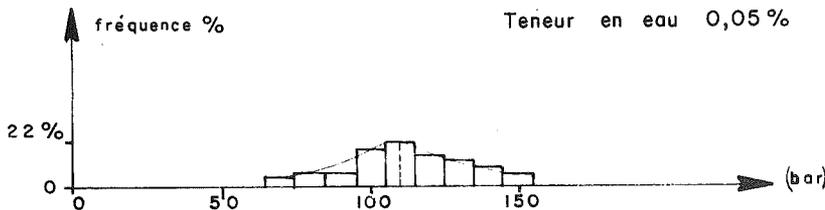


$$\sigma = 235$$

$$\frac{\sigma}{\bar{x}} = 0,20$$

TRACTION (Essais brésiliens sur cylindres ϕ 30 mm.)

Teneur en eau 0,05 %

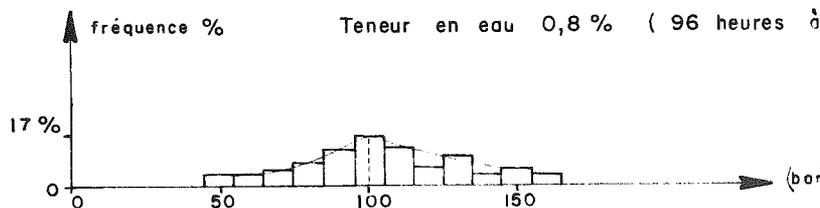


$$\sigma = 24$$

$$\frac{\sigma}{\bar{x}} = 0,21$$

TRACTION (Essais brésiliens sur cylindres ϕ 30 mm.)

Teneur en eau 0,8 % (96 heures à 40 bars)



$$\sigma = 27$$

$$\frac{\sigma}{\bar{x}} = 0,27$$

NOTA

σ : Ecart type

$\frac{\sigma}{\bar{x}}$: Coefficient de variation

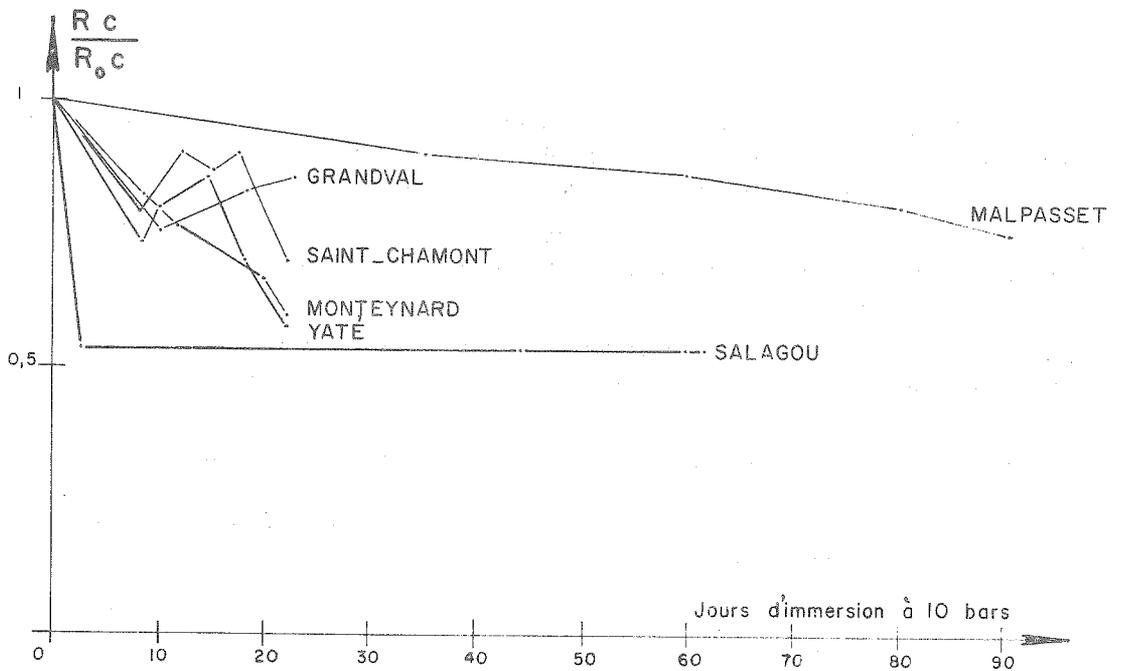
SITE DU BARRAGE DE NAGUILHES

ESSAIS D'ECRASEMENT

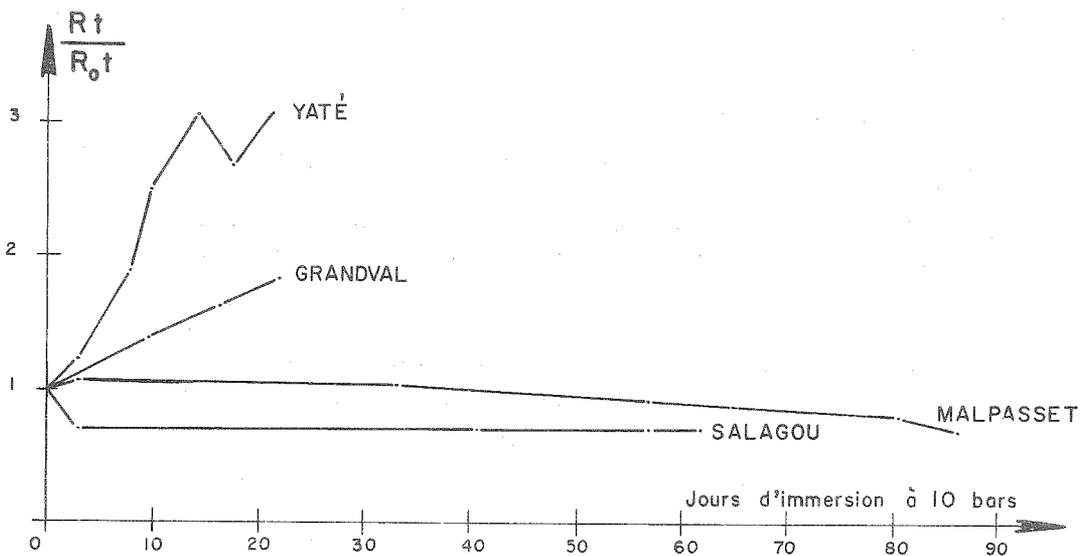
fig 71.

Nom du site	Chute % à la compression			Teneur en eau	Chute % à la traction			Dispersion Coefficient de variation $\frac{\sigma}{\bar{x}}$	
								a sec	a saturation
MALPASSET (Gneiss)	6,7 % lineaire	/	37,5 % lineaire	0,4 à 5 % très rapidement puis palier	/	43 % lineaire, (augmente tout au début)	/	compression = 0,12 traction = 0,22	0,10 0,33
YATE (Serpentinite)	lineaire 36 %			0,08 à 1,1 % lineairement	augmente 450 % lineaire puis se stabilise			compression = 0,10 traction = 0,25	0,28 0,24
S¹ CHAMOND (Micaschiste)	6,2 % à la fin	49 % lineaire	29,5 % lineaire	0,8 à 3,2 % lineairement				compression = 0,22	0,29
SALAGOU (Argilite)	/	45 % chute brutale puis palier	/	0,3 à 5 % très rapidement puis palier	/	36,5 % chute brutale puis palier	/	compression = 0,22 traction = 0,50	0,33 0,47
GRANDVAL (Gneiss)	10,5 % chute	/	26,5 % reste en palier	0,3 à 1,8 % très rapidement puis palier	/	46 % augmente lineairement	/	compression = 0,14 traction = 0,07	0,17 0,19
TACHIEN (Quartzite)				faulle 0,15 %				compression = 0,29 traction = 0,23	
KYLE (Granite)	0 % (Echantillon isotrope)			0,05 à 0,17 %	11 % (Echantillon isotrope)			compression = 0,16 traction = 0,18	0,11 0,15
BANGALA (Gneiss)	0%	0%	0%	0,08 à 0,18 %	13 %	15 %	16 %	compression = 0,10 traction = 0,19	0,12 0,18
MONTEYNARD (Calcaire marneux)	35 % lineaire	/	45 % lineaire	0,4 à 2,5 % rapide (7 j) puis palier	25 %	/	/	compression = 0,34 traction = 0,23	0,37 0,31
NAGUILHES (Granite)	15,5 % (Echantillon isotrope)			0,05 à 0,8 %	8 % (Echantillon isotrope)			compression = 0,21 traction = 0,21	0,20 0,27

Tableau I



Variation de la résistance à la compression par rapport à la résistance initiale en fonction du temps d'immersion dans l'eau à 10 bars



Variation de la résistance à la traction brésilienne par rapport à la résistance initiale en fonction du temps d'immersion dans l'eau à 10 bars

fig 72.

bien mis en lumière à Monteynard où la chute de résistance à la compression d'une série d'échantillons mis sous pression à 40 bars est la même - 7 à 10% au bout de quatre jours - que celle d'une autre série immergée à 10 bars. Or, cette dernière série au bout de l'expérience (22 jours) a enregistré une chute totale de 38%.

Au chapitre B.II.3. (lames minces colorées), nous verrons que ces cycles d'humidification et de dessiccation se sont traduits, en deux ans, par une augmentation très notable des microdiscontinuités sans toutefois amener la dissociation des échantillons.

De son côté, COLBACK (1964) donne pour des argilites quartziteuses, une chute de 50% ; mais il s'agit d'une chute de résistance par rapport à un échantillon sec (0% d'eau), alors que nous avons toujours une faible teneur en eau pour les échantillons de départ.

Les chutes moyennes de résistance à la compression sont classées ci-après par ordre décroissant :

Argilite	(Salagou)	45,5%	teneur en eau finale	5%
Calcaire marneux	(Monteynard)	43%	" " "	2,5%
Serpentinite	(Yaté)	36%	" " "	1,1%
Micaschiste	(St-Chamond)	35,5%	" " "	3,2%
Gneiss	(Malpasset)	23%	" " "	5%
Granite	(Naguilhes)	15,5%	" " "	0,8%
Gneiss	(Grandval)	15%	" " "	1,8%
Granite	(Kyle)	0%	" " "	0,17%
Gneiss migmatite	(Bangala)	0%	" " "	0,18%

Elles s'échelonnent de 0 à 45%. En général, les fortes teneurs en eau correspondent aux fortes chutes.

L'influence de l'anisotropie de l'échantillon est bien visible (voir les courbes) : si l'effort est oblique par rapport aux plans d'anisotropie (foliation ou sédimentation) la résistance est de 1.3 à 6 fois plus faible que si l'effort est dans le plan d'anisotropie.

1.412. Résistances à la traction brésilienne

L'examen des variations de résistance à la traction en fonction de la présence d'eau est plus complexe, car dans les essais faits avec la méthode brésilienne peuvent se développer des pressions interstitielles positives. On remarquera tout d'abord que pour les échantillons de Yaté et Grandval, la résistance à la traction augmente. En particulier pour la serpentinite de Yaté, cette augmentation est phénoménale : 450 %.

Ce phénomène nous paraît très difficilement explicable ; l'antigorite, qui compose la majeure partie de la roche est une phyllite lamellaire formant des échantillons tenaces à cassure conchoïdale ; peut-être l'eau sous-pression, dans ce volume extrêmement compact, a-t-elle tendance à se fixer dans chaque phyllite, l'ensemble résistant considérablement mieux à une traction qu'à un glissement. Il peut donc y avoir chute de résistance à la compression et augmentation de résistance à la traction.

Dans les autres cas, il y a chute de 8 % à 43 %, suivant le classement ci-dessous :

Gneiss	(Malpasset)	43 %	teneur en eau	5 %
Argilite	(Salagou)	36 %	" " "	5 %
Calcaire marneux	(Monteynard)	25 %	" " "	2,5 %
Gneiss	(Bangala)	15 %	" " "	0,18 %
Granite	(Kyle)	11 %	" " "	0,17 %
Granite	(Naguilhes)	8 %	" " "	0,8 %

1.413. Dispersion des résultats

Nous avons, à partir de mesures élémentaires, calculé l'écart type σ (écart quadratique moyen) et le coefficient de variation $\frac{\sigma}{\bar{x}}$, \bar{x} étant la moyenne arithmétique.

Les classements par valeurs croissantes du coefficient de variation sont les suivants :

Coefficient de variation	Compression à sec	Compression à saturation	Traction à sec	Traction à saturation
0.07			Grandval	
0.10	Bangala, Yaté	Malpasset		
0.11		Kyle		
0.12	Malpasset	Bangala		
0.14	Grandval			
0.15				Kyle
0.16	Kyle			
0.17		Grandval		
0.18			Kyle	Bangala
0.19			Bangala	Grandval
0.20		Naguilhes		
0.21	Naguilhes		Naguilhes	
0.22	St-Chamond, Salagou			
0.23			Malpasset Monteynard, Tachien	
0.24				Yaté
0.25			Yaté	
0.27				Naguilhes
0.28		Yaté		
0.29	Tachien	St-Chamond		
0.31				Monteynard
0.33		Salagou		Malpasset
0.34	Monteynard			
0.37		Monteynard		
0.47				Salagou
0.50			Salagou	

On constate que la dispersion a tendance à augmenter, en général, avec la saturation. Nous avons comparé les valeurs obtenues pour les coefficients de variation avec le nombre de microdiscontinuités mesuré sous le microscope à partir de lames colorées taillées dans des échantillons témoins. Une excellente corrélation existe pour les échantillons humides essayés en traction brésilienne. L'influence de la structure de la matrice rocheuse est ainsi clairement mise en évidence par les mesures de dispersion.

1.5. Cas particulier des brèches de Malpasset

Outre l'étude des caractéristiques mécaniques d'une matrice rocheuse, nous avons fait des expériences sur des échantillons de brèches prélevés dans des zones singulières du site de Malpasset.

Les prélèvements ont eu lieu dans différents remplissages de failles du site ; nous avons choisi des brèches à éléments relativement fins, de l'ordre du demi-centimètre. Alors que dans le cas d'écrasement de roche, on peut faire procéder à la taille de cubes ou de cylindres, dans celui de roches broyées, cela devient impossible. Des échantillons de forme très grossièrement parallélépipédique, ont alors été taillés à la pointe du marteau, puis les faces extrêmes ont été surfacées. La section moyenne de ces blocs étant assez irrégulière, nous avons estimé sa surface à l'aide de 2 morceaux de fil de plomb plastique, épousant les irrégularités du bloc.

Une série d'une quinzaine d'échantillons a été essayée à sec en compression simple. Les résistances se sont échelonnées entre 20 et 80 bars, la moyenne arithmétique étant de 40 bars.

Une autre quinzaine de blocs ont été immergés dans de l'eau sans pression : 10 se sont désagrégés spontanément et n'ont pu être essayés, les 5 autres ont été mis sous la presse et se sont désagrégés immédiatement sans que l'on puisse enregistrer de montée en pression.

Les parties fines recueillies par sédimentation dans l'eau et analysées, ont donné la composition suivante : 70 à 80 % de phyllites micacées altérées du type muscovite - séricite, le reste étant constitué de quartz, chlorite et kaolinite.

Le phénomène significatif, à savoir la chute de résistance à la compression simple, est nettement mis en évidence. Il est certain que, sur le site, les zones brêchiques sont confinées dans la masse rocheuse, mais leur comportement singulier en compression simple attire déjà l'attention du géologue. L'étude de leur quantité et de leur répartition sur le site devient primordiale : on aborde ainsi la question de la structure du site. L'étude mécanique des remplissages forme un chapitre connu de la mécanique des sols que nous ne pouvons pas aborder dans ce travail, mais qu'il est indispensable de signaler.

1.6. Conclusion

Nous avons, par une série d'expériences et d'observations normalisées, essayé de montrer que les écrasements d'échantillons pouvaient permettre non pas d'obtenir une valeur chiffrée de résistance, mais d'aider l'ingénieur dans son effort pour trouver un classement des roches entre elles et mettre en évidence l'influence d'un facteur particulier.

Nous pouvons retenir les traits dominants suivants :

- Les chutes de résistance à la compression intéressent surtout les matériaux du type argilite ou calcaire marneux : elles n'excèdent pas 50 %. Elles sont très faibles pour des matériaux grenus, et moyennes pour les matériaux foliés (gneiss), y compris le gneiss de Malpasset (23 %).

- Les variations de résistance à la traction sont plus étendues. On constate, soit des augmentations de résistance avec l'eau (serpentinite), soit de grandes chutes (gneiss fibreux ou argilite) qui correspondent à des teneurs en eau importantes et à une certaine anisotropie.

- Les dispersions, particulièrement celles des essais brésiliens, mettent en évidence l'influence de la structure de l'échantillon. Elles sont faibles pour les granites et gneiss massifs dont les cristaux n'excédaient pas deux millimètres et, deviennent de plus en plus grandes au fur et à mesure qu'apparaissent microdiscontinuités et anisotropie.

Le nombre réduit d'échantillons disponibles n'a pas toujours permis d'attendre la stabilisation des résistances avec le temps ; néanmoins, l'introduction d'eau dans une roche n'a pas fait apparaître de phénomènes significatifs, en ce sens que la chute de résistance est toujours limitée et que les roches ne se classent pas toujours,

quant à cet effet, dans l'ordre suggéré par l'ensemble des autres observations.

Par contre, l'écrasement de matériaux particuliers prélevés dans des remplissages de failles a révélé une chute de résistance considérable mettant ainsi en relief, à une autre échelle, l'action des discontinuités d'un milieu rocheux.

2. Essais divers

Dans le cadre de l'étude consacrée aux échantillons rocheux, nous avons essayé dès 1961 de trouver, à l'aide d'expériences préliminaires, des directions éventuelles pour des recherches plus poussées.

Nous avons vu, au cours du précédent paragraphe, que l'influence de l'eau introduite dans un échantillon de roche n'était pas complètement mise en lumière par des essais de résistances à la compression et à la traction avant et après percolation.

Nous avons alors abordé l'étude, en fonction de divers modes d'humidification, des déformations et des perméabilités de blocs rocheux provenant d'un massif où la nature elle-même s'était chargée de nous instruire : le site du barrage de Malpasset.

2.1. Déformations de blocs mis sous pression d'eau

2.1.1.

Cette série d'expériences a été effectuée avec des blocs de gneiss de Malpasset, (prélevés en bas de la rive gauche, 20 m à l'aval du barrage) et des blocs de calcaire comblanchien provenant d'une marbrerie de Saône-et-Loire.

Le gneiss est massif, légèrement fibreux ; sa composition minéralogique est très voisine de celle des cubes étudiés au paragraphe précédent.

Le calcaire, très massif, exempt de fissures sert de roche témoin.

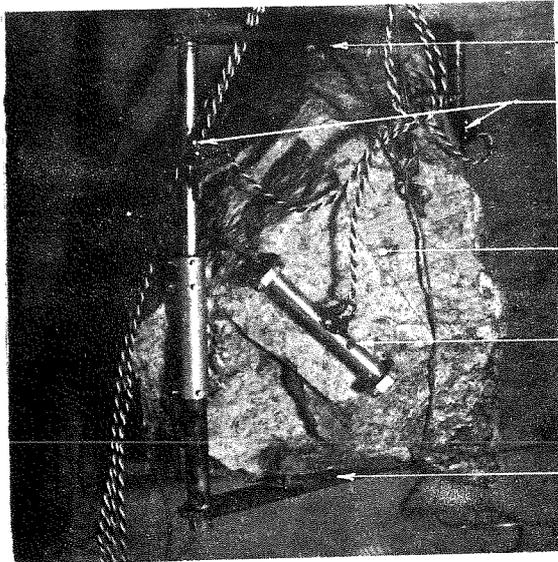
L'essai consiste à mettre sous pression hydrostatique les blocs plus ou moins humidifiés et à mesurer leur déformation en fonction de la pression.

Des témoins sonores de mesures de déformation TELEMAR (1965) SB 141 et SB 90, ont été scellés soit directement dans le rocher, soit par l'intermédiaire d'un cadre, pour mesurer des déformations locales ou des déformations totales du rocher (figure 73). La précision relative des témoins sonores est de l'ordre de quelques microns par mètre. Les blocs ainsi préparés ont été ensuite plus ou moins imbibés d'eau, puis revêtus d'un film plastique étanche. Nous avons utilisé, pour ce film, indistinctement trois mélanges :

- du latex passé au pinceau en 15 couches formant une pellicule totale de 3 mm.
- de l'acéto-butirite posé à chaud au pinceau en 1 fois.
- du silastène mis en place au pinceau en 5 couches.

Les teneurs en eau sont échelonnées entre 0.6 % et 2.2 %. L'humidification a eu lieu après mise sous vide - 4 mm de mercure - pendant 2 heures.

Les blocs, suspendus ou posés sur un cadre métallique (figure 73), sont mis en pression dans une cuve placée dans une enceinte isolée dont la température est maintenue à $20^{\circ} \pm 1$. La mise en charge s'est faite par paliers de 5 bars jusqu'à 50 bars. Les courbes de la figure 74 montrent l'allure des déformations obtenues au cours d'un des cycles de charge et de décharge. Les échantillons sont maintenus à la pression des paliers le temps de la lecture (quelques minutes).



Couteau

Témoins de mesure de déformation

Telemac SB 141

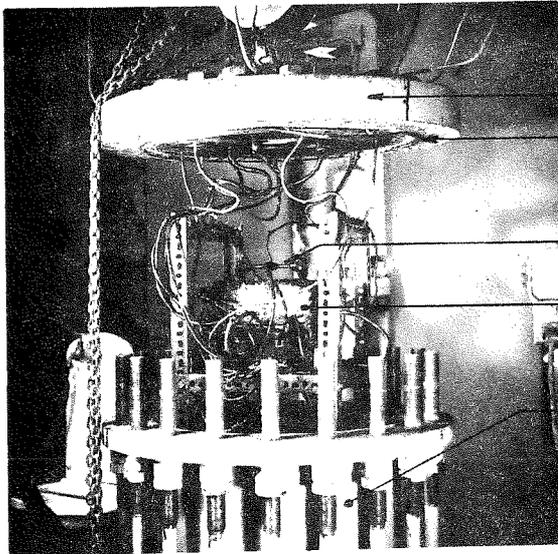
Bloc de gneiss de 55 kg.

Témoin de mesure de déformation

Telemac SB 90 scelle dans le rocher.

Barre fixe scellée dans rocher.

DETAIL D'UN BLOC



Couvercle

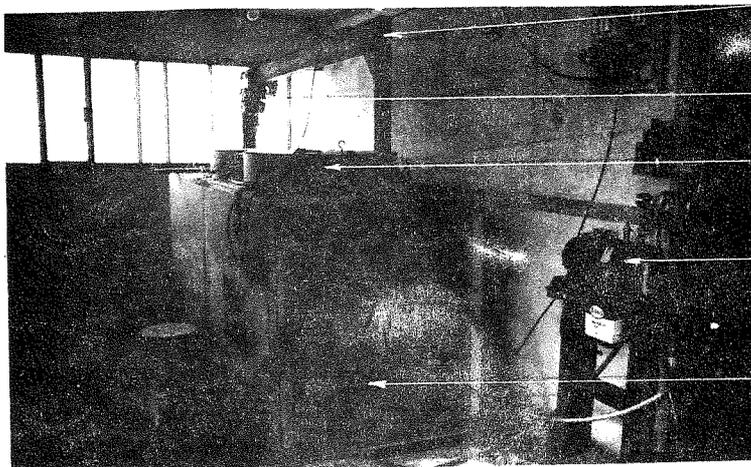
Joint torique

Témoin de déformation

Bloc de comblanchien calcaire

Cuve

MISE EN PLACE D'UN BLOC DANS LA CUVE.



Portique de manoeuvre

Monte charge

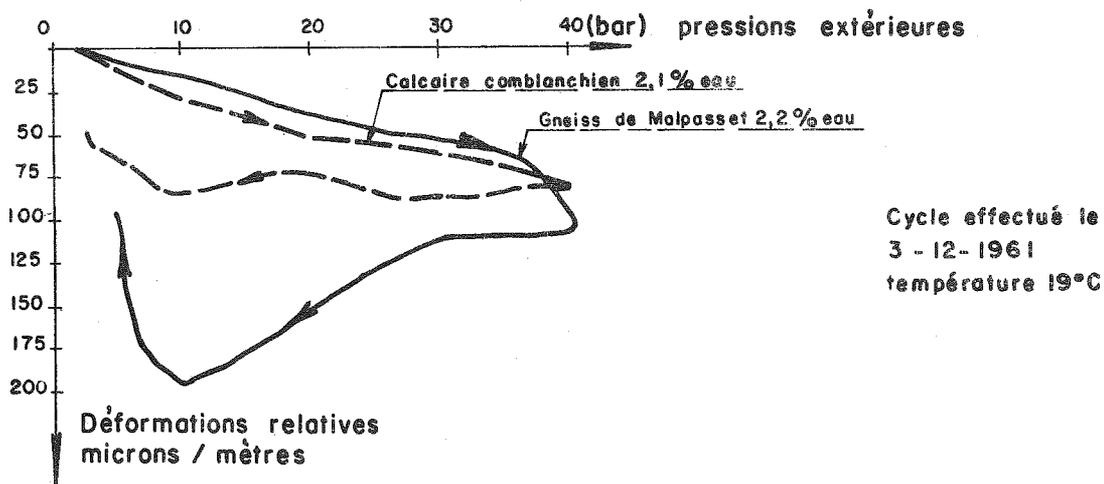
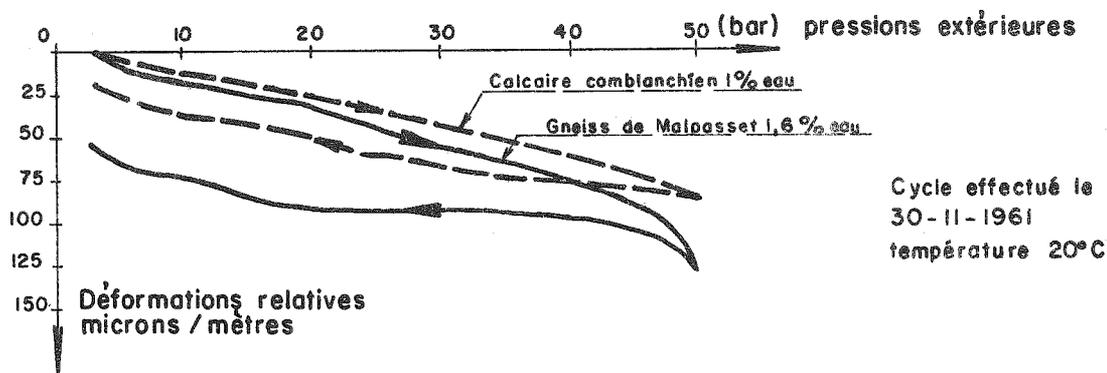
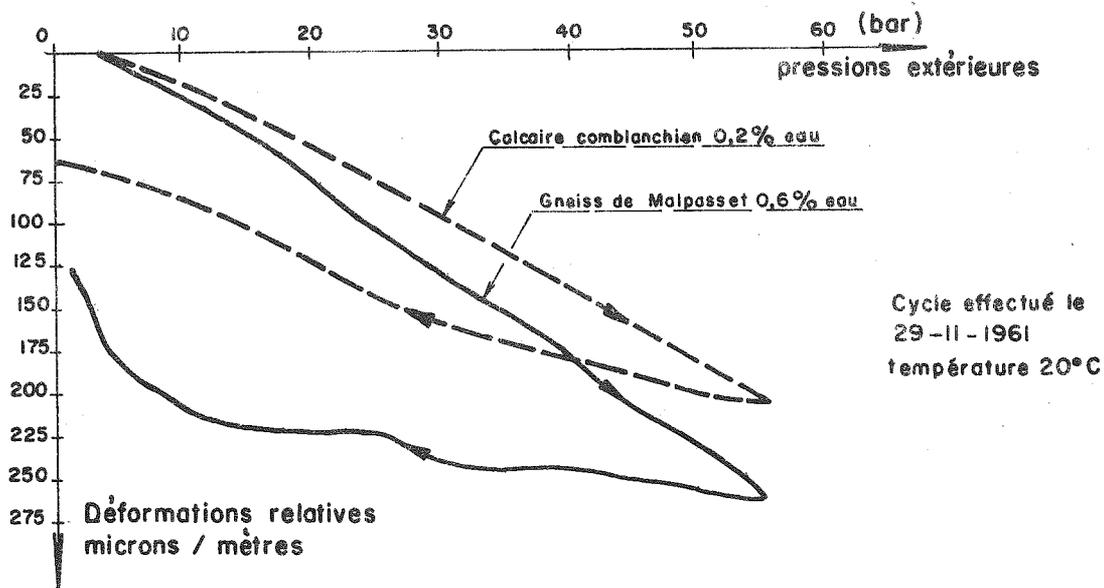
Tête des cuves

Pompe a vide

Etuves entourant les
2 cuves de mise en
pression

SYSTEME DE CLIMATISATION ET POMPE A VIDE

fig 73.



MISE EN COMPRESSION HYDROSTATIQUE
DE GNEISS ET DE CALCAIRES

fig 74

2.12. Résultats

D'une manière générale, les courbes sont sensiblement linéaires pour les teneurs en eau faibles ; et deviennent beaucoup plus irrégulières au fur et à mesure de l'augmentation de la teneur en eau. Toutefois, la comparaison avec les courbes obtenues avec les blocs de Comblanchien montre que des irrégularités s'y retrouvent également.

Les variations de longueurs d'une face du bloc peuvent, si on considère le milieu comme homogène et isotrope, donner une idée du module d'élasticité.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{p}{E} \text{ volumétrique}$$

ou $E \text{ volumétrique} = \frac{3 p}{1 - 2 \nu}$

dans lequel ν est le coefficient de Poisson et p la pression

$$\frac{\Delta V}{V} = 3 \frac{\Delta J}{J} = \frac{3 p}{E} (1 - 2 \nu)$$

d'où :

$$E = \frac{p (1 - 2 \nu)}{\frac{\Delta L}{L}}$$

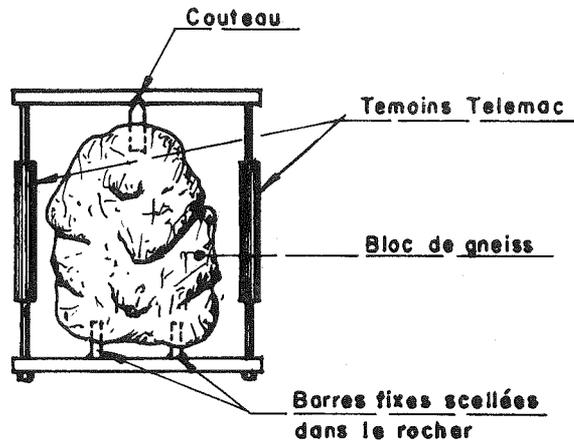
Si l'on admet un coefficient de Poisson de 0,25 pour le gneiss le calcul des modules élastiques donne, pour une teneur en eau de 0,6 %, des résultats de 30 000 à 60 000 bars, et pour une teneur en eau de 1,6 % de 60 000 à 100 000 bars ; cette compression hydrostatique semble donner des résultats différents de ceux trouvés lors des essais de compression mono-axiale dans lesquels les coefficients d'élasticité, ainsi que ceux de résistances à la compression, diminuent quand augmente la teneur en eau.

De très nombreuses séries d'expériences ont été faites, suivant le même principe, avec des teneurs en eau différentes et des blocs provenant de prélèvements différents, chaque fois comparés avec les déformations d'un bloc de calcaire Comblanchien. Dans tous les cas, on a trouvé des modules d'élasticité relativement élevés, et aucune anomalie significative n'a été révélée après introduction d'eau.

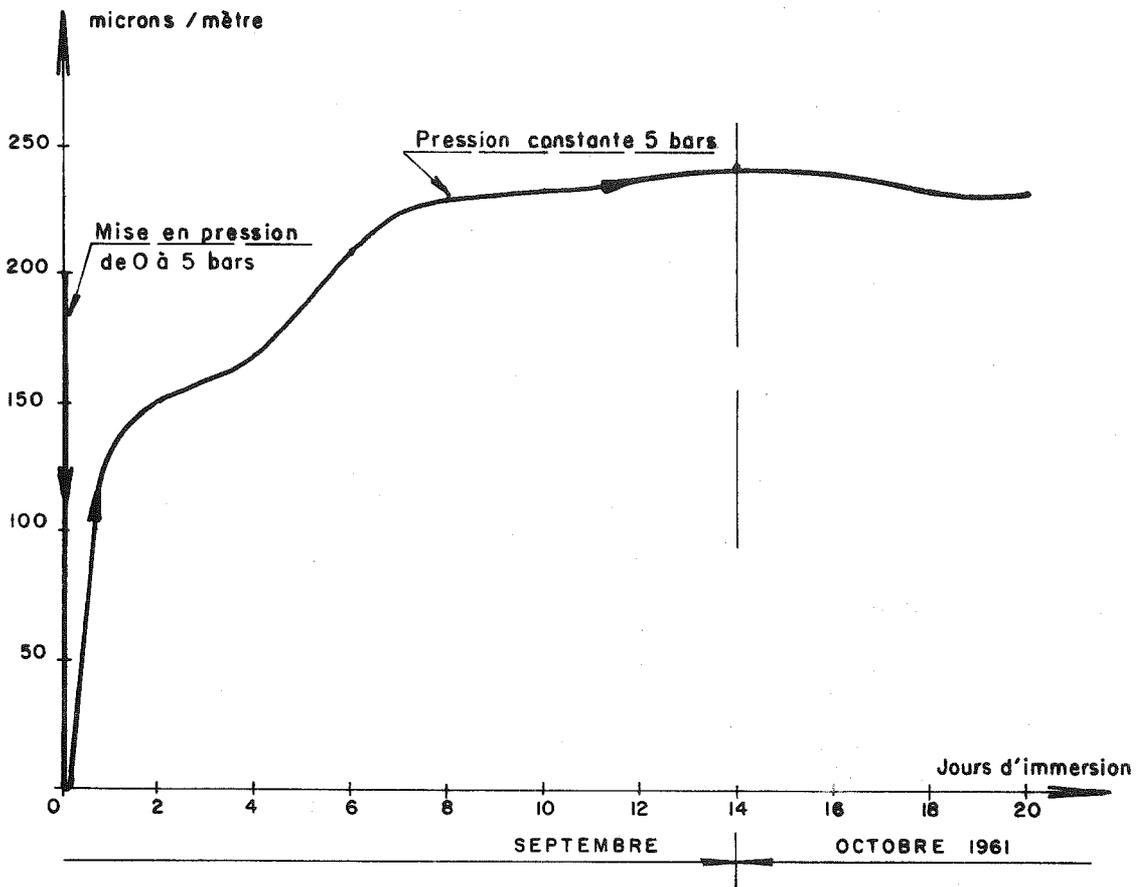
Afin de voir quelle était l'influence du temps pendant la pénétration de l'eau dans le bloc, nous avons utilisé le même montage, mais sans enveloppe caoutchoutée. Nous avons mesuré les déformations d'un bloc de gneiss du site de Malpasset, provenant des déblais de la petite caverne excavée dans la surface amont rive gauche, à la cote 65. Le graphique de la figure 75 montre quelles ont été les déformations enregistrées, d'abord à la mise en pression immédiate de 0 à 5 bars après la mise sous vide, puis le gonflement à une pression constante de 5 bars. Celui-ci très rapide le premier jour s'atténue pour devenir nul au bout du 12^e jour.

Dans la première phase, on comprime le squelette de la roche, puis l'eau pénètre dans les microdiscontinuités en ramenant l'échantillon à sa forme initiale. On peut toutefois noter un faible gonflement résiduel d'environ 0,004 % qui est parfaitement négligeable.

Ici encore, dans cette expérience, rien de particulièrement anormal n'a pu être constaté sur l'échantillon rocheux analysé.



Moyenne des déformations relatives
des témoins Telemac.



DÉFORMATIONS D'UN BLOC DE GNEISS DE MALPASSET
APRÈS MISE EN EAU SOUS PRESSION A 5 BARS

fig 75.

2.2. Essais de percolation

2.21.

Les expériences décrites ci-dessus n'ayant montré aucune caractéristique anormale, nous avons essayé de faire agir l'eau d'une manière différente au cours d'essais de percolation de deux sortes :

- écoulement divergent
- écoulement parallèle

Ces expériences ont été conduites avec des échantillons rocheux d'une dizaine de Kg. provenant des sites de Malpasset, de Saint-Chamond (barrage-voûte construit sur des micaschistes), de Monteynard (barrage-voûte construit sur des calcaires marneux), de Grandval (barrage-à voûtes multiples construit sur des gneiss). La nature de ces échantillons est tout à fait identique à celle des cubes ayant servi aux expériences d'écrasement.

2.22. Pénétration divergente d'eau sous pression

2.221. Processus de l'essai

Nous avons utilisé des blocs d'une dizaine de kilos percés d'un trou et, munis d'un montage (figure 76) permettant d'injecter dans ce trou de l'eau sous pression. Afin de mieux matérialiser le phénomène de percolation, nous avons coloré l'eau en rouge par de l'auramine J à raison de 5 grammes par litre. Les essais ont été conduits de deux façons, soit une montée en pression régulière jusqu'à ce qu'une forme de claquage ait lieu, soit des montées en pression et des stabilisations à une pression constante pour observer les phénomènes de percolation.

2.222. Claquage

Les photos de la figure 76 illustrent les deux types de claquage que nous avons obtenus. Avec le gneiss de Malpasset, le bloc tend à se colorer sans qu'il y ait de claquage et tout le débit de la pompe passe dans de très nombreuses fissures sans désagrégation du bloc. Avec les trois autres roches, au contraire, il y a apparition d'une surface de claquage, le bloc se divise en général immédiatement et l'eau jaillit par l'ouverture. Nous avons obtenu le claquage vers 35 bars pour le micaschiste de Saint-Chamond, à 25 bars pour le calcaire marneux de Monteynard et à 30 bars pour les gneiss de Grandval ; pour Malpasset, les premières fuites ont eu lieu à 60 bars par quelques plans de foliation privilégiés et la pression maximum obtenue sans éclatement proprement dit a été de 60 à 70 bars.

Les blocs ont été ensuite cassés pour analyser les allures des surfaces de rupture. Sur les blocs de Monteynard et de Saint-Chamond, c'est la foliation ou la sédimentation qui est à l'origine de l'éclatement ; pour les blocs de Grandval, il s'agit d'une diaclase très fermée mais préexistante ; à Malpasset, au contraire, la masse de la roche est imbibée à la faveur de quelques foliations préférentielles et de joints sécants revêtus d'un petit film blanchâtre à toucher pâteux.

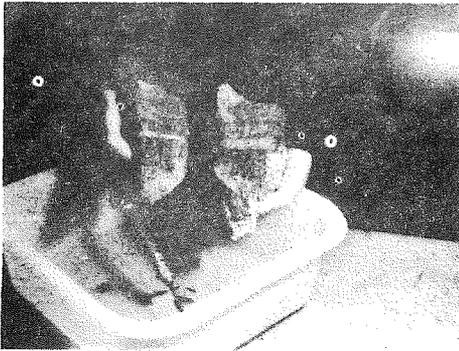
Ces observations conduisent à examiner plus précisément les discontinuités qui semblent régir les réactions de la roche.

2.223. Essais de percolation sans claquage

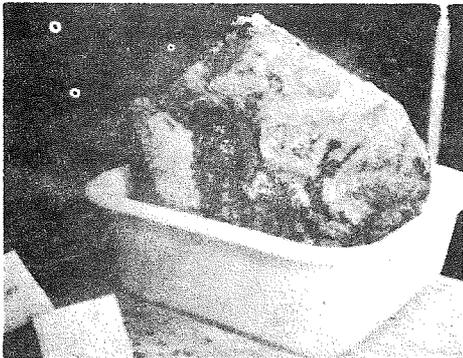
Le même montage a été employé, mais les pressions ont été limitées à 25 bars et sont restées constantes ; l'eau colorée a également été utilisée.

Au bout de deux heures, les blocs de Malpasset ont commencé à suinter par de petits joints soulignés d'un matériau blanchâtre et des petites surfaces de foliation alors que les autres roches étaient restées étanches

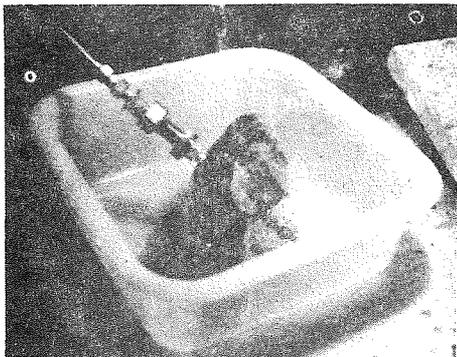
Essais de percolation centrifuge



L'échantillon, ouvert en deux, montre le trou central dans lequel on injecte l'eau sous pression par l'intermédiaire d'un tube troué comportant deux étanchéités souples.



Percolation à travers un échantillon de gneiss de Malpasset. Les fuites sont diffuses, leur débit faible. Le rocher résiste sans éclater à une pression de l'ordre de 70 bars.



Percolation à travers un échantillon de micaschistes de St. Chamond. Les fuites sont localisées, leur débit important. A 40 bars la roche a éclaté.

Essais de percolation linéaire

Nous avons arrêté l'expérience au bout d'une journée sans avoir mesuré les débits.

Après avoir cassé les échantillons, nous avons constaté que pour Monteynard, deux joints de sédimentation étaient imbibés de colorant, que pour Saint-Chamond, il s'agissait essentiellement d'une série, en forme d'aurole autour du trou, de petites surfaces de foliation ne s'étendant pas à plus de 2 cm, et que pour Grandval, seulement un joint de foliation était coloré. Malpasset a montré un aspect analogue à celui obtenu par éclatement, c'est-à-dire la saturation jusqu'à la surface, de foliations préexistantes et de petits joints soulignés d'un film blanchâtre.

Cette série d'expériences a montré qu'une analyse quantitative de la percolation était nécessaire.

2.224. Essais de perméabilité

Les échantillons sélectionnés pour cette série d'expériences proviennent essentiellement du site du barrage de Malpasset : blocs rocheux de gneiss tirés de la rive gauche, similaires à ceux essayés par compression sur cubes, et échantillons de brèches et de mylonites provenant des différents accidents du site.

Chaque bloc a été divisé en deux. Dans une partie, des petits échantillons grossièrement cylindriques de 7 cm de haut et de 4 à 5 cm de diamètre ont été taillés ; l'autre partie a été envoyée au Laboratoire de la Faculté des Sciences de Toulouse afin d'être analysée par la méthode de J. FARRAN et B. THENOZ (1965).

Nos échantillons étaient noyés dans des moules métalliques rigides par l'intermédiaire d'araldite (figure 77).

- Essais de percolation linéaire



Figure 77

Rampe de percolation utilisée. Le manomètre des pressions est solidaire de la pompe. Une vanne permet d'isoler chaque pot.

Essais de percolation d'eau à travers des échantillons rocheux.

Ces moules ont été groupés par six dans une rampe et l'injection d'eau a été opérée par l'intermédiaire d'une pompe à pression comportant un levier agissant sur un piston, le levier étant chargé par une série de poids pour obtenir la pression de percolation désirée.

Les pressions d'essais ont été en moyenne d'une cinquantaine de bars ; nous avons opéré des mesures de débit et des mesures d'entraînement de matériaux. Une fois la percolation effectuée, nous avons taillé, dans l'échantillon, des lames minces qui ont été examinées microscopiquement. Nous verrons dans le chapitre suivant, les correspondances faites entre les mesures obtenues pour les débits et l'aspect des discontinuités mis en évidence par la lame.

Les percolations à pression constante ont duré en général de 5 à 12 jours : le mode opératoire a été tel, que seul le débit total a été mesuré ; nous n'avons donc pas de variations de débit en fonction du temps de percolation. Afin d'éviter l'évaporation, le récipient destiné à recueillir l'eau de filtration était rempli d'huile jusqu'à l'extrémité inférieure du moule métallique.

Le tableau ci-dessous indique quelles ont été les perméabilités moyennes obtenues pour les différents types de rocher étudiés par nous-mêmes (B.S.) et par le Laboratoire de Toulouse.

Type des échantillons	Perméabilités (cm/s)	
	B.S. (Formule de Darcy)	Laboratoire de Toulouse
Gneiss fibreux	env. 10^{-5}	10^{-6} à 10^{-7}
Gneiss massif	" 10^{-6}	10^{-6} à 10^{-7}
Gneiss tectonisé	" 10^{-5}	10^{-6} à 10^{-7}
Brèche de la surface aval	" 10^{-2}	(pas d'essais)
Brèche de cisaillement	" 10^{-3}	10^{-3}
Mylonite de la surface amont	" 10^{-6}	(pas d'essais)

Les chiffres que nous avons obtenus sont des chiffres de percolation dans des essais sans contrainte latérale, puisque l'eau introduite par le dessus de l'échantillon, s'échappe librement par le bas et que l'échantillon est noyé dans de l'araldite rigide. Les chiffres donnés par le Laboratoire de Toulouse, pour les mêmes échantillons, sont obtenus par des essais avec étreinte latérale de l'ordre de grandeur de la pression motrice. On voit que les perméabilités de Toulouse sont de 10 à 100 fois plus petites que les résultats que nous avons obtenus, sauf pour les brèches.

C'est là, sans doute, la première manifestation d'un phénomène, la variation de perméabilité sous contrainte, qui devait plus tard se révéler de la plus grande importance. Nous verrons au chapitre suivant que l'étude optique d'une coupe mince de roche, permet d'approcher le problème de la variation de perméabilité en fonction de la contrainte.

Dans les eaux de percolation, nous avons distinctement observé des particules entraînées ; l'analyse minéralogique de ces particules, faite par le Muséum d'Histoire Naturelle de Paris, a montré qu'il s'agissait de paillettes de micas altérés provenant de la filtration de l'eau principalement dans les gneiss fibreux et les brèches. L'analyse chimique des eaux de percolation, faite par le B.R.G.M., a montré des entraînements d'ions calcium, magnésium, sodium et chlore ; cet entraînement étant toujours beaucoup plus important pour les gneiss à apparence fibreuse que pour les gneiss massifs, par unités de volume d'eau filtrée.

2.3. Conclusion

Les déformations de blocs, mesurées en fonction de la teneur en eau et de la contrainte triaxiale à laquelle ils étaient soumis, n'ont pas permis de fournir des critères évidents permettant de juger ou de classer une roche de fondation.

Par contre, l'observation de percolations et de claquages de blocs rocheux met en évidence le rôle prépondérant des discontinuités dans le domaine des perméabilités et de leur variation avec la contrainte.

Dans la suite des travaux du Bureau d'Etude COYNE et BELLIER, on a prêté une importance spéciale à ce phénomène. J. BERNAIX (1966) a étudié l'aspect théorique et expérimental de la perméabilité des roches sur échantillons, alors que de notre côté, dans le cadre d'une activité plus géologique, nous avons cherché à déterminer à l'aide de lames minces de roche, un ordre de grandeur du phénomène.

Les observations que nous avons réunies sont commentées dans le chapitre suivant.

3. Lames minces colorées

3.1. Généralités

Les lames minces taillées dans un échantillon rocheux ont toujours servi, depuis la mise au point du microscope polarisant, à l'étude pétrographique des roches dans les laboratoires de géologie. Leur application en matière de Génie Civil est d'une date beaucoup plus récente (MIELENZ - 1959, U.S.B.R. - 1959). Le système de coloration sous vide mentionné par CAPEDECOME, FARRAN et ORLIAC - (1951) en est un perfectionnement important.

L'intérêt de la coloration d'une plaque mince, coloration qui devra être effectuée avant toute taille, est de révéler l'existence de microdiscontinuités qui pré-existent avant toute opération mécanique et de rendre possible l'observation directe de leur disposition, orientation et ramification. Autrement dit, le colorant révèle le mode de cheminement que pourra avoir l'eau dans la roche. L'observation d'une section colorée montre instantanément l'état de cohésion des cristaux entre eux dans le cas d'une roche cristalline, ou de cimentation dans le cas de certaines roches sédimentaires. Une application importante de ce dernier cas est l'étude des liaisons mortier-sable-agrégats dans le cas de béton (BELLIER et SCHNEIDER - 1963).

3.2. Préparation des lames et choix du colorant

3.21. Fabrication de la lame

L'échantillon à traiter est plongé pendant un certain temps dans un bain contenant une solution alcoolisée colorée (nous étudierons ces colorants dans le paragraphe suivant). Une face est ensuite sciée, meulée et collée sur une plaque de verre elle-même meulée. Cet ensemble est alors soumis au vide, puis immergé à nouveau dans le même colorant qu'à la première imprégnation. L'expérience nous a montré que pour des roches telles que gneiss, schiste, grès ou granite, la première immersion était suffisante et nous ne pratiquons la mise sous vide que pour les calcaires compacts. La surface libre de l'écaïlle rocheuse est ensuite polie pour que l'épaisseur de roche résiduelle soit de 0.03 mm. Les collages, ou les consolidations en cas de matériau friable, sont faits au baume de Canada qui est lui-même coloré avec le même colorant que celui servant à la coloration principale. La dimension d'une plaque peut atteindre 6 x 6 cm.

Un agrandissement photographique fait directement à partir de la lame, prise comme pellicule, permet d'obtenir un cliché de la plaque mince : on peut ainsi y étudier à loisir les structures et conserver de la sorte un document plus aisément maniable que la plaque elle-même. Ce sont ces documents qui illustrent notre travail.

COMPORTEMENT DES DIVERS COLORANTS

Numéro du Colorant	Nom	Colorant à retenir	FISURES			LUMIERE NATURELLE		LUMIERE POLARISEE		FELDSPATHS ALTERES	
			Couleur en imprégnation dans les fissures (observée sur plaques A)	Imprégnation des fissures (minéraux noirs exclus) (observée sur plaques A)	Etalement du colorant par rapport aux fissures (observé sur plaques A)	Contraste du colorant	Variation d'intensité de la coloration dans les minéraux imprégnés en masse (observé sur plaques B)	Contraste du colorant en imprégnation dans les fissures (observé sur A)	Contraste du colorant dans les minéraux imprégnés en masse (observé sur B)	Imprégnation des feldspaths séricitisés (observée sur plaques B)	Pouvoir séparateur séricite/feldspath (observé sur plaques B)
1	Bleu Victoria BSA extra	X	Bleu intense	Bonne	Très peu important	Très bon	Moyenne : Noir à bleu vert clair	Faible à moyen	Assez bon (sauf pour zones colorées intensément en noir. Confusion avec le baume)	Assez mauvaise dès qu'une trace non altérée subsiste.	Bon sauf dans zones intensément colorées.
2	Brun Noyer basique NSA		Brun foncé à Orangé	Convenable	Non négligeable	Très médiocre	Importante : Noir, brun, gris verdâtre	Moyen	Moyen	Convenable	Mauvais
3	Fuschine ASA	X	Rose de vin	Très bonne	Non négligeable	Très bon	Assez importante : Gris rosé à rose intense	Bon	Bon	Très irrégulière (irrégularité apparemment aléatoire)	Mauvais
4	Noir basique SA		Noir à Sépia	Assez médiocre	Non négligeable	Médiocre	Importante : Noir, bleu de Prusse, verdâtre	Très faible	Faible (et presque nul dans zones intensément colorées en noir)	Moyenne	Très médiocre (et nul dans zones très colorées)
5	Rougeine BSA extra concentré	X	Rose intense	Excellente	Non négligeable	Excellent	Null	Excellent	Excellent	Excellente	Très mauvais
6	Turquoise Motylène JSA extra	X	Vert bleuté intense	Excellente	Non négligeable	Excellent	Faible : Vert intense à vert pâle	Excellent	Très bon	Mauvaise dès qu'une trace feldspathique non altérée subsiste.	Mauvais
7	Vert brillant SA Cristaux	X	Vert pré	A peu près nulle	pas de fissures sur la plaque	Moyen	Faible : Vert noirâtre à vert Anglais	pas de fissures sur la plaque	Très bon	Excellente	Excellent (sauf peut-être pour quelques zones très intensément colorées)
8	Noir basique copiant SADG		Noir à brun violacé	Médiocre	Non négligeable	Très médiocre	Faible : Bleu sale plus ou moins foncé	Faible	Moyen	Mauvaise dès qu'une trace non altérée subsiste.	Bon
9	Violet de Paris BSA extra		Violet à mauve	Médiocre	Peu important	Moyen	Assez importante : Noir, violet, mosaïque bleue et rose	Très faible	Assez faible (et presque nul pour zones intensément colorées en noir)	Très bonne	Très mauvais

MINERAUX COLORES		Observations	Appréciation
- Action sur les biotites (observée sur plaques A et B)	- Action sur les altérations d'amphiboles (observée sur plaques A)		
- <u>Contraste convenable</u> - <u>Pénétration médiocre</u> : Auréoles, fissures et accidents normaux au clivage, petites zones colorées en masse.	- <u>Pénétration moyenne</u> donnant à ces plages un aspect moiré.		- Résultats satisfaisants comme révélateur de fissures. Comportement moyen pour les feldspaths et les micas
- <u>Contraste très mauvais</u> De petites zones sont peut-être colorées en masse mais il est difficile de mettre cela en évidence avec certitude.	- <u>Assez bonne pénétration</u> en brun rouge assez intense.		- Le faible contraste de ce colorant fait qu'il est à déconseiller.
- <u>Bon contraste</u> - <u>Pénétration moyenne</u> mais assez irrégulière : Auréoles, accidents normaux au clivage et quelques filets colorés préférentiellement	(peu de hornblende dans la plaque)		- Résultats satisfaisants comme révélateur de fissures. Assez médiocre par ailleurs.
- <u>Contraste très mauvais</u> Accidents transversaux et petites zones colorées en masse sans doute, mais difficile à mettre en évidence.	- <u>Assez bonne pénétration</u> (Plages noires autour des amphiboles non altérées).		- Colorant à déconseiller à cause de son faible contraste et de ses caractéristiques médiocres.
● <u>Bon contraste</u> - <u>Pénétration assez bonne</u> mais irrégulière : Auréoles, accidents transversaux, quelques filets et petites zones colorées préférentiellement.	- <u>Très bonne pénétration</u> (Plages roses voire noires autour des amphiboles elles-mêmes parfois colorées).	Dès qu'il est en masse, le colorant cristallise en cristaux visibles au microscope qui oblitèrent complètement la structure. Dans A on observe même des taches colorées dispersées de manière aléatoire dans la plaque. Le phénomène n'est pas assez important pour être gênant.	- Très bon révélateur de fissures. - Résultats intéressants pour les feldspaths et micas bien qu'ils oblitèrent les structures.
- <u>Bon contraste</u> - <u>Bonne pénétration</u> (B surtout) assez irrégulière (quelques paillettes ne sont pas attachées). En plus d'auréoles accidents transversaux, filets, quelques plages assez importantes colorées en masse.	- <u>Très bonne pénétration</u> (Plages vertes ou noires autour des amphiboles très souvent colorées elles-mêmes).	En masse, le colorant a tendance à oblitérer complètement la structure.	- Très bon révélateur de fissures. - Résultats intéressants pour les feldspaths et micas.
- <u>Contraste convenable</u> - <u>Bonne pénétration</u> un peu plus régulière que pour 6 dans B. Rien dans A. Localisation de la coloration : identique à 6.	(pas de hornblende dans la plaque).	Il semble que le fait que la plaque A n'ait pas été colorée soit accidentel (puisque dans B on observe une pénétration assez bonne des biotites).	- Très bon pour révéler les altérations feldspathiques. Résultats intéressants pour les biotites. Il faudrait refaire un essai pour voir son action sur les fissures.
- <u>Contraste médiocre</u> - <u>Pénétration moyenne</u> : Auréoles, fissures et accidents transversaux, quelques filets et plages limitées colorées préférentiellement.	(peu de hornblende dans la plaque).		- Colorant assez médiocre à déconseiller en outre à cause de son faible contraste.
- <u>Contraste très mauvais</u> Les zones importantes sont sans doute colorées en masse mais il est difficile de mettre cela en évidence avec certitude.	- <u>Pénétration moyenne</u> : Plages légèrement noircies sans que la coloration soit très intense.	En masse le colorant a tendance à oblitérer complètement la structure.	- Colorant à déconseiller à cause de ses caractéristiques médiocres.

Tableau II

ETUDE DES COLORANTS EMPLOYES DANS LES LAMES MINCES

3.22. Recherche des colorants

Nous avons cherché des colorants vrais usuels, facilement mis en œuvre, stables, permettant de montrer toutes les microdiscontinuités ouvertes dans la roche et se fixant sur les zones altérées de certains minéraux courants : feldspaths et ferromagnésiens. La détermination des colorants a été faite par l'observation de très nombreuses lames taillées dans des échantillons particulièrement riches en altérations et traités par toute une série de colorants.

Nous avons ainsi retenu :

- la fushine ASA (basique), le bleu victoria (basique) et l'auramine J (acide) pour la mise en évidence des microdiscontinuités,
- la rhodamine BSA (basique) et le vert brillant SA (acide) pour la coloration des altérations des feldspaths,
- la turquoise motylène JSA (acide) pour la coloration des altérations des amphiboles.

Ces colorants se fixent mieux sur des minéraux à tendance soit acide, soit basique. Nous les choisissons donc en fonction de la composition pétrographique des échantillons,

3.3. Etude des microdiscontinuités

L'analyse de plus de 350 lames, taillées dans des échantillons provenant de sites de barrages en cours d'étude, permet de classer les microdiscontinuités comme suit :

a) - Pas de microdiscontinuités

La plaque est exempte de toute coloration (figure 78)

b) - Présence de microdiscontinuités

Microdiscontinuités filiformes

- lignes sécantes par rapport à la structure principale de la roche (figure 79)
- lignes suivant la structure prédominante de la roche (figure 80)
- lignes dans toutes les directions (figure 81)
- lignes entourant les cristaux (figure 82)

Microdiscontinuités en forme de taches

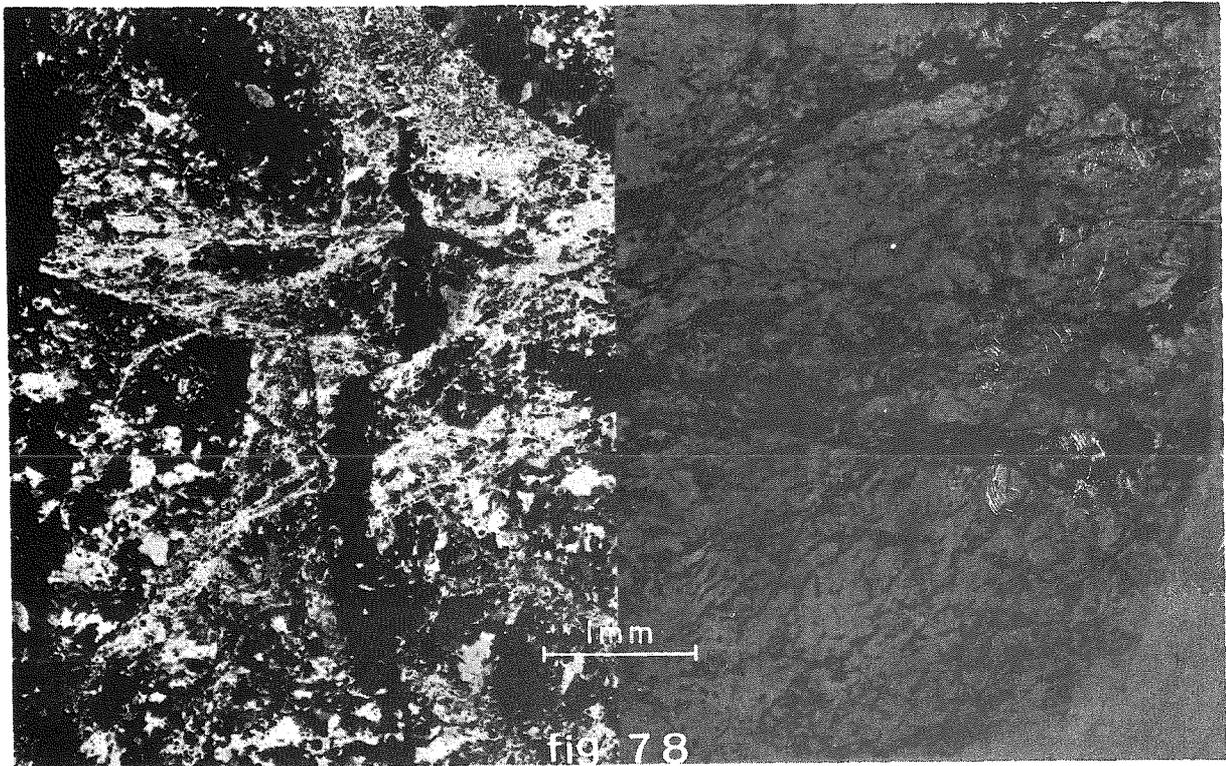
- taches dans les ciments (figure 83)
- taches dans les grands cristaux (figure 84)

Il est intéressant d'examiner en détail, le cas du site de Malpasset. Nous avons donné dans la figure 81 un aspect moyen du rocher du site. L'étude complète a été faite à partir de 91 lames colorées taillées dans des échantillons répartis sur tout le site. Nous avons vu dans le chapitre A. I. 1, relatif à la description du site, qu'il y avait lieu de distinguer plusieurs types de roches ; chacune d'elles est caractérisée par sa structure. On a ainsi distingué un gneiss à répartition uniforme des éléments, un gneiss œillé, un gneiss folié (parfois simplement linéaire) et un gneiss à mica blanc.

La présence de microdiscontinuités est fonction de ces structures classées ci-dessous par ordre croissant de division :

- gneiss folié
- gneiss à répartition uniforme
- gneiss à mica blanc
- gneiss œillé

Les trois premiers types montrent plus de discontinuités que le quatrième, mais tous ont le même caractère : division en tous sens.



Lumière Polarisée

x20

Lumière naturelle

Gneiss de la Gittaz

Roche ne comprenant pas de microfissure

Nature de la roche: Gneiss broyé laissant apparaître quelques résidus sains

Composition:

Quartz en gros cristaux (extinction roulante)
Feldspaths - orthose en gros cristaux
- plagioclases en microcristaux
séricitisés

Biotite - sous forme de petits vestiges en
cours de chloritisation

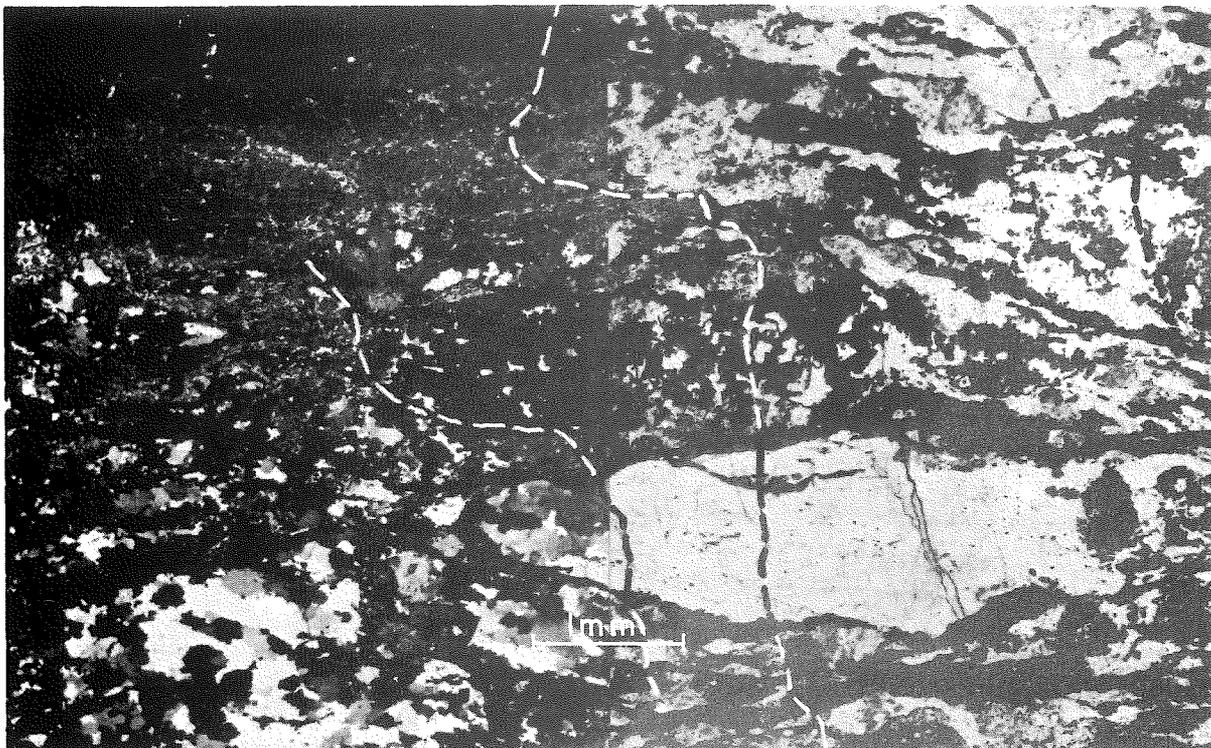
Muscovite - très nombreuse

Séricite - à l'état primaire dans les zones
microcristallines

Epidote et oxydes opaques

Microfissuration:

Bien que parcourue de nombreuses veines
recristallisées qui témoignent d'efforts
tectoniques intenses, la plaque ne montre
aucune coloration:



Lumière polarisée

x20

Lumière naturelle

Gneiss de Saint Jean du Gard

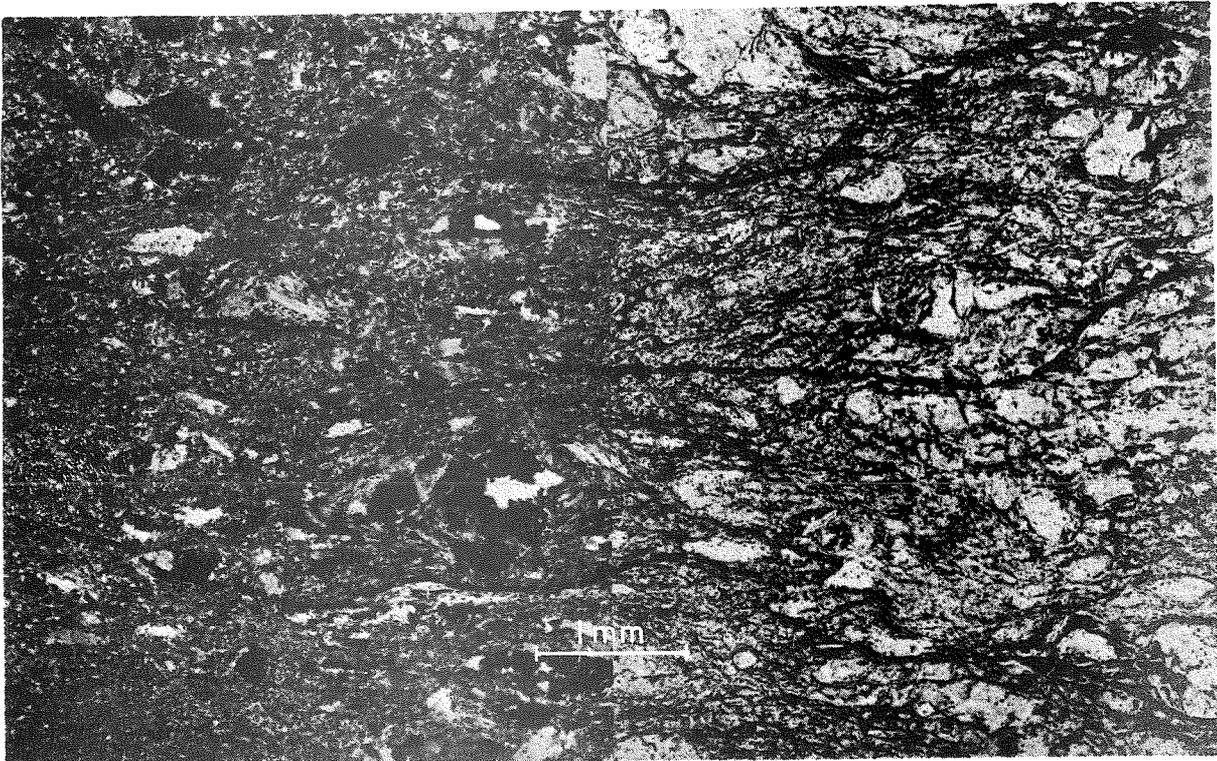
Type de roche avec microouvertures sécantes par rapport à la direction de la structure principale

Nature de la roche: gneiss

Composition:

- orthose en gros cristaux craquelés
 - plagioclases sains
- Ces minéraux blancs sont groupés en lits ou en noyaux allongés
- biotite presque complètement chloritisée
 - muscovite en cristaux déchiquetés mais sains
 - séricite, zoïzite en microcristaux
- Les minéraux noirs forment des lits très colorés en L.N.

Microfissuration: Quelques lignes ténues (1 à 3 microns) traversent les gros cristaux d'orthose et coupent les lits d'éléments noirs. Quelques-unes seulement des microfissures traversent toute la plaque.



Lumière polarisée

x20

Lumière naturelle

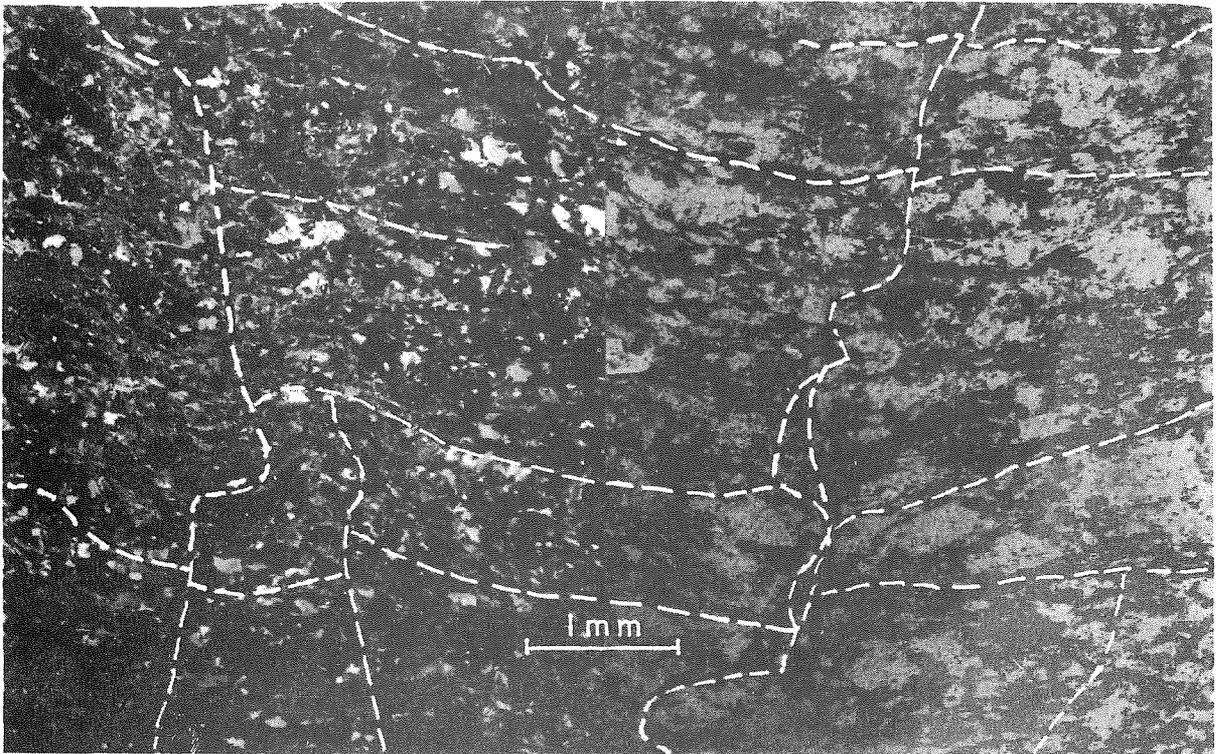
Gneiss de Saint-Cassien

Roche avec microouvertures alignées suivant la structure prédominante

Nature de l'échantillon: Gneiss oillé très tectonisé

Composition: - Feldspaths plagioclases en gros cristaux parfois déchiquetés
 - Pâte de - quartz
 plagioclase
 séricite
 épidote
 zoïzite
 en petits cristaux noyant les gros cristaux de feldspaths

Microfissuration: la coloration suit des litages microcristallins enrobant les feldspaths. Les 3 lignes sont continues et ont une épaisseur moyenne de 1 à 3 microns



Lumière polarisée

x20

Lumière naturelle

Gneiss de Malpasset

Type de roche avec microouvertures alignées suivant différentes directions

Nature de la roche: gneiss très tectonisé

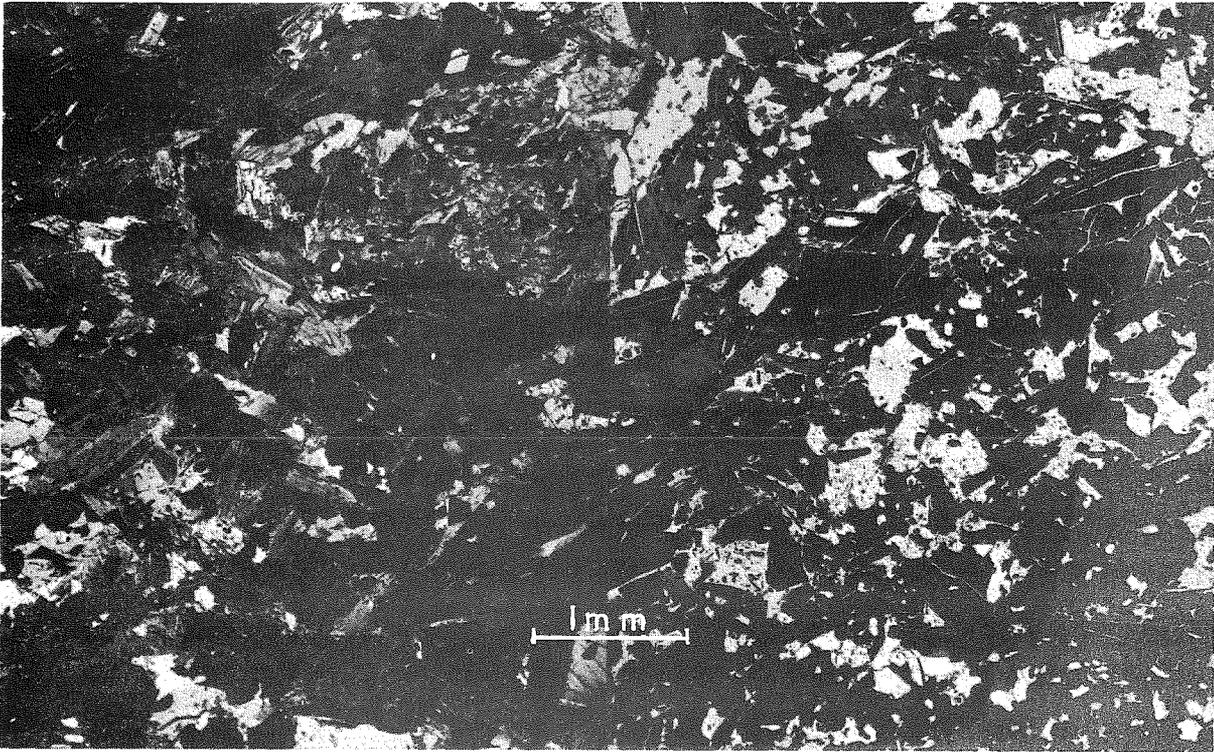
Composition:

- Quartz peu fréquent (extinction roulante, inclusions)
- feldspaths plagioclases: oligoclase
- microcristaux de micas (biotite, muscovite) presque complètement altérés, groupés en petits lits irréguliers
- chlorite, séricite cryptocristallines associées à une pâte d'éléments argileux
- calcite secondaire

Microfissuration: la coloration souligne

- les lits d'éléments phylliteux
- les discontinuités transversales qui coupent et parfois décalent les alignements précédents

Ces lignes sont continues sur toute la surface de la lame mince.



Lumière polarisée

x20

Lumière naturelle

Gneiss de Kariba

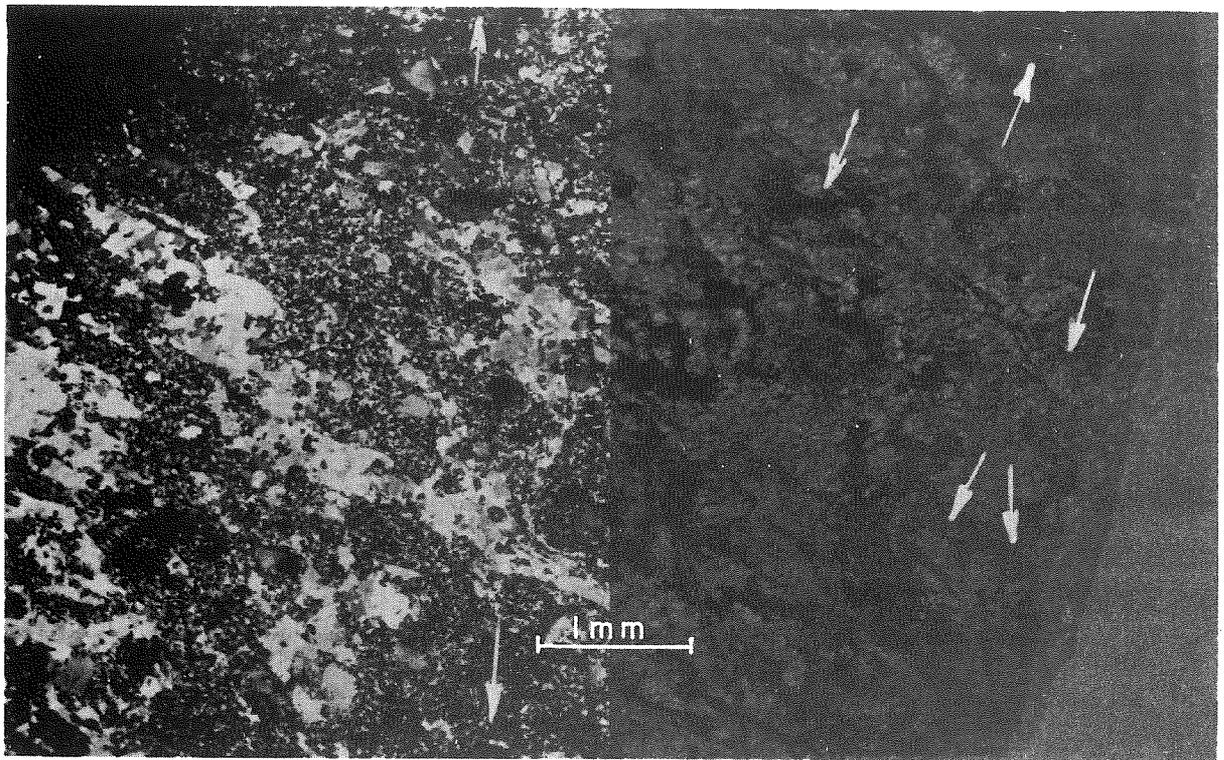
Type de roche avec microouvertures entourant les cristaux

Nature de la roche: gneiss ayant subi de gros efforts tectoniques

Composition:

- hornblende verte (35%) en larges cristaux peu altérés
- biotite 30% en grands cristaux peu altérés mais dont les fibres ont éclaté et sont recimentées
- chlorite rare mais bien individualisée
- plagioclase (10 à 15%) en cours de damouritisation
- quartz (15%) automorphe ou à l'état cataclastique fin
- oxydes opaques

Microfissuration: les surfaces de contact entre cristaux sont souvent cimentées par un mélange de quartz et de feldspaths finement broyés colorés par des oxydes, mais de nombreux contacts sont ouverts. Notons que le colorant ne pénètre jamais dans les cristaux.



Lumière polarisée

x20

Lumière naturelle

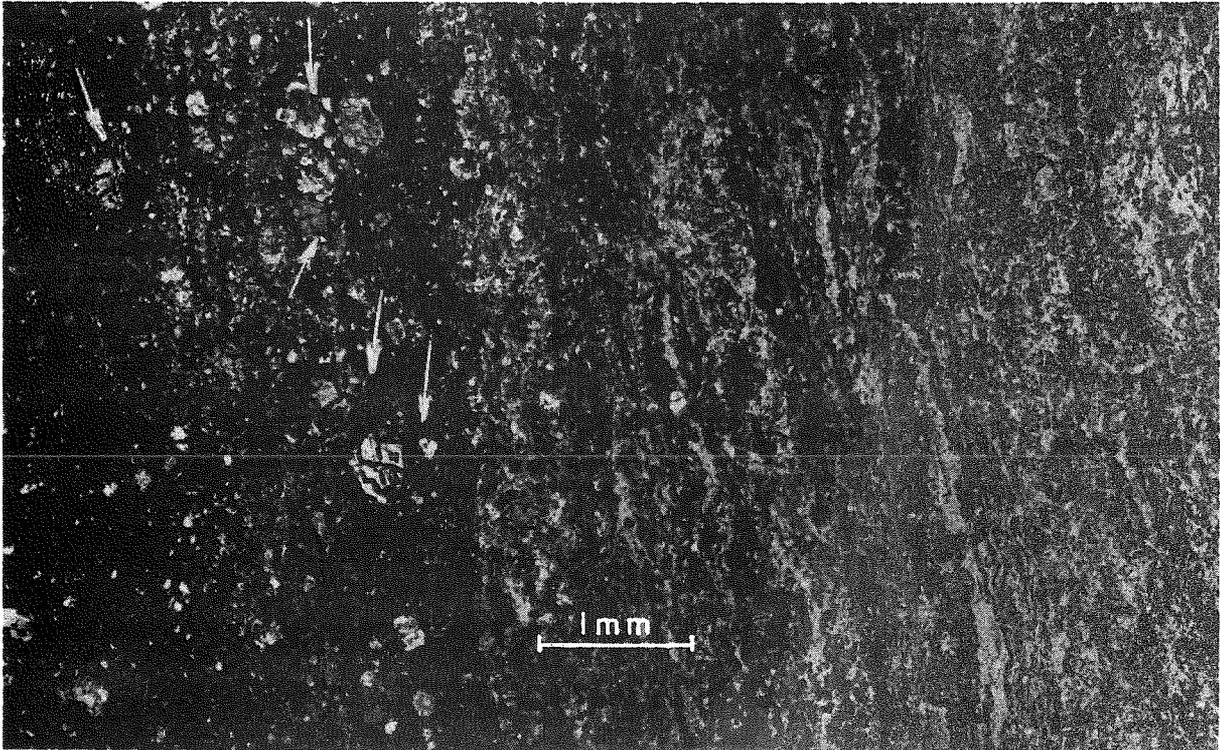
Gneiss de Bangala

Roche avec microouvertures concentrées dans des zones micro-
cristallines

Nature de la roche: gneiss microgrenu très migmatisé

Composition: - quartz en petits cristaux (60%) indentés les uns
dans les autres
- feldspaths orthose craquelé mais sain
microcline
plagioclases rares
- biotite saine en très petites lamelles groupées
- andalousite - en gros cristaux associés à de la
magnétite

Microouvertures: Le colorant souligne faiblement de petits
amas microcristallins où la biotite domine.
Apparence de petites éponges. Les taches ne
sont pas en relation les unes avec les autres.



Lumière polarisée

x20

Lumière naturelle

Calcschistes de Kardjali

Roche avec microouvertures concentrées dans les gros cristaux

Nature de la roche: calcschiste

Composition:

- quartz microcristallin
- plagioclases calciques
- micas (biotite, muscovite) moyennement altérés
- trémolite, actinote en cristaux allongés
- augite automorphe
- chlorite cryptocristalline
- calcite constituant la trame de fond
- epidote, grenat

Microouvertures: le colorant pénètre la trame des gros cristaux ferromagnésiens, en soulignant les clivages. Des zones colorées ne sont pas reliées entre elles.

Nous avons vu au chapitre B. I. que l'examen de la microstructure était un élément important intervenant dans le classement des sites. Nous pensons qu'il est indispensable, non seulement de caractériser l'intensité des microdivisions comme nous l'avons fait dans les graphiques d'écartements, mais aussi, au cours de l'étude de détails, de définir les types de structure. Nous allons voir en particulier qu'ils interviennent dans l'étude de certaines propriétés physiques.

3. 4. Relation entre microdiscontinuités, perméabilité et porosité

Dans le chapitre précédent relatif aux essais sur échantillons, nous avons décrit des expériences de percolation d'eau à travers des roches.

Ces expériences sont en général longues, demandent un matériel important et surtout prennent beaucoup de temps. Nous avons essayé de trouver une méthode donnant, rapidement et à peu de frais, un ordre de grandeur de la perméabilité et de la porosité d'un échantillon donné. Les expériences de percolation sont normalement exécutées sur des échantillons de quelques dizaines de cm³ ; tout récemment, ces expériences se sont faites avec des échantillons d'un volume maximal de 100 à 200 cm³ ; on conçoit donc qu'une lame mince de 5 x 5 cm soit encore bien représentative d'un échantillon utilisé pour la percolation.

3. 4.1 Observations de lames minces variées

Nous avons fait trois séries d'examen :

a) - Gneiss de Malpasset

Nous avons taillé des lames colorées à l'auramine J dans tous les échantillons soumis à la percolation décrite au paragraphe 2. 23.

b) - Echantillons communiqués par la S. N. P. A.

Les laboratoires des sociétés de recherches de pétrole sont parfaitement équipés pour mesurer les perméabilités et les porosités des roches. Nous avons gracieusement reçu des laboratoires de la S. N. P. A., des petits échantillons de 1,8 cm de diamètre et 2,4 cm de longueur, sur lesquels perméabilité et porosité avaient été mesurées. Les perméabilités ont été obtenues avec le perméamètre I. F. P. 49 (HOUBEURT - 1951), les porosités par la méthode dite à gaz : l'échantillon est saturé par de l'azote à 150 bars après plusieurs cycles de mise sous vide, mise en pression ; puis le gaz emmagasiné dans la roche est détendu dans des bouteilles vides dont on mesure la pression après que l'équilibre soit atteint ; la précision relative est de l'ordre de un pour cent.

c) - Echantillons de roches variées

J. BERNAIX (1966) a mesuré sur de très nombreux échantillons, les perméabilités sous contraintes ; il en tire une perméabilité K_0 à pression nulle et un coefficient de variation de perméabilité S égal au rapport des valeurs des perméabilités obtenues pour des pressions de confinement de -1 et 50 bars. Nous avons examiné 32 de ces échantillons, colorés successivement dans un bain alcoolisé de turquoise motylène à 5 g par litre, puis dans un autre bain alcoolisé de rhodamine B S. A. également à 5 g par litre ; chaque coloration a duré 5 jours, suivis de 3 jours de séchage forcé. Les lames ont été taillées dans le plan où se faisait l'écoulement de percolation (radial en général).

Le tableau ci-après résume les observations effectuées sur les trois séries d'échantillons.

Echantillons, provenance	Aspect des microdiscontinuités	Résultats de J. BERNAIX	
		K ^o cm/s	$S = \frac{K-1}{K50}$
Granite de Senones	Quelques très fines lignes fugitives dans les chlorites et au pourtour des feldspaths.	$1.15 \cdot 10^{-10}$	1.25
Granite de Huelgoat	Quelques lignes fines dans des craquelures de feldspaths. Pas de continuités et directions quelconques.	$2.3 \cdot 10^{-10}$	1.6
Granite de St-Germain de Modéon	Lignes dans les craquelures de feldspaths et taches dans les zones séricitisées.	$5 \cdot 10^{-8}$	3
Granite de Bresse	Taches dans les micas et surtout à leur pourtour. Pas de lignes fines.	$1.7 \cdot 10^{-10}$	1.4
Granite de Cap de Long	Petites lignes entrecroisées dans les craquelures des feldspaths, non continues et très fines.	10^{-9}	1.1
Granite de Flamanville	Quelques très rares craquelures colorées dans les feldspaths.	10^{-10}	1.2
Granite de Forge	Quelques pointes d'altération sériciteuses soulignées épisodiquement.	$1.5 \cdot 10^{-10}$	1.1
Gneiss de Malpasset Rive gauche	Imprégnation des lits micacés ; 3 microdiscontinuités (ouverture : 5μ) sécantes et continues.	10^{-5}	100
Gneiss de Malpasset Rive droite	Taches dans quelques micas. 1 microdiscontinuité cimentée d'oxyde.	10^{-7}	80
Gneiss de St-Cassien, sain	Taches dans les altérations très concentrées. Pas de lignes.	$2 \cdot 10^{-11}$	4
Gneiss de St-Cassien, moyennement altéré	Taches allongées soulignant les remplissages oxydés dus à l'altération de micas et imprégnant quelques micas sains.	10^{-7}	20
Gneiss de St-Cassien, très altéré	Taches allongées soulignant les oxydations des micas	10^{-6}	1.2
Gneiss de St-Jean du Gard	Plaque sans coloration.	$< 10^{-13}$	---
Micaschiste de Tignes	Taches dans des mouchetures de zoïsite.	10^{-8}	2

Echantillons, provenance	Aspect des microdiscontinuités	Résultats de J. BERNAIX	
		K ₀ cm/s	S = $\frac{K-1}{K 50}$
Schiste de Rassisse	Imprégnation diffuse des lits microcristallins	10 ⁻⁷	5
Schiste métamorphique du Mont-Cenis	Très petites taches soulignant les petits amas phylliteux (10 microns)	10 ⁻¹⁰	1.3
Schiste métamorphique du Mont-Cenis	Imprégnation de zoïsite et d'oxydes opaques en lits. Pas de lignes.	5. 10 ⁻⁵	10
Schiste métamorphique du Mont-Cenis	Rares imprégnations de zones oxydées et phylliteuses.	10 ⁻¹⁰	4.5
Ophite de Saillies de Salat	Plaque sans coloration.	< 10 ⁻¹³	---
Porphyroïde de Genis	Quelques phénocristaux de feldspath imprégnés en masses et quelques colorations extrêmement fines et diffuses dans le ciment.	10 ⁻¹¹	1
Ryolite porphyroïde de Corbigny	Microtaches dans le ciment	< 10 ⁻¹³	1
Andésite de Volvic	Imprégnation diffuse dans le ciment.	10 ⁻⁵	1
Quartzite de Tignes	Coloration de lignes extrêmement fines (0.01 μ) soulignant les cristaux et quelques craquelures.	2. 10 ⁻¹⁰	1.6
Calcaire d'Euville (détritique)	Imprégnation générale.	2. 10 ⁻⁵	1
Calcaire de Vilette (structure macrogranulaire)	Quelques rares lignes au contact de deux cristaux.	10 ⁻¹¹	1
Calcaire de St-Maximin (détritique à milioles)	Forte imprégnation du ciment.	10 ⁻⁴	1
Calcaire de St-Vaast (détritique à milioles)	Très faible imprégnation du ciment.	10 ⁻⁸	1
Calcaire de Hauteville (détritique)	Très fines fissures stylolitiques cimentées, mais colorées au contact du remplissage (épaisseur moins de 1 micron).	6. 10 ⁻¹⁰	1.2
Calcaire de Marquise (détritique)	Pas de coloration même dans les fissures cimentées de calcite sillonnant la plaque.	5. 10 ⁻¹¹	1.5
Calcaire détritique à grain ultra fin	Imprégnation de fissures stylolitiques incomplètement cimentées.	10 ⁻⁷	26
Grès du Liban	Imprégnation massive.	10 ⁻⁴	1
Grès du Cap Fréhel	Taches épaisses sur des grains opaques.	2.5 10 ⁻¹⁰	1

Echantillons (S.N.P.A.)	Aspect des microdiscontinuités	Perméabilité cm/s	Porosité %
Dolomie massive formée d'un agrégat de cristaux de 15 à 20 μ	Quelques lignes ténues au contact de quelques cristaux.	10^{-7}	0.5
Dolomie formée de cristaux de 10 μ avec de rares cristaux de quartz de 50 μ	Une fissure très cimentée par des oxydes opaques. La coloration est une imprégnation.	10^{-7}	0.4
Dolomie bien sédimentée	Une tache allongée soulignant une fissure par imprégnation non continue.	$2 \cdot 10^{-7}$	0.9
Dolomie en cristaux de 10 μ	Deux fissures soulignées par l'imprégnation des épontes.	$2 \cdot 10^{-7}$	0.5
Dolomie en cristaux de 10 à 15 μ	Une fissure plus ou moins remplie d'oxydes opaques. Le colorant souligne sur 5 le contact entre remplissage et épontes.	$2 \cdot 10^{-6}$	4.2
Dolomie en cristaux de 5 à 10 μ incomplètement cimentées	Coloration uniforme moyenne entre les grains.	$3 \cdot 10^{-6}$	16.5
Calcaire en cristaux de 15 à 20 μ	Pas de ligne individualisée. Une microdiscontinuité de 5 à 10 traversant la plaque.	$7 \cdot 10^{-6}$	3.6
Calcaire détritique avec de nombreux micro-organismes	Une microdiscontinuité de 5 à 10 traversant la plaque.	$8 \cdot 10^{-6}$	2.3

Echantillons (gneiss)	Aspect des microdiscontinuités	Perméabilité cm/s
Gneiss très folié formé de lits enchevêtrés de micas noir et de taches de feldspaths plagioclases	Lignes soulignant les lits de micas, ouverture $< 1 \mu$; 1 à 3 lignes sécantes continues de 5 à 7 μ d'épaisseur.	10^{-6}
Gneiss formés de lits de micas bien orientés et de bandes de feldspaths plagioclases sains.	5 à 10 lignes de quelques microns d'épaisseur s'enchevêtrant et recoupant des lignes colorées le long des lits de micas.	10^{-4} à 10^{-5}
Gneiss prélevé au voisinage d'un cisaillement	12 lignes de quelques microns se recoupant entre elles. Peu de remplissage.	10^{-3}

3.42. Corrélations possibles

La similitude de certains résultats permet d'avancer les corrélations suivantes entre des caractères physiques tels que perméabilité ou porosité et d'autres tels que microdivision d'une roche.

Aspect de la coloration sur une plaque mince de 5x5 cm	Perméabilité cm/s	Variation de perméabilité avec la contrainte	Porosité approximative %
Pas de coloration	10^{-8}	négligeable	< 0.5
Imprégnation massive uniforme sans lignes ni taches particulières	10^{-4}	négligeable	15
Imprégnation moyenne uniforme sans lignes ni taches particulières	10^{-6}	négligeable	10
Faible imprégnation sans lignes ni taches	10^{-8}	négligeable	quelques %
Taches colorées rares venant de l'imprégnation de fissures très cimentées ou de minéraux d'altération des micas dans le cas des roches foliées	10^{-6}	notable	< 1
Nombreuses imprégnations de minéraux alignés altérés ou de nombreuses fissures incomplètement cimentées d'oxydes ou bien cimentées de minéraux d'altération	10^{-5} 10^{-5}	très notable	
1 à 3 lignes colorées continues soulignant des fissures de quelques microns sans remplissage	10^{-7} à 10^{-8} (dans le sens des micro-discontinuités)	notable	< 1
1 à 3 lignes colorées continues venant de la coloration des fissures de 5 à 10 microns sans remplissage	10^{-6} (dans le sens des micro-discontinuités)	très notable	< 1
5 à 10 lignes de quelques microns, continues sans remplissage, plus ou moins sécantes	10^{-4} à 10^{-5}	exceptionnelle	quelques %
Plus de 10 lignes colorées, de quelques microns, sans remplissage, se recoupant entre elles	10^{-3} à 10^{-4}	exceptionnelle	> 6

Deux remarques peuvent être faites :

1 - Les variations de perméabilité sont influencées par les zones d'altération et par les microdiscontinuités ouvertes. Il faut également noter que des variations faibles ont été également mesurées dans le cas de matériaux étanches, là où cependant existaient des fissures cimentées qui s'ouvraient en traction.

2 - La perméabilité est plus sensible à l'épaisseur des fissures qu'à leur nombre. On peut faire la vérification théorique des valeurs trouvées en employant la formule d'écoulement laminaire parallèle dans une fissure d'épaisseur constante :

$$K = \frac{\rho}{12\mu} \cdot \frac{e^3}{a} \quad \text{où}$$

K est la perméabilité équivalente à celle d'un milieu poreux.

ρ est le poids spécifique du fluide.

μ est la viscosité du fluide

e est l'épaisseur libre de la fissure

a est la distance entre fissures.

Avec de l'eau à 20°, une fissure tous les 5 cm, - c'est-à-dire une par plaque - et une épaisseur de l'ordre de 7μ , on trouve :

$$K = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s, chiffre conforme à celui trouvé par l'expérience.}$$

Dans le cas de cette étude consacrée à la mise en lumière de phénomènes particuliers et à l'appréciation d'ordres de grandeur, nous pensons que l'on peut utiliser la formule proposée pour un calcul approché de la perméabilité d'un échantillon avec e tiré de l'étude statistique des épaisseurs et, a tiré des graphiques d'écartements obtenus à partir de l'observation de lames minces colorées.

3.43.

La perméabilité d'un échantillon ne montrant que l'imprégnation d'une petite fracture cimentée, celle d'un échantillon montrant 1 à 3 lignes venant de la coloration de fissures extrêmement fines mais libres de toute cristallisation secondaire et celle d'un échantillon montrant une coloration générale sur toute la surface de la plaque, sont identiques : 10^{-6} cm/s.

Or, la comparaison des essais que nous avons faits par percolation à travers un échantillon sans contrainte latérale (la pression motrice étant de 50 bars), les essais faits sur des blocs identiques au Laboratoire de Toulouse avec des contraintes latérales égales aux contraintes motrices ainsi que les résultats de J. BERNAIX, ont montré des variations très grandes de perméabilité allant de 1 à 100 et même de 1 à 1000.

Il faut donc préciser soigneusement la nature des circulations d'eau possibles à travers la roche : soit à travers des fractures très fines mais ouvertes, soit à travers des fractures incomplètement cimentées, soit dans un milieu poreux dont les grains forment un squelette rigide. En effet, la pression de confinement liée aux contraintes imposées par l'ouvrage, peut faire varier considérablement la perméabilité dans le premier cas, relativement peu dans le second et ne pas l'affecter dans le troisième. Ce phénomène est étudié par J. BERNAIX (1966) et ses conséquences, à l'échelle du massif rocheux, prises en compte par les ingénieurs dans la définition des voiles de drainage assurant les appuis de barrages contre les risques d'instabilité par pression interstitielle (LONDE P. et SABARLY F. - 1966).

3.5. Vieillessement - Fatigue

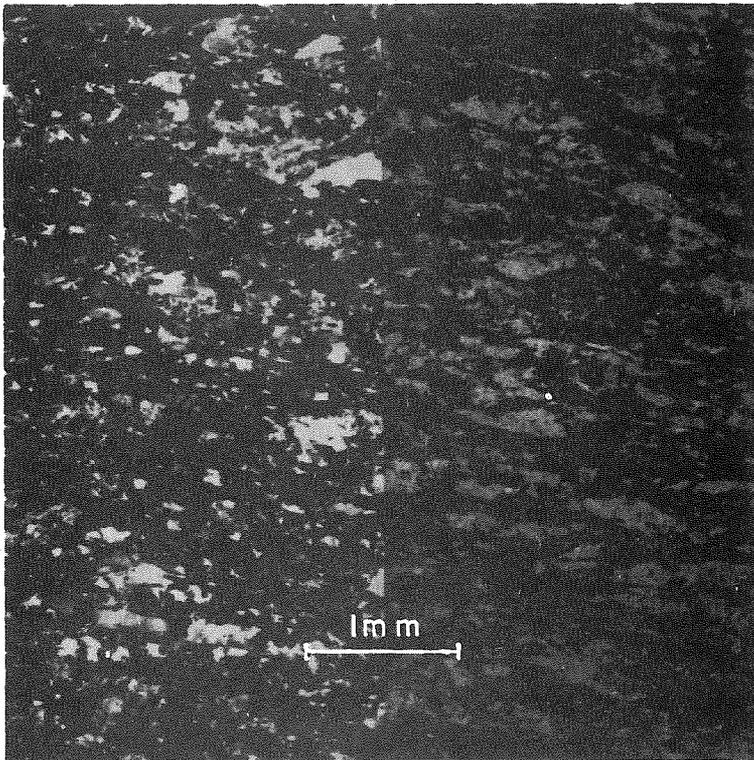
(GROUPE DE TRAVAIL FRANCAIS - 1964)

(HAMROL R. - 1961)

Depuis que l'attention a été attirée par l'altérabilité des roches, de nombreux exemples ont été décrits. Quelques auteurs même ont cité des cas où des changements de qualité d'un massif auraient été perçus lors de mesures sismiques, (JEAGER CH. - 1965) montrant ainsi la grande intensité du phénomène.

Pour utiliser la technique économique de la lame mince, au cas du vieillissement d'une roche, nous avons fait les 2 expériences suivantes, fondées sur l'évolution éventuelle de la roche par effet mécanique (charge et décharge) et physico-chimique (humidification à l'eau et séchage).

Dans un bloc de gneiss du type fibreux, provenant des affleurements du bas de la rive gauche du site du barrage de Malpasset, 32 cubes de 4 x 4 x 4 cm ont été taillés à la scie. La qualité de la roche est la même que celle ayant servi aux essais d'écrasement sur cubes, qui ont donné des valeurs de 600 à 700 bars. Les blocs ont été choisis pour leur homogénéité satisfaisante. La figure 85 donne l'aspect grossi 20 fois d'une coupe mince type.



Type de gneiss fibreux utilisé pour les essais de vieillissement.

- Résistance 600 kg/cm²
- Composition :
 - quartz
 - feldspaths plagioclases (oligoclase)
 - micas : biotite altérée
 muscovite (plus rare)
 - cordiérite } rares
 - chlorite }
 - clacite }

Fig. 85 - Essais de vieillissement sur cubes de gneiss de Malpasset.

L'effet de fatigue a été étudié en faisant subir aux cubes une série de cycles : compression à 50 bars, puis relaxation à pression nulle à raison d'un cycle par seconde sur une petite presse à main de 30 T LE PETIT (Fig. 86). La précision des pressions, du fait de la manœuvre relativement rapide à main, est de ± 5 bars. Les échantillons ont été saturés avant essais dans l'eau sans pression, après mise sous vide. Les efforts étaient parallèles aux fibres.

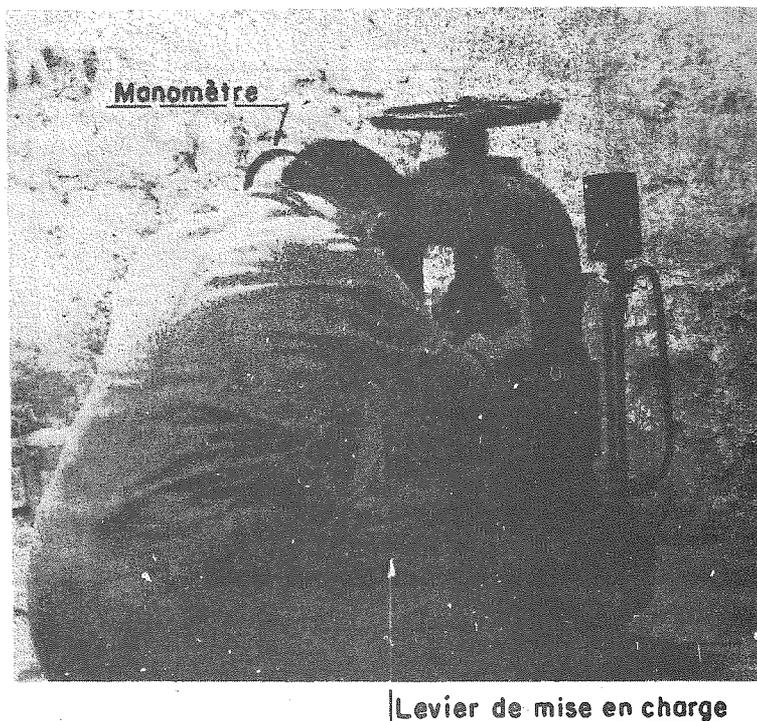


Fig. 86 - Presse LE PETIT de 30 tonnes

Utilisée pour les essais cycliques de charge sur cubes.

L'opérateur amène le plateau supérieur de la presse en contact avec le cube ; puis, la soupape étant maintenue ouverte, il produit une série de cycles de charge et de décharge, de zéro à la pression requise au rythme de un par seconde.

L'effet de vieillissement chimique a été étudié en faisant subir aux cubes une série de cycles : humidification à l'eau, à pression atmosphérique pendant une semaine, et séchage à 20° C à pression atmosphérique pendant une semaine.

Le contrôle des caractéristiques de la roche a été opéré par examen de lames minces colorées à l'auramine J (rouge), taillées dans trois directions perpendiculaires. Le critère pris en compte est la longueur de microfissures colorées par unité de surface de lame. La mesure est effectuée avec le micromètre et la lentille x 4 du microscope. La surface de la plaque est obtenue par planimétrie.

Le tableau ci-après donne le nombre d'échantillons utilisés et les résultats obtenus.

Nous avons distingué les cas où le plan de la lame est parallèle aux fibres, et le cas où il est perpendiculaire. Rappelons que deux lames par cube ont été taillées dans le premier cas, et une lame dans le second cas.

CYCLES DE CHARGE - DECHARGE

=====

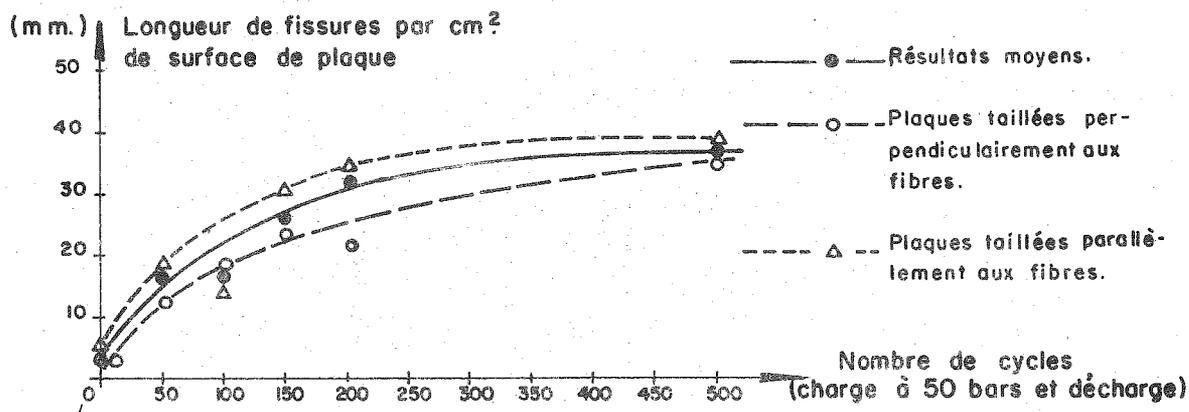
Nombre de cubes (3 lames par cube)	Nombre de cycles	Longueur de microdiscontinuités par unité de surface mm/cm ²	Longueur moyenne de microdiscontinuités par unité de surface mm/cm ²	Position du plan de la lame par rapport aux fibres
2	0 (était initial)	4.2 3.6	4	parallèle perpendiculaire
2	50	18 12.6	16.2	parallèle perpendiculaire
2	100	16 17.5	16.5	parallèle perpendiculaire
2	150	28.1 24.2	26.8	parallèle perpendiculaire
3	200	35.1 20.8	32	parallèle perpendiculaire
4	500	37 35.8	36.6	parallèle perpendiculaire

CYCLES D'HUMIDIFICATION - SECHAGE

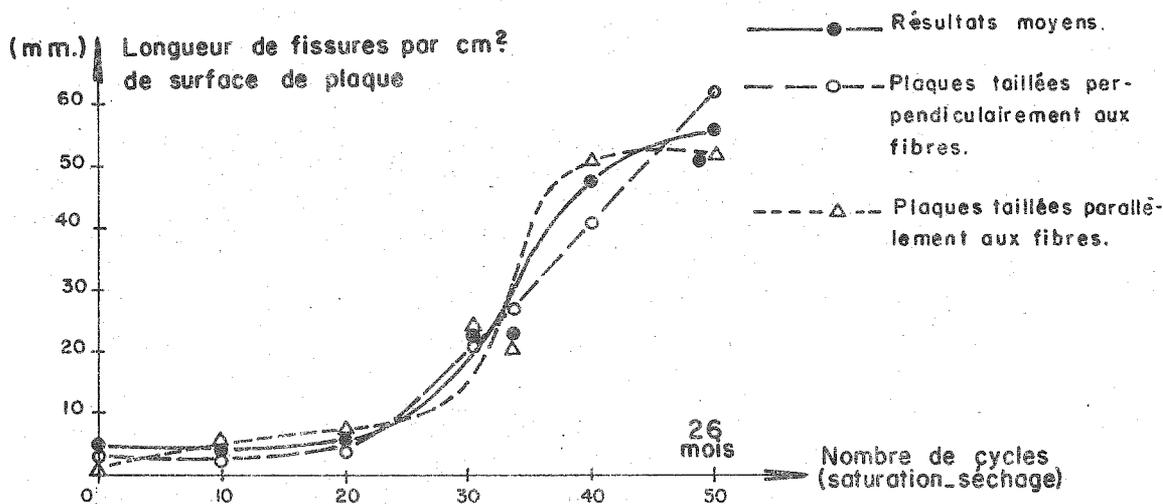
=====

Nombre de cubes (3 lames par cube)	Nombre de cycles	Longueur de microdiscontinuités par unité de surface mm/cm ²	Longueur moyenne de microdiscontinuités par unité de surface mm/cm ²	Position du plan de la lame par rapport aux fibres
2	0 (était initial)	4,9 5,2	5	parallèle perpendiculaire
2	10	4,1 3,4	3,8	parallèle perpendiculaire
2	20	6,0 5,7	5,9	parallèle perpendiculaire
2	31	23,3 20,9	22,5	parallèle perpendiculaire
2	34	21,1 25,5	22,5	parallèle perpendiculaire
3	42	51,0 41,6	47,2	parallèle perpendiculaire
4	53	51,0 61,4	56,8	parallèle perpendiculaire

Les figures 87 et 88 traduisent ces résultats sous forme de graphique d'évolution où l'on peut voir une augmentation importante de la microdivision dans les deux cas, la vitesse d'évolution étant différente : rapide au début, dans le cas des cycles de charge et au contraire, s'accélégrant à la fin, au cours des cycles d'humidification. Dans les deux cas, les courbes semblent continuer à croître à la fin de l'expérience.



ESSAIS CYCLIQUES A LA COMPRESSION
fig 87.



ESSAIS CYCLIQUES SATURATION-SÉCHAGE
fig 88.

ÉVOLUTION DE LA MICROFISSURATION DE GNEISS DE MALPASSET EN FONCTION D'EFFORTS CYCLIQUES ET DE CYCLES SATURATION - SÉCHAGE

La croissance du nombre de microfissures parallèles et perpendiculaires aux fibres montre que les discontinuités sécantes et que les contacts entre lits peuvent jouer un rôle dans l'évolution. Rappelons qu'au cours de l'étude géologique, nous avons fait ressortir un phénomène de vieille altération qui affectait précisément la surface des cristaux de biotite.

L'observation macroscopique des échantillons a montré que les fissures existantes, surtout celles sécantes aux fibres, sont revêtues d'un film de matière blanchâtre, dur à sec, parfois pâteux après saturation. A la fin de l'essai n° 2 (2 ans), ce film a pris une couleur jaune verdâtre tachée de rouille par oxydation de très petits cristaux de pyrite. Il nous a aussi semblé que la destruction des morceaux au marteau était plus aisée vers la fin.

Au cours d'expériences analogues faites sur des bétons d'essais fabriqués à partir d'agrégats de dolérite du site de Hendrik Verwoerd, nous n'avons observé aucune détérioration, les agrégats restant massifs et le collage avec le mortier excellent (I.O.R.C.C., - 1965).

3.6. Conclusion

A l'aide de la lame mince colorée - technique rapide et économique - nous avons pu trouver un ordre de grandeur de la perméabilité d'un échantillon rocheux et montrer que cette propriété était liée à la structure de l'échantillon.

Nous avons également montré que certaines formes de structures observées permettaient d'expliquer - donc de prévoir - des changements importants de perméabilité en fonction d'une augmentation de la contrainte de confinement de la roche.

La même technique nous a permis de suivre les transformations de la structure d'un gneiss soumis à certaines variations de contrainte et de teneurs en eau. Ces transformations - principalement une forte augmentation du nombre des microdiscontinuités - nous permettent de prévoir un accroissement de la perméabilité et sans doute, de la sensibilité de celle-ci à la contrainte.

Ces résultats, même considérés seulement comme des ordres de grandeur, sont déjà précieux puisqu'ils permettent d'orienter des essais plus élaborés. En outre, ils nécessitent l'exécution systématique de nombreuses lames minces qui permettent de mieux étudier des problèmes plus généraux qui dépassent la simple pétrographie.

Les lames minces colorées permettent ainsi d'aborder d'une façon assez rigoureuse, à l'échelle microscopique, la compréhension d'ensemble d'un site.

III. ESSAIS SUR LE ROCHER EN PLACE

L'analyse d'un certain nombre de phénomènes décelés sur échantillons nous a montré que, dans certains cas, les enseignements recueillis à petite échelle permettraient de dégager des critères de comparaison des roches,

Mais nous avons aussi vu que, plus souvent, l'échantillon ne permet pas de faire apparaître un classement, le phénomène responsable n'apparaissant pas à l'échelle de l'échantillon.

Dans ce dernier cas, il faut alors intéresser un volume de roche plus grand d'une part et situé dans son gisement naturel d'autre part.

C'est le rôle des essais en place dont nous allons décrire quelques cas courants.

1. Essais au vérin.

Parmi les essais in situ dont dispose la mécanique des roches, les essais de chargement d'une plaque rigide sur une paroi rocheuse sont parmi les plus utilisés. Ils ont été employés d'une façon systématique par E.D.F. sous l'impulsion de M. TALOBRE. (TALOBRE 1957-1961 - GROUPE DE TRAVAIL FRANCAIS - 1964 MAZENOT - 1965), Des essais datant des années 1930 avaient été faits par M. DROUHIN en Algérie.

Les essais au vérin courant intéressent, en général, un volume de roche de quelques mètres cubes. Ce volume est encore insuffisant pour être représentatif, mais son étude constitue une étape vers celle du massif dans son ensemble, d'autant plus que c'est encore la seule démarche économiquement réalisable.

En général, ces essais sont réalisés dans les galeries de reconnaissance en utilisant la paroi opposée à celle de l'essai pour fournir la réaction nécessaire.

1.1. Généralités sur les essais au vérin.

1.1.1.

Etant donné les dimensions de la plaque et les forces mises en jeu par le vérin, on n'obtient pratiquement jamais de rupture permettant d'apprécier les caractéristiques intrinsèques du matériau. C'est donc, avant tout, un essai de déformabilité.

A la surface d'une excavation faite par explosifs, il existe une fissuration artificielle dont la décompression superficielle, qui se traduit par l'expansion du rocher avec ouverture des joints, crée une frange où les déformations enregistrées ne représentent pas exactement celles du terrain massif.

L'expérience a montré qu'on ne pouvait pas éliminer complètement la zone de décompression ; par des moyens discrets (bouchardes, ciseaux...) on purge au maximum la surface pour éliminer les morceaux instables. L'essai intéressera donc un terrain de plus en plus compact.

Nous verrons que l'aspect des courbes de déformation permet d'apprécier les caractéristiques du terrain, ainsi que l'importance de la frange perturbée.

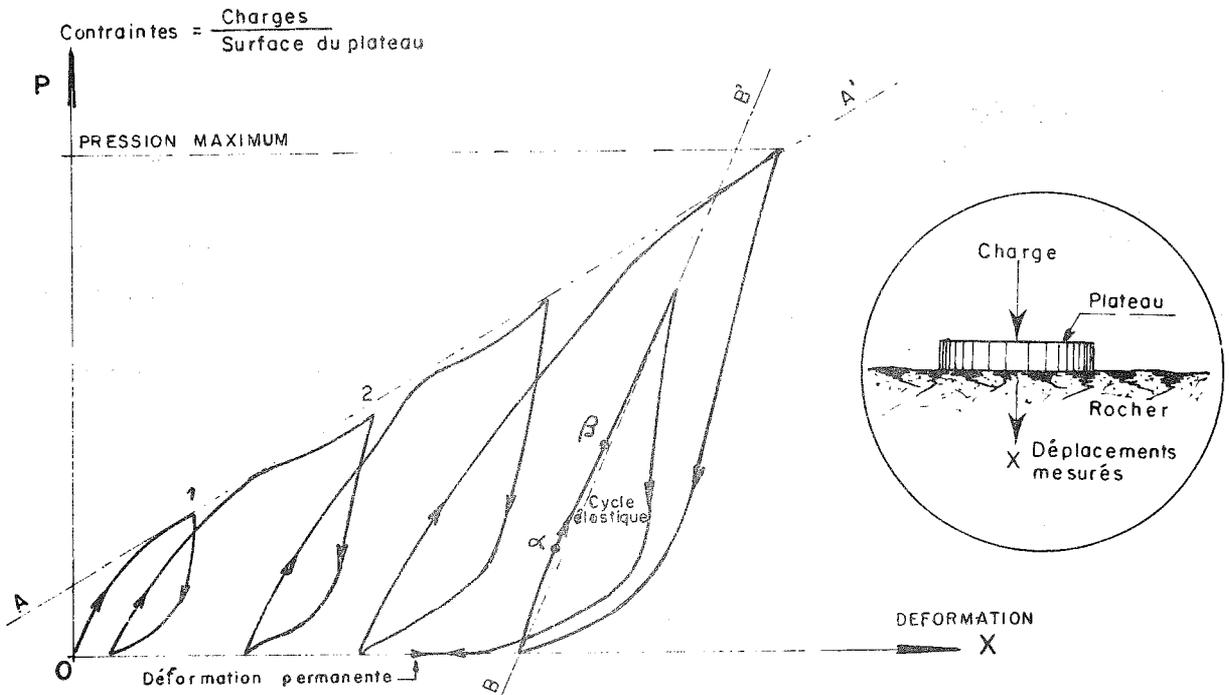
1.1.2. But de l'essai

L'essai permet d'obtenir une relation effort-déformation, la déformation étant soit l'enfoncement du plateau d'appui, soit les mouvements du rocher au large (jusqu'à plusieurs mètres) qui définissent le "cratère de déformation".

Nous analyserons, dans ce travail, les courbes effort-déformation relatives à l'enfoncement du plateau.

Au cours des mesures, il est classique d'effectuer des cycles de charge et de décharge à pression croissante. La figure 89 montre un exemple possible de courbe.

Des courbes obtenues, il est classique de vouloir extraire des données propres à calculer des modules de défor-



π = Module de déformation globale obtenu par la formule de Boussinesq pour A-A'

E = Module de déformation élastique obtenu par la formule de Boussinesq pour B-B'

Coefficient de déformation globale $C_g = \frac{x_2 - x_1}{p_2 - p_1}$

Coefficient de déformation élastique d'un cycle $C = \frac{x_\beta - x_\alpha}{p_\beta - p_\alpha}$

Coefficient de déformation permanente $C_p = \frac{\text{déformation permanente}}{\text{pression maximum}}$

ESSAIS AUX VERINS
COURBES DE DEFORMATION
DEFINITION DES MODULES DE DEFORMATION
ET DES COEFFICIENTS DE DEFORMATIONS

fig 89.

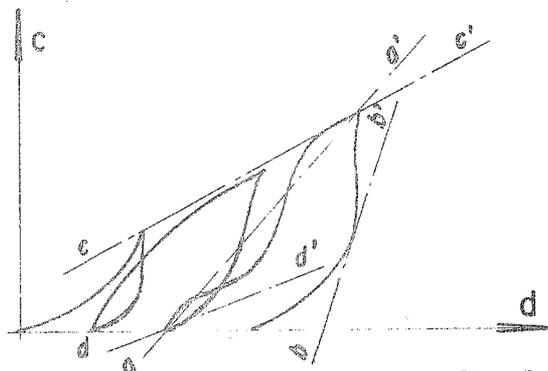


fig. 90

mation, qui sont parmi les premiers renseignements que demande le projeteur. Malheureusement la roche que sollicite l'essai est un milieu discontinu, souvent lité ou diaclasé, dans lequel les déformations sont la somme de déformations permanentes et de déformations réversibles. Les formules utilisées pour le calcul des modules s'appliquent toujours à des milieux élastiques continus. De plus, nous devons constater que l'accord est encore loin d'être unanime chez les auteurs sur les formules à employer et les valeurs à utiliser : il est toutefois très courant d'employer la formule de Boussinesq (CAQUOT et KERISEL - 1956 - page 145) qui lie l'enfoncement de la plaque à la charge qui le produit

$$w = P \frac{1 - \nu^2}{E} \frac{1}{D}$$

w étant l'enfoncement moyen du plateau rigide de diamètre D

P étant la charge totale appliquée

E le module de déformation du milieu dont le coefficient de Poisson est ν , ces deux dernières valeurs étant caractéristiques des essais statiques.

Même avec l'utilisation de cette formule simple, l'accord est loin d'être réalisé sur la valeur des déformations à prendre en compte.

Un certain nombre de modules ont été définis pour chaque type de déformation. Signalons entre autres (fig. 90) le module sécant (aa'), le module tangent (bb'), le module global (cc'), le module initial (dd').

Etant donné, rappelons le, que la déformation enregistrée est la somme de déformations élastiques instantanées et différées, de déformations permanentes instantanées et différées et de déformations brusques aléatoires, il semble difficile de trouver par cette méthode le module de YOUNG du massif.

Signalons toutefois que J.B. WALSH (1965) a montré dans le cas d'une compression uniaxiale élastique d'un milieu comprenant une fissure que le module de YOUNG du matériau non fissuré pouvait être trouvé à partir de la pente initiale de la courbe de déchargement.

De leur côté, DUFFAUT et LAKSHMANAN (1965) ont proposé de se servir des mesures de déformations au large (cratère) pour s'affranchir de la frange perturbée de surface et obtenir un module de déformation, toujours dans le cas élastique, du rocher en profondeur.

1.13. Dans ce travail, nous nous proposons d'étudier deux modules, définis par la figure 89, que nous avons été amenés à choisir à la suite des observations pratiques suivantes :

- les cycles élémentaires sont souvent différents tant à la montée qu'à la descente ; on peut, par contre, tracer assez facilement une courbe (souvent une droite pour les derniers cycles) qui enveloppe tous les cycles effectués.
- la déformation du cycle final - dit cycle élastique - effectué à pression réduite est souvent proportionnelle à la charge.

Les deux modules étudiés sont donc :

- module de déformation élastique E (segment BB')
- module de déformation globale Γ (segment AA').

Nous avons, dans ce travail, introduit cette notion de module calculé pour nous rattacher à des valeurs utilisées classiquement. Il n'est pas de notre propos de les proposer comme valeurs à prendre pour le module du massif entrant dans les calculs du projeteur. Ce module, cependant, doit être compris entre les deux valeurs proposées.

Nous avons choisi pour ν - coefficient de Poisson - 0, 25 à Tachien et 0, 20 à Hendrik Verwoerd.

Par suite de l'erreur commise sur ν par cette approximation, l'erreur relative que l'on commet sur

$$E = \frac{P}{w D} (1 - \nu^2) \text{ est } \frac{\Delta E}{E} = \frac{2 \nu \Delta \nu}{1 - \nu^2}$$

or ν ne peut pratiquement varier que de 0, 10 à 0, 30, donc $\frac{\Delta E}{E} = 0, 084$ soit environ $\pm 8\%$ ce qui est très

inférieur aux erreurs commises dans l'assimilation du rocher à un milieu élastique.

D'autres paramètres plus nuancés peuvent être tirés des courbes effort-déformation : les coefficients de déformation

$$C = \frac{\text{différence de déformation}}{\text{différence de contrainte}} \quad (\text{exprimés en } \frac{1}{100} \text{ mm/bar})$$

A la différence des modules, calculés pour un cycle entier, nous considérons pour ces paramètres des intervalles petits et nous étudierons leur variation en fonction de l'évolution des pressions.

Il faut surtout retenir que ces paramètres ne sont pas interprétés, mais directement déduits des déformations, alors que les modules définis ci-dessus découlent de l'application plus ou moins justifiée d'une formule.

Des auteurs ont souvent appelé "module sécant" ce paramètre C étendu à un cycle entier ; pour ne pas prêter à confusion avec les modules dont nous avons parlé plus haut, nous appellerons ce paramètre : coefficient de déformation ; il est exprimé en centième de millimètre par bar. Les coefficients sont comparables entre eux, puisque les conditions d'essais sont semblables : plaques circulaires de dimensions voisines, contraintes du même ordre de grandeur.

Nous définissons ainsi (figure 89) :

C_g coefficient de déformation globale calculée à partir de la courbe enveloppe de toutes les courbes élémentaires des cycles.

C coefficient de déformation élastique calculé à partir de la courbe du cycle final.

C_p coefficient de déformation permanente.

Nous étudierons les variations de ces coefficients en fonction de la contrainte ou leur groupement en familles caractéristiques (en particulier C_p, tableau XI et XII).

Notons que l'on peut trouver une correspondance intéressante entre les modules E et Γ et les coefficients que nous étudions, si on considère leur rapport.

$$\text{En effet } \frac{E}{\Gamma} = \frac{p}{w} \times \frac{w'}{p'} \quad \text{soit } \frac{\frac{w'}{p'}}{\frac{w}{p}}$$

Or, pour le même intervalle, on a :

$$\frac{w'}{p'} = C_g \text{ coefficient de déformation globale}$$

et

$$\frac{w}{p} = C \text{ coefficient de déformation élastique.}$$

Or, nous verrons que nous utilisons les modules E et Γ surtout par leur rapport, ce qui permet de se rattacher directement à la notion élémentaire de déformation.

1.2. Essais effectués

Nous analyserons les résultats obtenus après les campagnes d'essai menées sur les sites des barrages de Hendrik Verwoerd en Afrique du Sud et de Ta Chien à Formose.

Les conclusions de ces analyses de détail seront ensuite comparées à celles tirées d'essais faits par E.D.F. sur des sites français.

1.21. Appareillage

Dans le cas des essais faits sur le site de Ta Chien et Hendrik Verwoerd, l'équipement comportait (figures 91, 92, 93) :

- un dispositif de mise en charge composé d'un vérin de 300 tonnes avec sa pompe et des manomètres, des plateaux d'acier de 45 cm et 60 cm de diamètre et de 45 mm d'épaisseur, montés sur rotule, des colonnes transmettant la poussée du vérin.

SCHEMA D'UN ESSAI AU VERIN

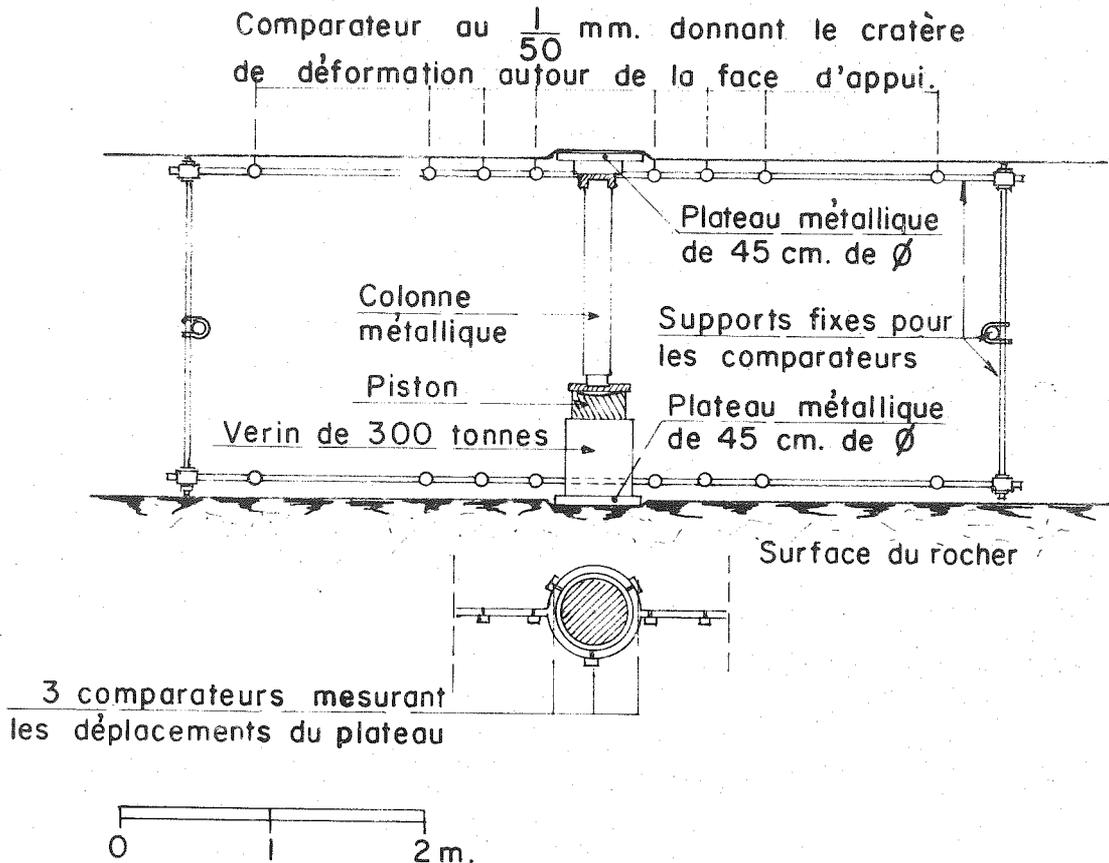


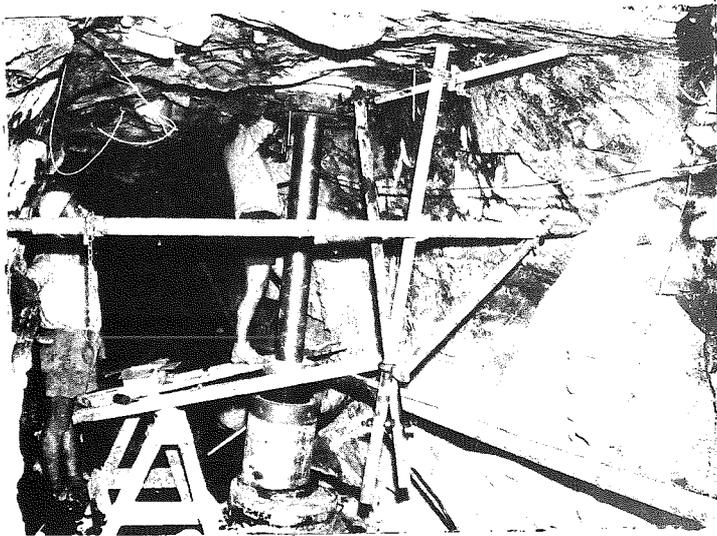
fig 91.

- des dispositifs de mesures de déplacements composés de comparateurs au 1/50 mm ou au 1/100 mm répartis sur la face elle-même et à son voisinage de façon à connaître l'enfoncement du plateau et la déformation du rocher en surface jusqu'à 2 m autour de la face d'appui.

Dans le cas du site de Ta Chien, on a étudié la déformation interne du rocher en scellant à 0,50 - 1,00 et 2,00 m de la surface rocheuse, dans un trou de sondage foré dans l'axe de la plaque, des témoins de déformation relative (témoin TELEMAR E 90).

Afin d'obtenir la rigidité maximum du plateau d'appui, nous avons empilé des plateaux de taille intermédiaire entre ce plateau et le vérin de diamètre 35 cm.

SUPPORT FIXE DES COMPARATEURS



PLATEAU
D'APPUI DE
45 CM. DE
DIAMÈTRE

COLONNE
MÉTALLIQUE

fig 92 a

VERIN / APPUI BÉTONNE

ESSAI AU VERIN SUR UNE FACE
HORIZONTALE, EN CALOTTE, DANS
LA GALERIE RA 1 (ESSAI n° 8)

COMPARATEUR AU $\frac{1}{50}$ mm

PLATEAU DE 45 CM DE DIAMÈTRE



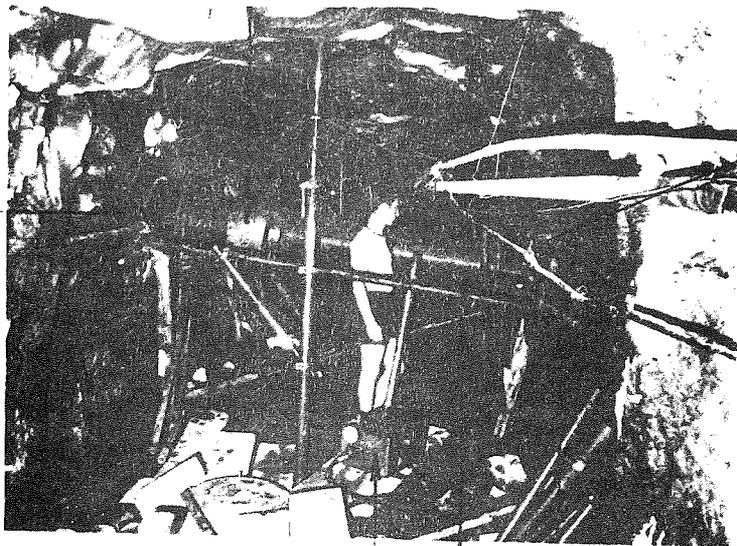
fig 92 b

COLONNE VERTICALE

DÉTAIL D'UN ESSAI AU VERIN

VERIN

PLATEAU
D'APPUI DE
DE 45 CM. DE
DIAMÈTRE
FACE
GAUCHE



PLATEAU
D'APPUI DE
45 CM. DE
DIAMÈTRE
FACE
DROITE

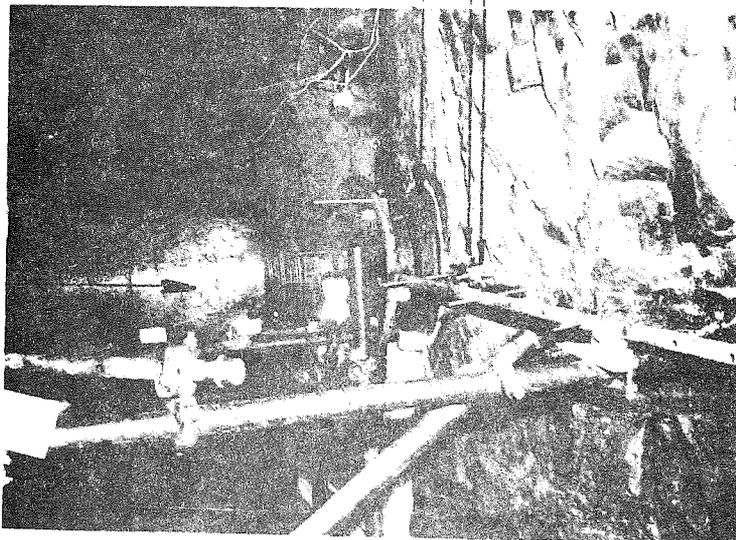
POMPE

SUPPORTS FIXES DES
COMPARATEURS

ESSAI AU VERIN SUR DEUX FACES
SENSIBLEMENT VERTICALES DANS
LA GALERIE RA I (ESSAI n° 2)

PLATEAU D'APPUI

COMPARATEURS AU $\frac{1}{50}$ mm



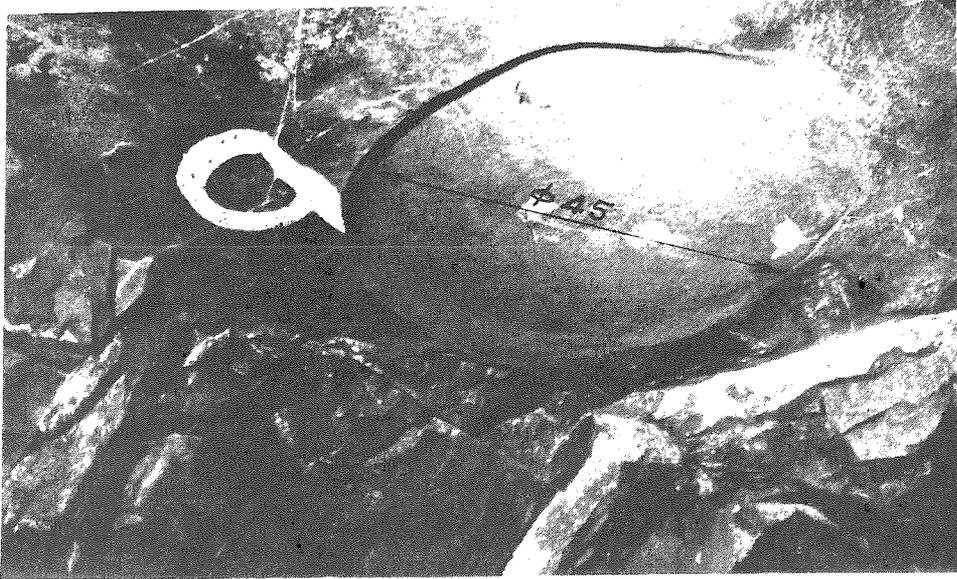
VERIN

fig 93

DÉTAIL D'UN ESSAI AU VERIN SUR UNE
FACE D'APPUI VERTICALE

1. 22. Préparation des faces.

En général, les faces obtenues après purge des parois ont été meulées soit en calotte, soit en piédroits. On a pu appliquer le plateau directement sur le rocher ainsi parfaitement dressé (figure 94). Quand la face n'était pas tout à fait plane, on a interposé un disque de soufre coulé sur place.



Galerie RA 2 -

Surface pour essai au vérin

Fig. 94 - L'argilite a été meulée pour former une face d'appui plane de 45 cm de diamètre. On a choisi le voisinage d'une diaclase plane sensiblement horizontale.

1. 23. Réalisation de l'essai.

Le programme de montée et descente en pression a été normalisé au maximum.

- Par exemple, au site de Hendrik Verwoerd, on a prévu quatre cycles de pression maximum : 35 - 70 - 105 - 140 bars ; chaque cycle comportait 4 points de mesures intermédiaires à la montée et 4 à la descente.

Les lectures aux pressions intermédiaires sont faites après deux minutes d'arrêt à la pression requise. Les lectures au sommet et en bas de chaque cycle sont faites après 10 minutes de pose à la pression requise. Ces temps ont été définis à la suite d'expériences préliminaires qui ont montré, pour les contraintes utilisées, que les déformations avaient lieu pour une grande part, dans les toutes premières minutes de l'application de la force.

Après ces quatre cycles, deux autres cycles à pression maximum 105 bars sont effectués pour étudier la déformation élastique du rocher. Ils comportent les mêmes paliers.

1.3. Analyse des résultats d'essais

1.31. Site du barrage de Ta Chien.

1.311.

Le site du barrage et les reconnaissances effectuées ont été décrits au chapitre A.1.3. Les essais au vérin ont été effectués en 1962 sous notre direction par les membres de la Taiwan Power Company.

Parallèlement, des échantillons de roches étaient prélevés par carottage après les mesures et soumis à des essais divers du laboratoire de l'Union Industrial Research Institute. Nous n'avons trouvé qu'une très approximative corrélation entre les résultats des déformations obtenues sur échantillons et celles obtenues in situ ; l'effet d'échelle est important.

D'autre part, l'examen des carottes nous a permis de connaître la nature et la structure du terrain en-dessous de la surface d'appui, indications précieuses pour l'exploitation des résultats de l'essai au vérin.

1.312. Emplacement des essais.

Il a été décidé de placer les essais autant que possible au voisinage immédiat des futures fondations de l'ouvrage, tout le long de celles-ci, à différents niveaux. La direction de chargement des plateaux de diamètre 50 cm, était soit perpendiculaire, soit parallèle au plan de stratification de la roche. Quand cela a été possible, quelques essais ont été faits avec la direction de chargement sensiblement parallèle à la direction de poussée estimée du barrage. Tous ces essais ont eu lieu dans les très nombreuses galeries existantes, rive droite et rive gauche. Le tableau ci-après résume les emplacements, les niveaux et le nombre des faces essayées pour les deux rives (voir plan de galeries, figure 40).

Rive gauche			Rive droite		
Galerie	Niveau m	Nombre de faces	Galerie	Niveau m	Nombre de faces
MA 12	1451	2	MA 36	1451	2
MA 37	1425	4	MA 17	1450	1
MA 6	1413	1	MA 34	1425	2
MA 25	1350	5	MA 27	1423	5
MA 26	1310	4	MA 18	1398	3
MA 31	1244	4	MA 33	1360	1
			MA 28	1320	2
			MA 20	1262	1
		20			17
		soit 37 faces essayées			

1.313. Préparation des essais.

Après la purge de la surface, faite à la masse et à la barre à mine, les faces d'appui ont été surfacées à la main avec bouchardes, ciseaux et meules. Les petites irrégularités restantes ont été comblées avec un mélange de soufre et de cendre volante appliqué à chaud. Le montage des différents constituants de l'essai a été fait comme il a été indiqué plus haut.

1.314. Conduite des essais

La procédure d'essais a été conforme à celle indiquée précédemment : il a été fait 4 cycles, les pressions ont été ici de 40, 80, 120 et 160 bars. Nous avons systématiquement effectué un cycle initial, sans palier de mesure, à une pression de 25 bars, pour favoriser la mise en place du système au début des mises en charge. En même temps que les lectures des comparateurs, la température et l'hygrométrie ont été relevées dans les galeries. La température moyenne n'a pas varié de plus de un degré et l'humidité relative a été constante à 2 ou 3% près. Nous n'avons donc fait aucune correction de lecture des comparateurs :

1.315. Exploitation des résultats.

a) - L'ensemble des résultats obtenus a été groupé en une série de tableaux (II à VII). Nous avons indiqué pour chaque essai, la nature de la face avec la direction de l'effort, les différents modules de déformation calculés avec leurs rapports, et les courbes de variation des coefficients de déformation globale C_g et élastique C en fonction de la pression.

Il ne nous a pas paru indispensable de donner les courbes effort-déformation - au demeurant très nombreuses - car les conclusions que nous tirerons de l'essai au vérin sont plus fondées sur les variations des coefficients de déformation, données ici, que sur les déformations elles-mêmes.

b) - Les modules de déformation élastique.

Le tableau ci-dessous donne pour les différentes catégories de rocher rencontrées, les moyennes arithmétiques des modules de déformation élastique calculés et leur dispersion. Le nombre de mesures disponibles pour le calcul de chaque moyenne est très réduit (2 à 3 en général) aussi nous avons abandonné, pour caractériser la dispersion, les notions habituelles de statistique et nous ne donnons que l'intervalle relatif séparant la valeur maximale M et la valeur minimale m de la moyenne.

Nature du rocher	Quartzites			Quartzites et schistes alternés			Schistes		
	Perpendiculaire aux bancs	dans les bancs	sécants aux bancs	Perpendiculaire aux bancs	dans les bancs	sécants aux bancs	Perpendiculaire aux bancs	dans les bancs	sécants aux bancs
Moyenne des modules élastiques (bars)	74.400	87.100	97.900	52.300	101.200	91.200	53.000	89.500	85.700
Moyenne générale des modules élastiques (bars)	86.400			81.500			76.100		
$\frac{M - \text{moyenne}}{\text{moyenne}}$	65%			48%			45%		
$\frac{\text{moyenne} - m}{\text{moyenne}}$	72%			65%			140%		

On peut voir que les modules des différents rochers ne sont pas très différents les uns des autres, puisque le maximum est de 86.400 bars et le minimum de 76.100 bars. On constate, ce qui est normal, que les schistes ont un module d'élasticité plus faible que celui des quartzites, les terrains mixtes ayant un module intermédiaire. Les dispersions calculées sont normales pour ce genre d'essais ; elles seront comparées dans un paragraphe suivant, à celles obtenues pour d'autres sites.

N° DE L'ESSAI	NATURE DE LA FACE	DIRECTION DE L'EFFORT	MODULE DE DEFORMATION DU PREMIER CYCLE (BAR) (PRESSION EN BAR)	MODULE DE DEFORMATION DU DERNIER CYCLE (BAR) (PRESSION EN BAR)	MODULE DE DEFORMATION ELASTIQUE E (BAR)	MODULE DE DEFORMATION GLOBALE P (BAR)	$\frac{E'}{P}$ (Cg)	Cp	COEFFICIENT DE DEFORMATION en 1/100 de mm. par bar		APRÈS INJECTION					COEFFICIENT DE DEFORMATION en 1/100 de mm. par bar	ABSORPTION EN Kg DE MATIÈRE SÈCHE PAR M DE FORAGE A 5 BARS	EFFET DE L'INJECTION		
									GLOBALE	ELASTIQUE	MODULE PREMIER CYCLE (BAR)	MODULE ELASTIQUE E' (BAR)	MODULE GLOBAL P' (BAR)	$\frac{E'}{P'}$ (Cg)	C'p			GLOBALE	ELASTIQUE	MODULE PREMIER CYCLE AVANT
MA 12 droit	alternance de quartzites et de schistes lits de 1 à 5 cm oxydés	horizontale dans les bancs	26.700 (25)	46.300 (92)	54.300 (85)	21.000 (92)	2,6	1,00			68.000 (20)	35.000 (85)	35.000 (90)	1,6	0,50		18 kg de ciment par m à 5 bars	2,55	1,01	1,66
MA 12 gauche	alternance de quartzites et de schistes 1 veine argileuse de 1 cm	horizontale dans les bancs	16.200 (25)	32.000 (92)	42.500 (85)	12.500 (92)	3,5	1,90												
MA 37/2	quartzites massives épente amont d'une faille	perpendiculaire aux bancs	26.600 (21)	67.000 (142)	45.800 (120)	42.000 (142)	1,1	0,14												
MA 37/3	quartzites massives épente amont de la faille de MA 37/2	perpendiculaire aux bancs	23.400 (33)	40.400 (160)	65.600 (120)	27.900 (160)	2,4	0,70												
MA 37/4	alternance de quartzites et de schistes durs	horizontale perpendiculaire aux lignes de niveaux des bancs	26.300 (41)	55.300 (142)	62.400 (122)	25.800 (142)	2,4	0,40			33.000 (120)	70.000 (122)	33.000 (142)	2,1	0,50		31 kg de ciment par m à 5 bars	1,25	1,12	1,16
MA 37/5	quartzites et schistes en bancs de 1 à 10 cm - faille de 5 mm à 100 m. Joint. tous les 5 à 10 cm	horizontale perpendiculaire aux lignes de niveaux des bancs	77.000 (35)	45.200 (160)	12.200 (104)	29.300 (160)	1,	0,35												

SITE DU BARRAGE DE TACHIEN
 TABLEAU RECAPITULATIF DES RESULTATS
 D'ESSAIS AUX VERINS RIVE GAUCHE
 Tableau III

N° DE L'ESSAI	NATURE DE LA FACE	DIRECTION DE L'EFFORT	MODULE DE DEFORMATION DU PREMIER CYCLE (BAR)	MODULE DE DEFORMATION DU DERNIER CYCLE (BAR)	MODULE DE DEFORMATION ELASTIQUE E (BAR)	MODULE DE DEFORMATION GLOBALE Γ (BAR)	$\frac{E}{\Gamma} (\frac{Cg}{C})$	Cp	COEFFICIENT DE DEFORMATION en 1/100 de mm. par bar	APRES INJECTION					COEFFICIENT DE DEFORMATION en 1/100 de mm. par bar	ABSORPTION EN Kg DE MATIERE SECHE PAR M DE FORAGE A 5 BARS	EFFET DE L'INJECTION		
										MODULE PREMIER CYCLE (BAR)	MODULE ELASTIQUE E' (BAR)	MODULE GLOBALE Γ' (BAR)	$\frac{E'}{\Gamma'} (\frac{Cg}{C})$	C'p			COEFFICIENT DE DEFORMATION GLOBALE ELASTIQUE	MODULE PREMIER CYCLE AVANT	$\frac{E'}{E}$
MA 6 gauche	quartzites schistes un peu plus loin	horizontale dans les bancs	128.300 (50)	68.500 (285)	110.000 (160)	61.200 (285)	1,6	0,05											
MA 25 / 1 droite	quartzites, joints irréguliers	horizontale dans les bancs	40.130 (45)	68.900 (123)	89.000 (104)	57.000 (160)	1,6	0,24											
MA 25 / 1 gauche	quartzites-schistes à proximité	horizontale dans les bancs	36.500 (45)	47.400 (123)	52.900 (104)	43.600 (160)	1,2	0,23											
MA 25 / 2 gauche	sur le plan de contact entre schistes et quartzites	horizontale dans les bancs	45.700 (46)	50.800 (160)	80.100 (104)	45.200 (160)	1,8	0,30											
MA 25 / 2 droite	schistes avec veine argileuse à 0,55m	horizontale dans les bancs	64.400 (46)	56.000 (160)	65.370 (104)	53.560 (160)	1,2	0,17											
MA 25 / 3	quartzites massives	perpendiculaire aux bancs	16.200 (20)	34.000 (160)	30.800 (120)	30.800 (160)	1,0	0,19											
MA 26 / 1	quartzites avec diaclases tous les 10 à 30 cm	perpendiculaire aux bancs	41.100 (20)	71.400 (160)	120.000 (120)	96.000 (160)	1,2	0,17		60.000 (20)	150.000 (120)	116.000 (160)	1,3	0,18		27 Kg de ciment par m à 5 bars	1,46	1,25	1,21

SITE DU BARRAGE DE TACHEN

TABLEAU RECAPITULATIF DES RESULTATS D'ESSAIS AUX VERINS RIVE GAUCHE

Tableau IV

N° DE L'ESSAI	NATURE DE LA FACE	DIRECTION DE L'EFFORT	MODULE DE DEFORMATION DU PREMIER CYCLE (BAR)	MODULE DE DEFORMATION DU DERNIER CYCLE (BAR)	MODULE DE DEFORMATION ELASTIQUE E (BAR)	MODULE DE DEFORMATION GLOBALE Γ (BAR)	$\frac{E}{\Gamma} \left(\frac{C_g}{C}\right)$	C _p	COEFFICIENT DE DEFORMATION en 1/100 de mm. par bar	
			(PRESSION EN BAR)	(PRESSION EN BAR)	(PRESSION EN BAR)	(PRESSION EN BAR)			----- GLOBALE	———— ELASTIQUE
MA 26 / 2	schiste quartzeux, joints tous les 2 à 5 cm	horizontale dans les bancs	49.300 (20)	93.900 (160)	80.300 (120)	82.800 (160)	1,0	C,05		
MA 26 / 3 droite	quartzites massives diaclases sous les 20 à 70 cm	incliné de 70° dans les bancs	42.500 (20)	53.000 (160)	51.000 (120)	48.100 (160)	1,1	C,11		
MA 26 / 3 gauche	quartzites massives diaclases tous les 20 à 70 cm	incliné plongeante à 70° dans les bancs	77.000 (20)	151.600 (160)	176.000 (120)	112.000 (160)	1,6	C,11		
MA 31 / 2 gauche	quartzites massives à surface irrégulière	horizontale perpendiculaire aux bancs	300.000 (20)	133.000 (160)	139.500 (160)	100.000	1,4	C,10		
MA 31 / 2 droite	quartzites à surface irrégulière	horizontale perpendiculaire aux bancs	246.000 (20)	102.000 (160)	113.700 (120)	74.100 (160)	1,5	C,16		
MA 31 / 1 gauche	sur l'éponte d'une couche graphitueuse de 0,30 cm dans des schistes	horizontale dans les bancs	64.800 (20)	110.000 (160)	114.800 (120)	135.000 (160)	1,4	C,08		
MA 31 / 1 droite	dans une couche graphitueuse de 0,30 cm joints tous les 5 cm dans les schistes des épontes	horizontale dans les bancs	26.200 (20)	96.500 (160)	104.000 (120)	93.900 (160)	1,9	C,03		

SITE DU BARRAGE DE TACHIEN

TABLEAU RECAPITULATIF DES RESULTATS
D'ESSAIS AUX VERINS RIVE GAUCHE

N° DE L'ESSAI	NATURE DE LA FACE	DIRECTION DE L'EFFORT	MODULE DE DEFORMATION	MODULE DE DEFORMATION	MODULE DE DEFORMATION	MODULE DE DEFORMATION	$\frac{E}{\rho} \left(\frac{Cg}{C} \right)$	Cp	COEFFICIENT DE DEFORMATION	
			DU PREMIER CYCLE (BAR)	DU DERNIER CYCLE (BAR)	ELASTIQUE E (BAR)	GLOBALE ρ (BAR)			en 1/100 de mm par bar	GLOBALE
			(PRESSION EN BAR)	(PRESSION EN BAR)	(PRESSION EN BAR)	(PRESSION EN BAR)			ELASTIQUE	
MA 20	quartzites schisteuses avec diaclases ouvertes	perpendiculaire aux bancs	34.200 (20)	43.400 (160)	44.500 (120)	28.700 (160)	1,6	0,50	0,30	
MA 28 / 1	quartzites massives la face s'appuie sur une diaclase plane	oblique dans le plan des bancs (20°)	88.000 (20)	63.200 (160)	57.800 (120)	48.300 (160)	1,2	0,19	0,50	
MA 28 / 2	quartzites et schistes en bancs de 5 à 20 cm	oblique par rapport aux bancs (40°)	205.300 (20)	104.900 (160)	123.200 (120)	77.000 (160)	1,6	0,16	0,50	
MA 33	quartzites schisteuses diaclasées	oblique par rapport aux bancs (40°)	58.700 (20)	114.600 (160)	90.000 (120)	110.700 (160)	0,9	0,02	0,50	
MA 18 / 1	quartzites et schistes en lits de 5 cm très compacte	horizontale dans les bancs	102.700 (20)	100.500 (160)	107.100 (120)	70.900 (160)	1,5	0,19	0,50	
MA 18 / 2 droite	quartzites très jointées (3cm) avec petites fractures sécantes	horizontale dans les bancs	140.000 (40)	93.300 (160)	120.000 (120)	67.900 (160)	1,8	0,08	0,50	
MA 18 / 2 gauche	quartzites jointées irrégulièrement	horizontale dans les bancs	154.000 (40)	100.500 (160)	123.000 (120)	67.500 (160)	1,8	0,22	0,50	

SITE DU BARRAGE DE TACHIEN

TABLEAU RECAPITULATIF DES RESULTATS
D'ESSAIS AUX VERINS RIVE DROITE

N° DE L'ESSAI	NATURE DE LA FACE	DIRECTION DE L'EFFORT	MODULE DE DEFORMATION DU PREMIER CYCLE (BAR)	MODULE DE DEFORMATION DU DERNIER CYCLE (BAR)	MODULE DE DEFORMATION ELASTIQUE E (BAR)	MODULE DE DEFORMATION GLOBALE Γ (BAR)	$\frac{E}{\Gamma} \left(\frac{Cg}{C} \right)$	Cp	COEFFICIENT DE DEFORMATION en 1/100 de mm. par bar - - - - - GLOBALE ———— ELASTIQUE
			(PRESSION EN BAR)	(PRESSION EN BAR)	(PRESSION EN BAR)	(PRESSION EN BAR)			
MA 27 / 1 gauche	quartzites avec un petit banc schisteux de 2cm filons de quartz	oblique par rapport aux bancs (45°)	22.800 (20)	39.100 (150)	48.000 (120)	25.400 (160)	I,9	C,63	
MA 27 / 1 droite	quartzites très jointées avec petits bancs schisteux de 1 à 2cm	oblique par rapport aux bancs (45°)	--	52.560 (150)	86.900 (120)	41.500 (160)	2,1	C,31	
MA 27 / 2 droite	quartzites en bancs de 5 à 10 cm veine graphiteuse à 1 m sous la face	perpendiculaire aux bancs	51.300 (20)	73.300 (160)	70.000 (120)	58.600 (160)	I,2	C,II	
MA 27 / 2 gauche	quartzites massives ou petits bancs	perpendiculaire aux bancs	49.300 (20)	74.100 (160)	74.700 (120)	58.700 (160)	I,3	C,19	
MA 27 / 3	quartzites massives	perpendiculaire aux bancs	77.000 (20)	94.800 (160)	90.000 (120)	77.800 (160)	I,2	C,II	
MA 34 gauche	quartzites et schistes alternés en bancs de 10 cm très diaclasés	oblique par rapport aux bancs (50°)	--	--	77.000 (120)	79.500 (160)	I,10	C,10	
MA 34 droite	quartzites et schistes alternés en bancs de 10 cm très diaclasés	oblique par rapport aux bancs (50°)	--	--	130.000 (120)	149.300 (160)	0,9	C	

SITE DU BARRAGE DE TACHIEN

TABLEAU RECAPITULATIF DES RESULTATS
D'ESSAIS AUX VERINS RIVE DROITE

N° DE L'ESSAI	NATURE DE LA FACE	DIRECTION DE L'EFFORT	MODULE DE DEFORMATION DU PREMIER CYCLE (BAR)	MODULE DE DEFORMATION DU DERNIER CYCLE (BAR)	MODULE DE DEFORMATION ELASTIQUE E (BAR)	MODULE DE DEFORMATION GLOBALE Γ (BAR)	$\frac{E}{\Gamma} \left(\frac{Cg}{C} \right)$	Cp	COEFFICIENT DE DEFORMATION en 1/100 de mm. par bar
			(PRESSION EN BAR)	(PRESSION EN BAR)	(PRESSION EN BAR)	(PRESSION EN BAR)			
MA 17	schistes quartzeux schiste tendre à 1,00m	horizontale à 30° des bancs	51.300 (20)	77.000 (160)	92.400 (120)	52.430 (160)	1,8	0,25	
MA 36 droite	Schistes durs bancs de 2 à 5 cm massifs	horizontale à 30° des bancs	26.800 (20)	114.600 (160)	66.000 (120)	74.700 (160)	0,9	--	
MA 36 gauche	Schistes et quartzites en bancs de 5 à 20 cm assez jointés	horizontale à 30° des bancs	--	--	134.400 (120)	85.700 (160)	1,6	C, I4	

SITE DU BARRAGE DE TACHIEN

TABLEAU RECAPITULATIF DES RESULTATS
D'ESSAIS AUX VERINS RIVE DROITE

c) - Les modules de déformation globale.

Nous n'avons pas calculé les moyennes des modules de déformation globale, mais pour chacun des essais, nous avons calculé le rapport :

$$\frac{\text{Module de déformation élastique}}{\text{Module de déformation globale}} = \frac{E}{\Gamma}$$

C'est ce rapport, qui dépend de la fracturation du site, que nous étudierons comparativement à d'autres dans un paragraphe suivant.

Nous avons fait une tentative de représentation des variations des différents modules de déformation en fonction de l'altitude des essais. Le graphique de la figure 95 montre, comme il est normal de le penser, des modules de déformation plus importants dans les niveaux bas que dans les niveaux hauts ; on ne distingue pas, en fonction de l'altitude, de grandes différences entre les rapports des modules de déformation globale et élastique. Or, en général, dans une gorge aux pentes raides, l'importance du desserage des joints augmente au fur et à mesure que l'on s'élève ; il en résulte un accroissement du rapport $\frac{E}{\Gamma}$.

A Ta Chien, il semble que le desserage à petite échelle, (celle de l'essai), soit à peu près constant, sauf au niveau 1400. Il ne faudrait pas en conclure que le desserage total est constant, car l'essai au vérin, intéressant un petit volume, ne rend pas du tout compte du phénomène, important ici, de la poussée au vide qui mobilise des masses d'un volume bien supérieur à celles mises en oeuvre par le vérin. Il faudrait passer à un style d'essais différent (sismique par exemple) pour déceler ce phénomène. Néanmoins, il est intéressant d'obtenir du desserage des petits joints une estimation, car c'est de lui que dépendent la validité et l'importance du traitement de peau ou de collage béton-rocher.

d) - Variations des coefficients de déformation en fonction de la pression.

Les courbes de variations sont construites par points (4 ou 5). Pour chaque intervalle de pression, on porte la valeur du coefficient (exprimé au $\frac{1}{100}$ mm/bar) et la pression maximum de l'intervalle considéré.

Ces courbes nous ont permis de déterminer le seuil au-delà duquel les déformations sont plus régulières et où la signification du module d'élasticité prenait une certaine valeur. Nous verrons, plus loin, lors de la comparaison de dix sites entre eux, l'aspect global de toutes ces courbes.

e) - Essais de déformation à pression constante.

On appelle fluage la déformation, en fonction du temps, qui se produit lorsqu'une charge est maintenue constante. On appelle de même, recouvrance la déformation qui se produit une fois la charge disparue. On sait que la déformation totale enregistrée est différente si la charge est appliquée rapidement ou suffisamment lentement pour que l'équilibre soit, à chaque instant, réalisé.

Notre but était d'abord de savoir rapidement s'il y avait ou non danger de déformation différée avec le temps pour des charges de l'ordre de grandeur de celles exercées par le barrage, aussi nous avons effectué après les cycles à pressions croissantes, des essais de charge à pression constante avec une montée rapide à la pression requise. Les essais ont duré 5 jours.

Les graphiques de la figure 96 montrent les déformations obtenues en fonction du temps pour des pressions de 65 à 100 bars. On peut voir que systématiquement, au bout de deux jours, les courbes ont une très nette tendance asymptotique, les valeurs maximales des déformations étant de 25 microns pour les zones quartzitiques à une pression de 100 bars. La valeur maximale obtenue lors d'un essai spécial sur un schiste graphiteux, a été de 55 microns à 65 bars. Comparées à d'autres essais de ce genre, ces valeurs sont faibles. Des essais plus élaborés n'étaient alors plus nécessaires.

f) - Comparaison des essais faits avant et après injection.

Dans trois cas, après avoir fait les cycles d'essais normaux, le rocher a été injecté à une pression de 5 bars avec un coulis d'eau et de ciment à 1/1.

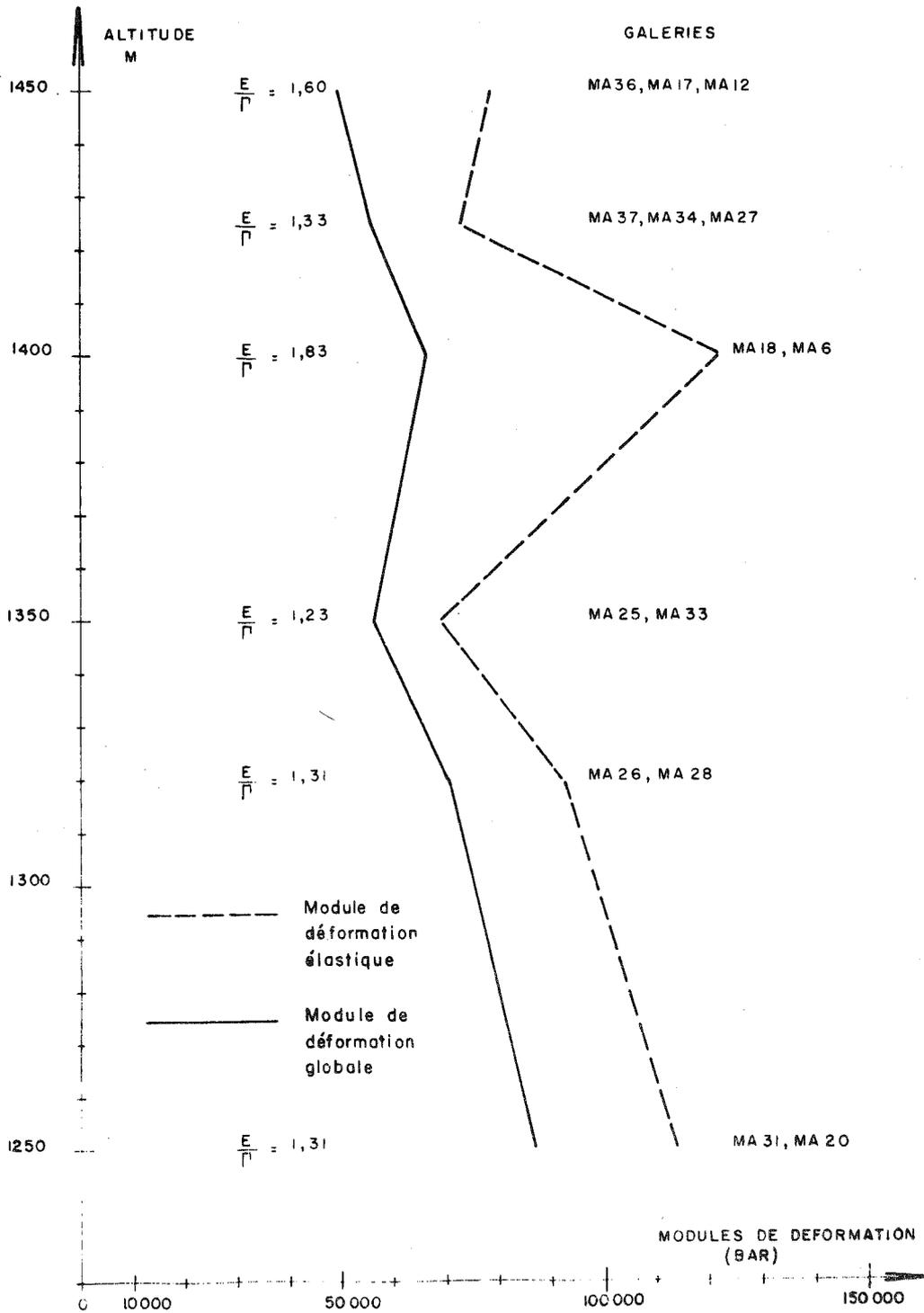
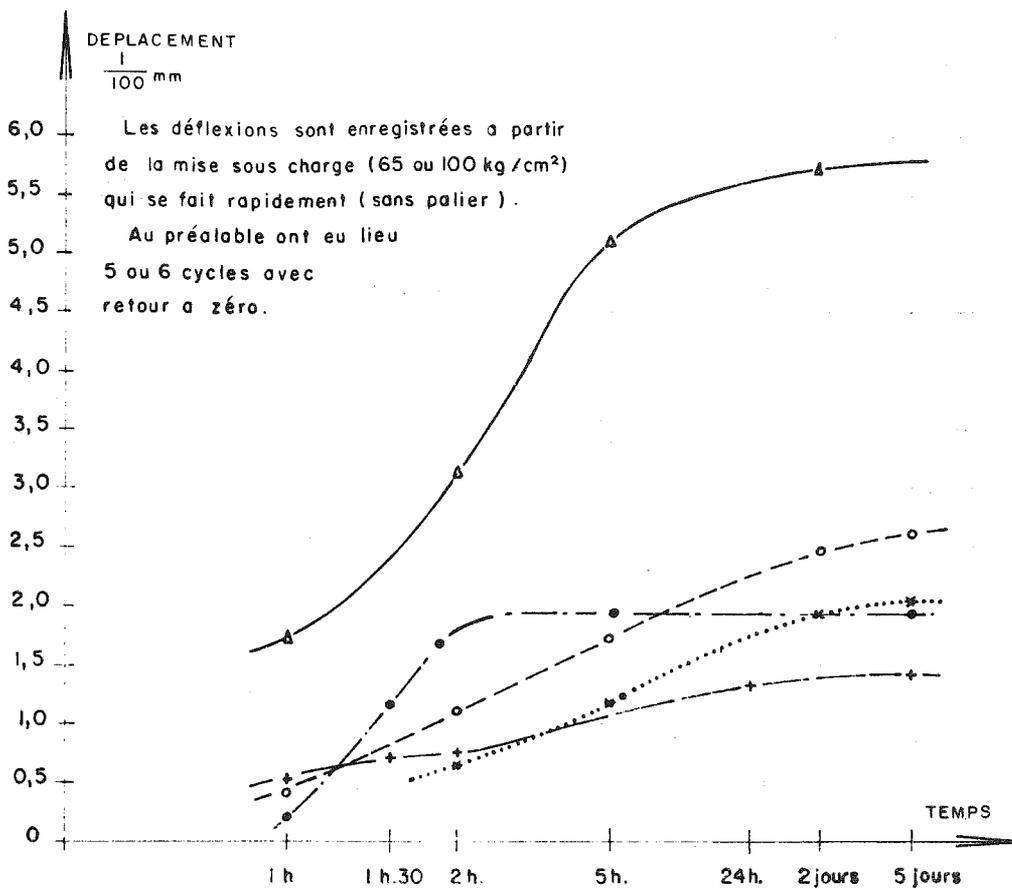


fig 9 5
 SITE DU BARRAGE DE TACHIEN
 REPARTITION DES MODULES DE DEFORMATION
 EN FONCTION DE L'ALTITUDE



LEGENDE

- SCHISTES TRES QUARTZEUX (65 BARS)
- ⊕ QUARTZITES GRAPHITEUSES (100 BARS)
- SCHISTES (100 BARS)
- △ SCHISTES GRAPHITEUX (65 BARS)
- * QUARTZITES (100 BARS)

Teneurs en eau faibles
 (galeries sèches)

fig 96

SITE DU BARRAGE DE TACHIEN
 MESURE DE DEFORMATIONS A PRESSION CONSTANTE

Les absorptions ont été de 18 à 30 kg de ciment sec par mètre de forage. Après consolidation pendant un mois, les mêmes cycles d'essais ont été faits sur la même face. Les résultats (tableaux III et IV) montrent que les modules de déformation élastique ne sont pas très sensibles à l'injection, puisque les rapports de ces modules, avant et après, varient seulement de 1 à 1,25 ; les modules de déformations globales sont un petit peu plus influencés, ils varient de 1,16 à 1,66 ; il semble que ce soient les premiers cycles qui soient les plus influencés par l'injection puisque les rapports des modules de déformation calculés varient de 1,25 à 2,55. On constate que les courbes de variations des coefficients de déformation sont beaucoup plus aplaties, ce qui confirme l'intérêt de ces courbes pour l'étude de l'influence des petits joints.

1.32. Le site du barrage de Hendrik Verwoerd

1.321.

Le site du barrage a été décrit au chapitre A.1.2. La campagne d'essais au vérin a été menée à bien au cours de l'année 1964, sous notre direction.

1.322. Emplacement des essais.

Les essais ont été effectués avec des plateaux, soit de diamètre 45 cm, soit de diamètre 60 cm.

Dans le premier cas, les directions ont été choisies soit verticalement, soit horizontalement ; le nombre d'essais est important.

Dans le deuxième cas, le nombre d'essais est réduit ; les directions sont choisies parallèles à la direction de poussée du barrage au niveau d'essai donné. Le tableau ci-dessous donne la répartition et les niveaux de tous les essais.

Rive gauche			Rive droite		
Galerie	Niveau (pieds)	Nombre de faces	Galerie	Niveau (pieds)	Nombre de faces
RA 3	3870	5	RA 1	3945	11
RA 4	4000	2			11
		7			
		soit 18 faces essayées			

1.323. Préparation des essais

Toutes les faces ont été meulées de façon à obtenir une surface plane et polie sur laquelle a été directement appliqué le plateau métallique. La disposition des principaux éléments a été indiquée dans les figures 91, 92 et 93.

1.324. Conduite des essais.

Pour chaque essai, il a été exécuté 4 cycles à des pressions maximales de 35 - 70 - 105 et 140 bars, puis deux essais à pression réduite, 105 bars, pour avoir les caractéristiques élastiques du rocher. Pour favoriser la mise en place du dispositif avant la mise en charge progressive, nous avons effectué un premier cycle à 20 bars sans points de mesures intermédiaires.

Les températures et hygrométries ont été relevées dans les galeries. Les variations de température n'ont pas excédé 2° et les variations d'humidité ont été voisines de 3% seulement.

Nous n'avons donc prévu aucune correction dans les lectures des comparateurs.

SITE DU BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD

TABLEAUX RECAPITULATIF DES ESSAIS AUX VERINS

N° DE L'ESSAI	NATURE DE LA FACE	DIRECTION DE L'EFFORT	MODULE DE DEFORMATION DU DERNIER CYCLE (BAR)	MODULE DE DEFORMATION ELASTIQUE E (BAR)	MODULE DE DEFORMATION GLOBALE \bar{E} (BAR)	$E \left(\frac{Cg}{C} \right)$	Cp	COEFFICIENT DE DEFORMATION en 1/100 de mm. par bar GLOBALE ELASTIQUE
RAI / 2 gauche	dolérite avec petites diaclases irrégulière très fermées	horizontale	200.000 (PRESSION 3x BARS)	193.000 (PRESSION 107 BARS)	50.000 (PRESSION 143 BARS)	3,9	0	
RAI / 2 droite	dolérite massive, plateau appliqué sur une diaclase	horizontale	320.000 (PRESSION 3x BARS)	243.000 (PRESSION 107 BARS)	50.000 (PRESSION 143 BARS)	4,7	0	
RAI / 3	dolérite massive, finement diaclasée, très compacte	verticale	60.000 (PRESSION 3x BARS)	243.000 (PRESSION 107 BARS)	54.000 (PRESSION 143 BARS)	4,3	0,16	
RAI / 8	dolérite massive	horizontale	59.000 (PRESSION 3x BARS)	321.000 (PRESSION 107 BARS)	79.000 (PRESSION 143 BARS)	4,0	0,12	
RAI / 9	argilite massive sans joint, relativement cuite	horizontale	31.000 (PRESSION 3x BARS)	157.000 (PRESSION 107 BARS)	51.000 (PRESSION 143 BARS)	3,1	0,19	
RAI / 10	argilite avec petites diaclases et veines de calcite	horizontale	30.000 (PRESSION 3x BARS)	69.000 (PRESSION 107 BARS)	37.000 (PRESSION 143 BARS)	1,9	0,27	

Tableau IX

N° DE L'ESSAI	NATURE DE LA FACE	DIRECTION DE L'EFFORT	MODULE DE DEFORMATION DU PREMIER CYCLE (BAR)	MODULE DE DEFORMATION ELASTIQUE (BAR)	MODULE DE DEFORMATION GLOBALE (BAR)	$\frac{E}{\Gamma} \left(\frac{Cg}{C} \right)$	Cp	COEFFICIENT DE DEFORMATION en $\frac{1}{100}$ de mm. par bar
			(PRESSION 35 BARS)	(PRESSION 107 BARS)	(PRESSION 143 BARS)			
RA1/12	argilite très diaclasee avec nodules carbonatés de quelques centimètres	verticale	18.000	130.000	132.000	2,8	0,32	
RA1/13	argilite massive	horizontale	48.000	93.000	79.000	1,2	0,32	
RA1/14	argilite irrégulièrement diaclasee nodules carbonatés de quelques centimètres	verticale	42.000	130.000	156.000	1,9	0,14	
RA1/15	dolérite massive	verticale	60.000	280.000	321.000	4,9	0,21	
RA1/16	dolérite finement diaclasee très massive	horizontale	62.000	240.000	243.000	2,6	0,12	
RA3/5	argilite très culte, surface irrégulière, face à 3m du contact, avec les dolérites	horizontale	48.000	185.000	186.000	2,4	0,19	

Tableau X

N° DE L'ESSAI	NATURE DE LA FACE	DIRECTION DE L'EFFORT	MODULE DE DEFORMATION DU PREMIER CYCLE (BAR)	MODULE DE DEFORMATION DU DERNIER CYCLE (BAR)	MODULE DE DEFORMATION ELASTIQUE (BAR)	MODULE DE DEFORMATION GLOBALE (BAR)	$\frac{E(C_0)}{P(C)}$	Cp	COEFFICIENT DE DEFORMATION en 1/100 de mm. par bar	
									ELASTIQUE	GLOBALE
RA 3/8	argilite massive avec joints de sédimentation bien marqués	verticale	38.000	88.000	93.000	53.600	1,7	0,07		
RA 3/9	argilite massive avec joints de sédimentation	horizontale	90.000	165.000	172.000	92.800	1,8	0,09		
RA 3/10	argilite compacte cuite	verticale	42.000	101.000	121.500	51.400	2,4	0,47		
RA 3/12	dolérite massive à surface très irrégulière	horizontale	50.000	165.000	170.200	78.600	2,2	0,09		
RA 4/1	dolérite massive	oblique 20°	120.000	(Pression 116 bars) 210.000	285.700	(Pression 116 bars) 128.500	2,2	0,14		
RA 4/4	dolérite très dia-clasée	oblique 20°	50.000	250.000	257.000	67.900	4,0	0,67		

1.325. Exploitation des résultats

a) - Les tableaux VIII - IX et X montrent, résumés, quels sont les résultats obtenus lors de ces essais. Comme pour le site du barrage de Ta Chien, nous avons indiqué la direction de poussée, les différents modules de déformation calculés et leur rapport, et les courbes de variation des coefficients de déformation qui ont servi à évaluer la validité du module élastique proposé ; l'exploitation globale de ces courbes sera faite dans un paragraphe suivant.

b) - Module de déformation élastique

Le tableau ci-après donne les valeurs moyennes et les dispersions des modules calculés. Etant donné le faible nombre de valeurs entrant dans les moyennes, nous n'avons pas pu caractériser la dispersion par les critères classiques ; nous nous sommes bornés à indiquer l'intervalle relatif séparant la valeur maximale M et minimale m de la moyenne.

Nature du rocher	Dolérite	Argilite très cuite	Argilite	
			Perpendiculaire aux bancs	Le long des bancs
Direction de l'essai	Toutes directions	Toutes directions		
Moyenne des modules de déformation élastique (bars)	264.200	142.800	121.400 moyenne générale 132.000	135.600
$\frac{\text{moyenne} - m}{\text{moyenne}}$	27%	(2. mesures seulement)	40%	
$\frac{M - \text{moyenne}}{\text{moyenne}}$	18%		27%	

Nous avons distingué : dolérite, argilite cuite au voisinage des dolérites et argilites massives. Dans les dolérites, il n'est pas possible de faire ressortir de différence entre les modules suivant différentes directions, par contre ce phénomène est perceptible dans les argilites massives. Les dispersions sont faibles tant pour les dolérites que pour les argilites.

c) - Module de déformation globale

Cet aspect des déformations sera envisagé dans la comparaison de 10 sites entre eux. On peut toutefois observer que ces modules de déformation globale sont ici plus faibles relativement aux modules élastiques que pour le site du barrage de Ta Chien. En effet, on trouve :

pour le site du barrage de Hendrik Verwoerd :

$$\frac{\text{Modules élastiques}}{\text{Modules globaux}} = 1,2 \text{ à } 4,9$$

moyenne : 2,9

et pour le site du barrage de Ta Chien :

$$\frac{\text{Modules élastiques}}{\text{Modules globaux}} = 0,9 \text{ à } 3,5$$

moyenne : 1,5

d) - Essais de déformation à contrainte constante.

Comme pour le site précédent, nous avons fait des essais de déformation à contrainte constante avec application rapide de la charge désirée pour savoir, dans le plus court délai possible, s'il y avait lieu d'étudier plus avant ce phénomène.

Sur la surface de diamètre 60 cm de l'essai n°1 dans la galerie RA 4, on a mesuré la déformation du rocher sous une contrainte constante de 107 et 130 bars. Le graphique de la figure 97 montre que les déformations ont cessé au bout de 10 minutes pour la contrainte de 107 bars et au bout de 30 minutes pour la contrainte de 130 bars ; l'enfoncement du plateau à partir de l'établissement de cette dernière charge a été de 50 microns, valeur très faible qui nous a amené à ne pas envisager d'essais plus élaborés ou plus longs.

1.4. Comparaison des essais au vérin exécutés sur quelques sites de barrages.

1.41.

Pour mieux exploiter les résultats des essais au vérin que nous avons obtenus sur les sites des barrages de Ta Chien et Hendrik Verwoerd, nous avons analysé des résultats d'essais faits par les soins d'E.D.F., dans des conditions semblables, sur les sites des barrages suivants dont on trouvera une description géologique sommaire au chapitre A.III.

LAOUZAS (voûte ; 50 m)	10 essais
BESSERVE (enrochement ; 70 m)	16 essais
MONTEYNARD (voûte ; 150 m)	20 essais
GREOUX (enrochement ; 67 m)	8 essais
MALPASSET (voûte détruite ; 67 m)	19 essais
GITTAZ (voûte épaisse ; 66 m)	20 essais
ST-CASSIEN (enrochement ; 66 m)	10 essais

Redisons que nos campagnes intéressaient :

TA CHIEN (voûte ; 200 m)	36 essais
HENDRIK VERWOERD (voûte ; 90 m)	18 essais
auxquels il faut ajouter les résultats effectués par nous sur un autre site de même type :	
VAN DER KLOOF (voûte ; 105 m)	15 essais

Dans tous les cas, les essais ont été réalisés suivant des techniques similaires. Les faces d'essais sont situées dans des galeries de reconnaissance creusées dans les flancs de la gorge à l'emplacement même du barrage. En général, ces essais ont intéressé le rocher sain, situé au-delà de la zone d'altération voisine de la surface topographique.

1.42. Résultats

1.421.

Nous avons, dans les tableaux XI et XII, utilisé un certain nombre de critères : modules de déformation et coefficients de déformation dont les définitions ont été précisées au paragraphe 1.24.

Bien que sa définition prête à discussion, nous avons étudié la valeur moyenne du module de déformation élastique afin de conserver un chiffre caractérisant le rocher d'une manière classique. Les chiffres cités sont extraits des rapports d'essais ; il s'agit le plus souvent de modules sécants. Nous ne pensons pas qu'ils puissent être comparables à l'échelle du massif, aussi, n'utiliserons-nous ces valeurs que dans les interprétations physiques des déformations enregistrées et, pour un site donné, dans une étude des anisotropies éventuelles où nous recouperons parfois les résultats publiés par J.L. SERAFIM (1964).

1.422. Comparaisons

Les tableaux XI et XII donnent les valeurs des paramètres utilisés pour les comparaisons des sites entre eux : E , Γ , C et Cg définis plus haut. La figure 98 résume schématiquement quelques résultats.

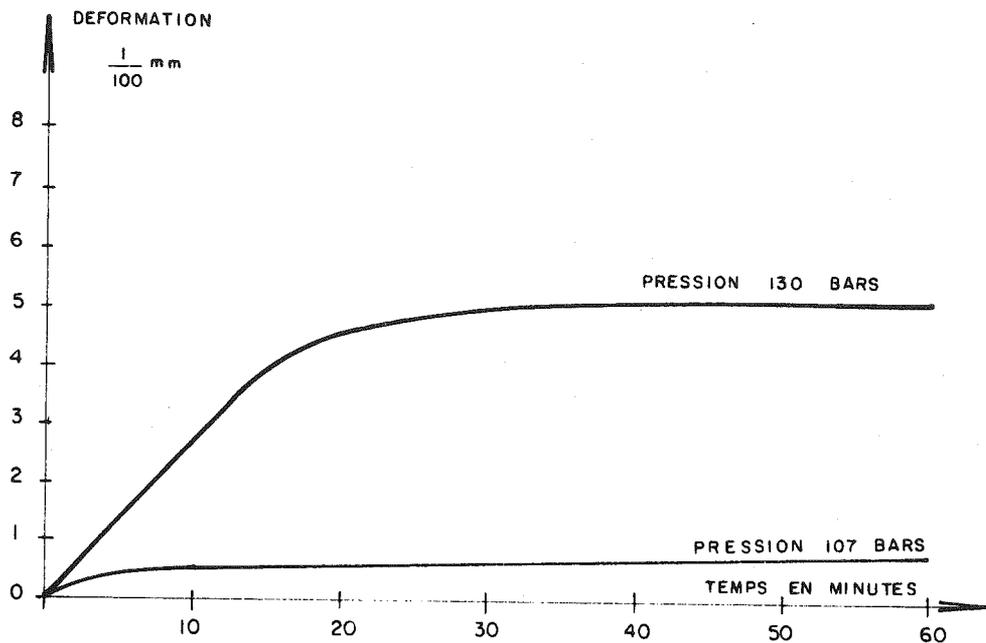


fig 97

BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD
 ———
 ESSAIS AUX VERINS
 ———
 GALERIE RA4 ESSAI N°1
 MESURE DE DEFORMATION A PRESSION CONSTANTE

a) Variations de $\frac{E}{\Gamma}$ (ou $\frac{C_g}{C}$) et de C_p .

La valeur $\frac{E}{\Gamma}$ traduit l'influence des discontinuités mobilisées par l'essai.

En effet, sur un site massif, $\frac{E}{\Gamma}$ serait voisin de un, par contre, plus les discontinuités et en particulier les joints sont ouverts, plus $\frac{E}{\Gamma}$ augmente.

Ces remarques sont valables avant la rupture, ce qui est le cas pour tous les essais analysés. Si $\frac{E}{\Gamma}$ est constant pour tous les essais, cela doit signifier que le volume de roche prospecté est homogène dans sa fracturation.

La valeur C_p traduit l'importance des phénomènes non élastiques. Un rocher parfaitement élastique, avant rupture, aura un $C_p = 0$; plus les joints seront remplis de matériaux plastiques ou plus le rocher sera finement divisé, plus C_p sera grand.

Nous allons donc examiner les différents cas suivants :

$\frac{E}{\Gamma}$ constant et C_p variable

$\frac{E}{\Gamma}$ variable et C_p constant

$\frac{E}{\Gamma}$ et C_p variables

- $\frac{E}{\Gamma}$ constant et C_p variable

Le site est homogène dans sa fracturation, mais dans quelques zones, on peut avoir des glissements de joints ou des tassements de remplissages mous. La valeur du module E peut donner une indication sur ces phénomènes non élastiques : à un faible module devra correspondre un tassement de remplissage mou, à un fort module plutôt des ajustement de joints secs.

Site de Ta Chien : $\frac{E}{\Gamma}$ faibles (voisins de 1).

Les joints sont fermés à l'échelle du vérin.

- C_p assez variables, mais faibles ($\leq \frac{1}{100}$ mm par bar) et module E assez élevé. Il doit

se produire un glissement local des joints pendant la mise en pression.

Site de Hendrik Verwoerd (dolérites)

$\frac{E}{\Gamma}$ moyens (environ 5) et C_p variables mais faibles ($\leq \frac{1}{100}$ mm par bar). L'ouverture des joints est plus accentuée que dans le cas précédent, mais les valeurs très élevées de E montrent qu'il s'agit de joints secs.

Site de Malpasset (gneiss)

$\frac{E}{\Gamma}$ faibles (1 à 4) mais C_p très variables et très grands (jusqu'à 1/10 mm par bar). Les joints sont fermés et la part élastique du déplacement, très faible. Les petites valeurs du module prouvent que c'est à petite échelle (inférieure à celle de l'essai) que doit intervenir un phénomène non élastique.

Site de Hendrik Verwoerd (argilites) et site de Van der Kloof (dolérites)

Les deux roches, pourtant très dissemblables, montrent les mêmes réactions : $\frac{E}{\Gamma}$ constants et petits (1 à 3) et C_p petits et variables (0,08 à 0,6 x 1/100 mm par bar). Les joints sont fermés et le rocher élastique ; la différence de nature de roche se retrouve dans les modules E.

- $\frac{E}{\Gamma}$ très variable et C_p pratiquement constant et faible

$\frac{E}{\Gamma}$ Il s'agit de roches où une grande part des déformations semble élastique, mais où l'influence des discontinuités est prédominante.

Site de la Gittaz

$\frac{E}{P}$ atteint 30 ; on se trouve devant une roche dont la matrice est excellente (modules E élevés), mais dont les nombreux joints sont ouverts et se rouvrent à chaque déchargement.

Site de Monteynard

$\frac{E}{P}$ atteint 50 ; le phénomène semble identique au précédent.

- Autres cas

Site de Laouzas

Les faibles valeurs de C_p ($\ll 0,5 \times 1/100$ mm par bar) montrent une roche de déformation en grande partie élastique ; les moyennes valeurs de $\frac{E}{P}$ sont dues au léger desserrage des joints.

Site de Besserve

Les points sont bien groupés ; le site est homogène dans son ensemble. Les C_p relativement grands et des modules E très moyens montrent que la part non élastique des déformations est importante et due sans doute à un film plastique dans les joints. Ceux-ci sont, de plus, assez ouverts puisque $\frac{E}{P}$ atteint 10.

Site de Gréoux

Les joints ne semblent pas, à part deux cas très singuliers, être particulièrement ouverts ; la roche paraît élastique : C_p ne dépassant pas $1/100$ mm par bar, sauf dans quelques zones où se produisent des glissements de joints secs (E élevé).

Site de St-Cassien

Les C_p sont groupés autour de la valeur un ; les phénomènes non élastiques dans cette roche altérée sont non négligeables ; d'autre part, les valeurs de $\frac{E}{P}$ atteignent 15 : les joints sont ouverts, parfois remplis de matériaux plastiques (module E assez faible).

Nous avons rassemblé tous ces renseignements sur un seul graphique (figure 98) afin d'obtenir un classement de sites par la méthode des essais au vérin.

On obtient ainsi deux zones principales A et B limitées par une ligne $C_p = 1$, obtenue en remarquant que tous les résultats des essais faits sur des sites de barrages en béton sont représentés par des points situés en-dessous de cette ligne, à l'exception de ceux de Malpasset.

- La zone A groupe les points représentant une roche pratiquement élastique, d'autant plus qu'ils sont près des $C_p = 0$.

- La zone B groupe les cas où les déformations autres que celles purement élastiques sont importantes et peuvent condamner la solutions voûte.

On peut également déterminer trois autres zones qui donnent des indications exploitables pour la détermination du traitement de peau du rocher en fond de fouille ; ces zones sont liées à l'ouverture de joints.

- La zone 1 où $\frac{E}{P} < 2$ ou 3 indique un rocher compact.

- La zone 2 où $\frac{E}{P} < 10$ indique un rocher moyennement ouvert.

- Au-delà la zone 3, un rocher de plus en plus desserré.

Ces indications sont valables pour un volume de roche de quelques mètres cubes ; on voit donc que leur représentativité par rapport au massif est liée à la maille des joints, l'étude des écartements devient indispensable pour situer les phénomènes indiqués dans le cadre général de la fondation.

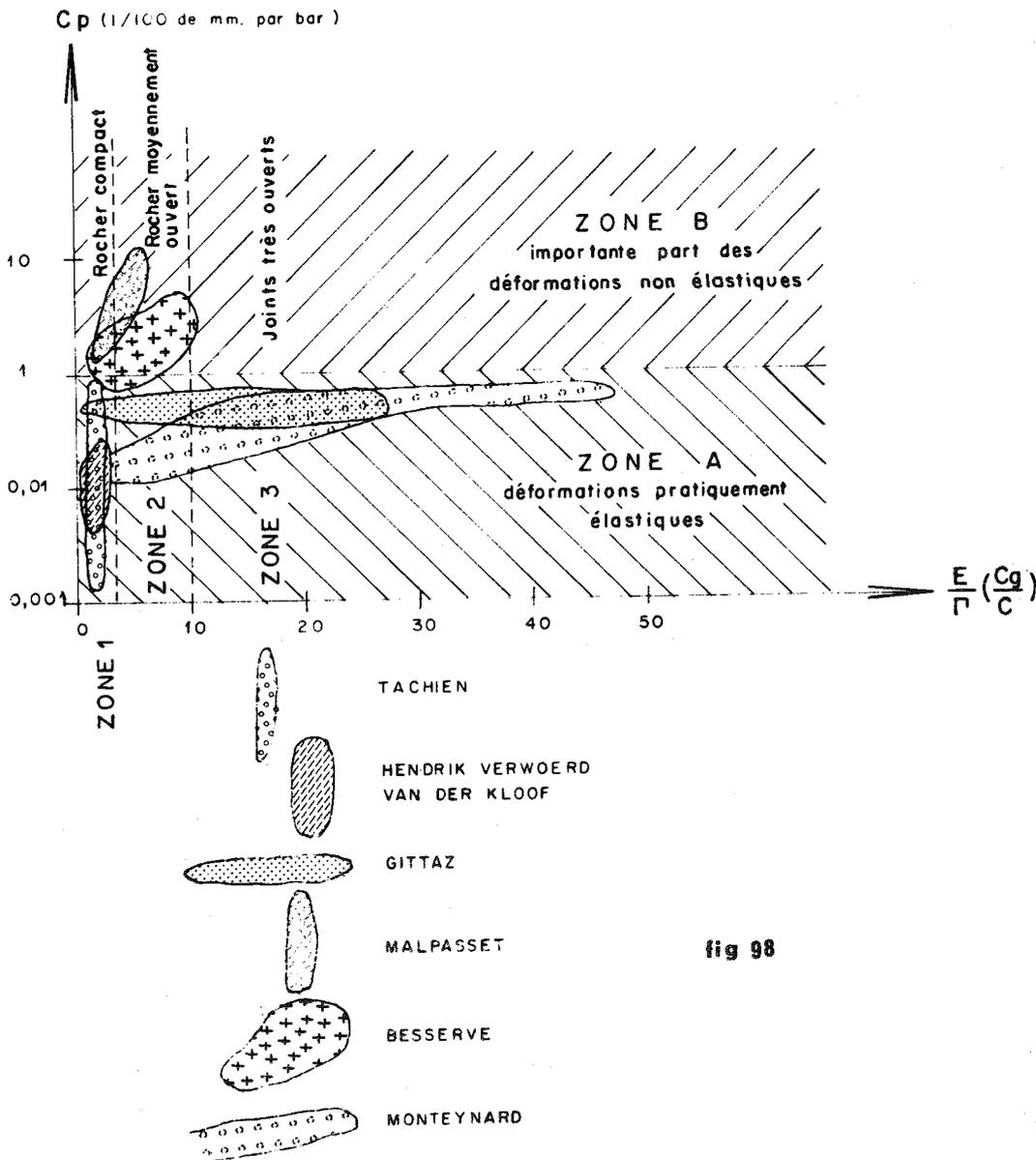


fig 98

TENTATIVE DE CLASSEMENT DES ROCHES EN PLACE
 PAR L'EXPLOITATION DE RESULTATS D'ESSAIS AUX VERINS
 (DOMAINE DES DEFORMATIONS AVANT RUPTURE)

SITE	MATURE DE LA ROCHE	Cp EN FONCTION DE $\frac{E}{l} (\frac{Cg}{C})$	COEFFICIENT DE DEFORMATION GLOBALE Cg	MODULES DE DEFORMATION ELASTIQUES (BAR)	ANISOTROPIE DES MODULES
LAUZAS (10 essais) E.D.F.	Granit clair et gneiss migmatite moyennement dioclase			EH : 238.500 EV : 275.000	différence relative: 13%
BESSERVE (16 essais) E.D.F.	Granit à biotite très dioclase			EH : 80.500 EH1: 67.300 EV2: 68.000	isotrope
VERWOERD (9 essais) B.S.	Dolerite très massive légèrement desserée en surface			E : 264.000	pas de distinction entre essais verticaux et horizontaux.
VERWOERD (9 essais) B.S.	Argilite dure compacte dioclase			EH : 135.500 EV : 121.500	différence relative: 11%
VAN DER KLOOF (15 essais) B.S.	Dolerite très massive			EH : 240.000 EV : 212.000	différence relative: 12%
MONTEYNARD (20 essais) E.D.F.	Calcaire marneux (pendage 45° aval). Grandes cassures verticales.			EH1: 675.000 EH2: 711.000 EV : 868.000	différence relative: 12%

Tableau XII

SITE	NATURE DE LA ROCHE	CP EN FONCTION DE $\frac{E}{T} \left(\frac{Cg}{C} \right)$ T Cp (1/100 de mm. par bar)	COEFFICIENT DE DEFORMATION GLOBALE Cg $\frac{Cg}{100}$ de mm. par bar	MODULES DE DEFORMATION ELASTIQUES (BAR)	ANISOTROPIE DES MODULES
GREOUX (13 essais) E.D.F.	Calcaires en bancs horizontaux diaclasses. Quelques failles soulignées par karstification.			$E_H : 300.000$ $E_V : 152.500$	Très forte anisotropie due aux bancs horizontaux
MALPASSET (19 essais) E.D.F.	Gneiss très cisailé, nombreuses mylonites.			$E_H : 15.600$ $E_H : 15.700$ $E_V : 8.400$	
GITAZ (20 essais) E.D.F.	Schistes cristallins. très diaclasses et desserrés en surface. Pendages verticaux			<u>Rive droite</u> $E_H : 281.000$ $E_V : 215.000$ <u>Rive gauche</u> $E_H : 415.000$ $E_V : 533.000$	
St. CASSIEN (14 essais) E.D.F.	Gneiss a deux micas très cisailés et altérés en surface. Foliation verticale			$E_H : 69.500$ $E_H : 94.000$ $E_V : 148.000$	Foliation verticale
TACHIEN (22 essais) B.S.	Quartzites diaclasses en banc a pendage 70° amont			$E_{\circ} : 78.000$ $E_{+} : 95.000$	Anisotropie due aux bancs Différence relative: 18 %
TACHIEN (15 essais) B.S.	Schistes plus ou moins quartziteux en banc a pendage 70° amont			$E_{\circ} : 52.000$ $E_{+} : 91.000$	Différence relative: 43 %

SITE	NATURE DE LA ROCHE	Cp EN FONCTION DE $\frac{E}{E_0}$ ($\frac{Cg}{Cg_0}$)	COEFFICIENT DE DEFORMATION GLOBALE Cg	MODULES DE DEFORMATION ELASTIQUES (BAR)	ANISOTROPIE DES MODULES
GRECUX (13 essais) E.D.F.	Calcaires en bancs horizontaux dioclase. Quelques failles soulignées par karstification.			EH : 300.000 EV : 152.500	Très forte anisotropie due aux bancs horizontaux
MALPASSET (19 essais) E.D.F.	Gneiss très cisaille, nombreuses mylonites.			EH ₁ : 15.600 EH ₂ : 15.700 EV : 8.400	
GITTAZ (20 essais) E.D.F.	Schistes cristallins, très dioclases et desserrés en surface. Pendages verticaux			Rive droite EH : 281.000 EV : 215.000 Rive gauche EH : 415.000 EV : 533.000	
ST. CASSIEN (14 essais) E.D.F.	Gneiss à deux micas très cisillés et altérés en surface. Foliation verticale			EH ₁ : 69.500 EH ₂ : 94.000 EV : 148.000	
TACHIEN (22 essais) S.S.	Quartzites dioclassés en banc à pendage 70° amont			E ₀ : 78.000 E+ : 95.000	Anisotropie due aux bancs Différence relative: 18%
TACHIEN (15 essais) S.S.	Schistes plus ou moins quartzeux en banc à pendage 70° amont			E ₀ : 52.000 E+ : 91.000	Différence relative: 43%

b) - Courbes de variation des coefficients Cg

Ces courbes (tableaux XI et XII) montrent pour tous les cas analysés, une tendance à la stabilisation en fin d'essai ; la plus ou moins grande pression nécessaire pour atteindre la stabilisation dépend de l'importance de la zone superficielle desserrée. Le tableau ci-après donne les pressions au-delà desquelles les variations des coefficients sont très faibles.

La Gittaz	125 bars
Hendrik Verwoerd (dolérite)	100 bars
Gréoux	100 bars
Monteynard	75 bars
Hendrik Verwoerd (argilite)	75 bars
Besserve	50 bars
Van Der Kloof	50 bars
St-Cassien	50 bars
Ta Chien (schiste)	25 bars
Malpasset	25 bars
Laouzas	25 bars
Ta Chien (quartzite)	25 bars

Au-dessus de cette pression, on peut espérer alors avoir éliminé une grande part de l'action de la zone superficielle desserrée.

Mais l'épaisseur de cette zone est intéressante à connaître, car c'est d'elle que dépend l'extension du traitement de peau de la fondation. On doit pouvoir en obtenir une idée par les pressions données dans le tableau précédent : plus la pression est grande, plus l'épaisseur de la zone desserrée risque d'être importante.

Nous sommes en bonne voie d'obtenir une corrélation expérimentale entre cette pression et des épaisseurs de zones desserrées obtenues par voie microsismique.

c) - Dispersion des coefficients Cg

Les courbes représentant les variations de Cg (tableaux XI et XII) sont parfois très dispersées.

Dans les cas de St-Cassien et de Besserve, il pourrait être utile de faire d'autres essais à pression maximale plus élevée.

Dans le cas des schistes de Ta Chien, la dispersion vient de l'hétérogénéité de la roche. Ici, encore d'autres essais seraient utiles afin de préciser les répartitions et les qualités de différents schistes.

Dans le cas de Gréoux, bien que la dispersion semble encore notable, on devrait se contenter des essais disponibles en remarquant que les courbes supérieures sont relatives aux essais verticaux et les courbes inférieures aux essais horizontaux. Il y a donc également anisotropie dans la fracturation du rocher en plus de l'anisotropie de sédimentation.

Dans le cas des autres sites, les dispersions sont faibles et on peut se contenter des résultats disponibles.

d) - Anisotropie des modules de déformation élastique.

L'anisotropie des modules est liée soit aux bancs dans le cas de terrains bien lités : argilite, calcaire, quartzite, schiste et même dans une certaine mesure quelques gneiss, soit à la structure à grande échelle quand un réseau de discontinuités est prédominant, soit encore à la structure à petite échelle dans les gneiss et granites qui mettent alors en évidence, comme l'a montré J.L. SERAFIM (1964) le desserrage vers la vallée.

1.43. - Résultats annexes

Afin de compléter les résultats que peuvent fournir les essais au vérin, nous avons exploité les campagnes faites sur quelques sites en étudiant spécialement :

- les variations des déformations au sommet de chaque cycle,
- l'intersection de la courbe enveloppe et de l'axe des contraintes.

1.431. - Variations des déformations au sommet de chaque cycle

Rappelons que J.B. WALSH (1965) a montré que, pour un échantillon comportant une discontinuité, le module de déformation élastique de la matrice rocheuse était donné par la partie descendante de la courbe contrainte - déformation alors que la partie montante fournissait le module de l'échantillon : matrice plus discontinuité.

Les essais étant similaires - mêmes contraintes, plateaux du même ordre de diamètre - nous avons comparé, au lieu des modules, les coefficients de déformation au voisinage du sommet des cycles. Ces coefficients sont calculés à partir des tangentes au sommet des courbes (figure 99).

Nous définissons : C_c coefficient pour les contraintes croissantes,
 C_d coefficient pour les contraintes décroissantes.

La figure 99 donne les résultats globaux. Pour chaque contrainte maximale de cycle, on trouvera la valeur $\frac{C_c}{C_d}$. Afin de pouvoir comparer ces chiffres, nous avons calculé, par extrapolation ou interpolation, la valeur $\frac{C_c}{C_d}$ pour une contrainte de 100 bars.

Aux phénomènes d'hystérésis près, plus les valeurs de $\frac{C_c}{C_d}$ seront voisines de un, plus le milieu sera exempt de fissure ou, plus exactement, plus les fissures qui pourraient exister seront sans effet.

La figure 100 donne l'allure des variations de C_c et C_d avec la contrainte. On constate que l'augmentation de contrainte est souvent une cause de diminution d'effet de fissure : $\frac{C_c}{C_d}$ décroît avec la pression.

Par contre, pour quelques sites, $\frac{C_c}{C_d}$ reste constant (Van Der Kloof, Gittaz) ou même augmente. Si l'on compare les valeurs de $\frac{C_c}{C_d}$ pour une contrainte de 100 bars, on peut classer l'action des discontinuités dans le massif considéré, à l'échelle de l'essai, c'est-à-dire le mètre cube.

- Action faible : Van Der Kloof.
- Action moyenne : Malpasset, Hendrik Verwoerd, Laouzas, Gittaz.
- Action forte : Monteynard, Ta Chien, Gréoux, St-Cassien et Besserve.

Bien qu'ayant les mêmes résultats, quant à ce critère $\frac{C_c}{C_d}$, Malpasset et Hendrik Verwoerd sont fondamentalement différents ; le premier est extrêmement divisé mais comporte peu de discontinuités suivies, le second est au contraire coupé par quelques joints étendus et francs. La même distinction doit être faite entre Laouzas et La Gittaz.

Nous voyons donc que l'éventuelle utilisation du critère de WALSH, dans un essai au vérin, est intéressante mais demande, afin d'éviter de graves erreurs, à être intégrée dans l'interprétation générale de l'essai.

1.432. - Intersection de la courbe des enveloppes et de l'axe des contraintes.

Au cours des premiers cycles, on constate parfois que les déformations relatives sont d'abord faibles puis augmentent ensuite. Dans ce cas (figure 101) l'enveloppe des deux ou trois premiers cycles - très souvent une droite - intersecte l'axe des contraintes à une valeur σ_0 . On peut penser que cette lecture initiale est fonction de contraintes existant dans le massif avant l'essai.

Nous avons relevé, pour différents sites étudiés, les valeurs σ_0 lues sur les graphiques contraintes-déformations et les charges h de terrain situé au-dessus de l'essai.

La figure 101 montre les résultats globaux obtenus.

La figure 102 donne, pour les cas où l'on a obtenu des valeurs de σ_0 non nulles, les relations σ_0 , h .

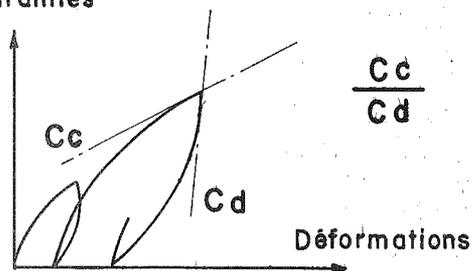
On constate :

- que le plus grand nombre d'essais donne $\sigma_0 = 0$
- qu'il n'y a pas de différence appréciable entre les essais horizontaux ou verticaux en calotte ou en radier.
- qu'il n'y a aucune proportionnalité entre σ_0 et h .

SITE	CONTRAINTES AU SOMMET DE CHAQUE CYCLE																	
	15	20	30	35	40	50	60	70	80	100	105	120	140	150	160	175	200	320
BESERVE		$\frac{3.92}{0.23}$			$\frac{2.91}{0}$		$\frac{2.24}{0}$		$\frac{2.15}{0}$	$\frac{2.10}{0}$ *								
S ⁱ CASSIEN		$\frac{1.32}{0.20}$			$\frac{1.50}{0.08}$		$\frac{2.33}{0.08}$		$\frac{1.78}{0.04}$	$\frac{1.30}{0}$ *								
LAOUZAS						$\frac{0.47}{0.04}$				$\frac{0.36}{0.03}$ *				$\frac{0.30}{0.04}$			$\frac{0.26}{0.02}$	
MONTEYNARD					$\frac{0.42}{0}$				$\frac{0.30}{0}$ *	$\frac{0.25}{0}$ *		$\frac{0.21}{0}$				$\frac{0.17}{0}$		
LA GITTAZ					$\frac{1.15}{0.09}$				$\frac{0.91}{0.07}$ *	$\frac{0.75}{0.06}$ *		$\frac{0.63}{0.04}$			$\frac{0.56}{0.05}$			$\frac{0.32}{0.04}$
GREOUX					$\frac{1.07}{0.04}$				$\frac{0.96}{0.03}$ *	$\frac{0.80}{0.01}$ *		$\frac{0.80}{0}$			$\frac{0.36}{0}$		$\frac{0.36}{0}$	
VAN DER KLOOF				$\frac{0.44}{0.12}$				$\frac{0.30}{0.08}$ *		$\frac{0.26}{0.05}$ *	$\frac{0.25}{0.04}$ *		$\frac{0.20}{0.03}$				$\frac{0.18}{0.03}$	
H. VERWOERD		ARGILITE		$\frac{0.49}{0.08}$				$\frac{0.58}{0.04}$ *		$\frac{0.40}{0.03}$ *	$\frac{0.43}{0.03}$ *		$\frac{0.33}{0.01}$					
		DOLERITE		$\frac{0.88}{0.09}$				$\frac{0.58}{0.02}$ *		$\frac{0.40}{0.03}$ *	$\frac{0.45}{0.03}$ *		$\frac{0.34}{0}$					
MALPASSET	$\frac{11.70}{0.66}$		$\frac{10.12}{0.81}$			$\frac{5.07}{0.40}$	$\frac{4.20}{0.49}$	$\frac{4.20}{0.49}$		$\frac{4.10}{0.45}$ *								
TACHIEN		$\frac{0.49}{0}$			$\frac{0.78}{0}$				$\frac{0.63}{0}$ *	$\frac{0.58}{0}$ *		$\frac{0.56}{0}$				$\frac{0.55}{0}$		

* Valeurs interpolées ou extrapolées

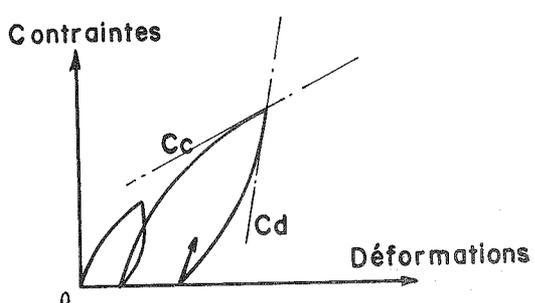
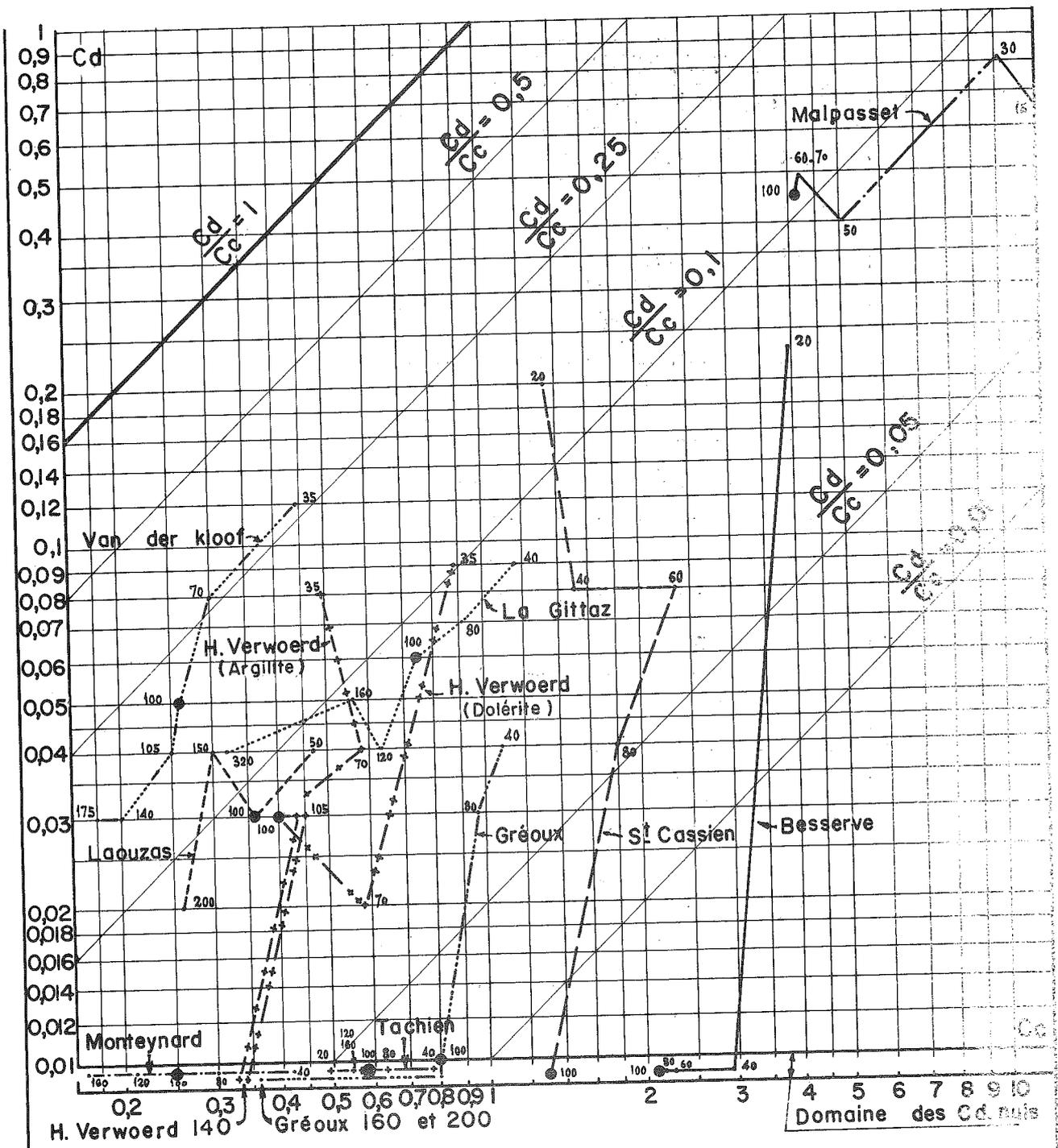
Contraintes



ESSAIS AU VERIN

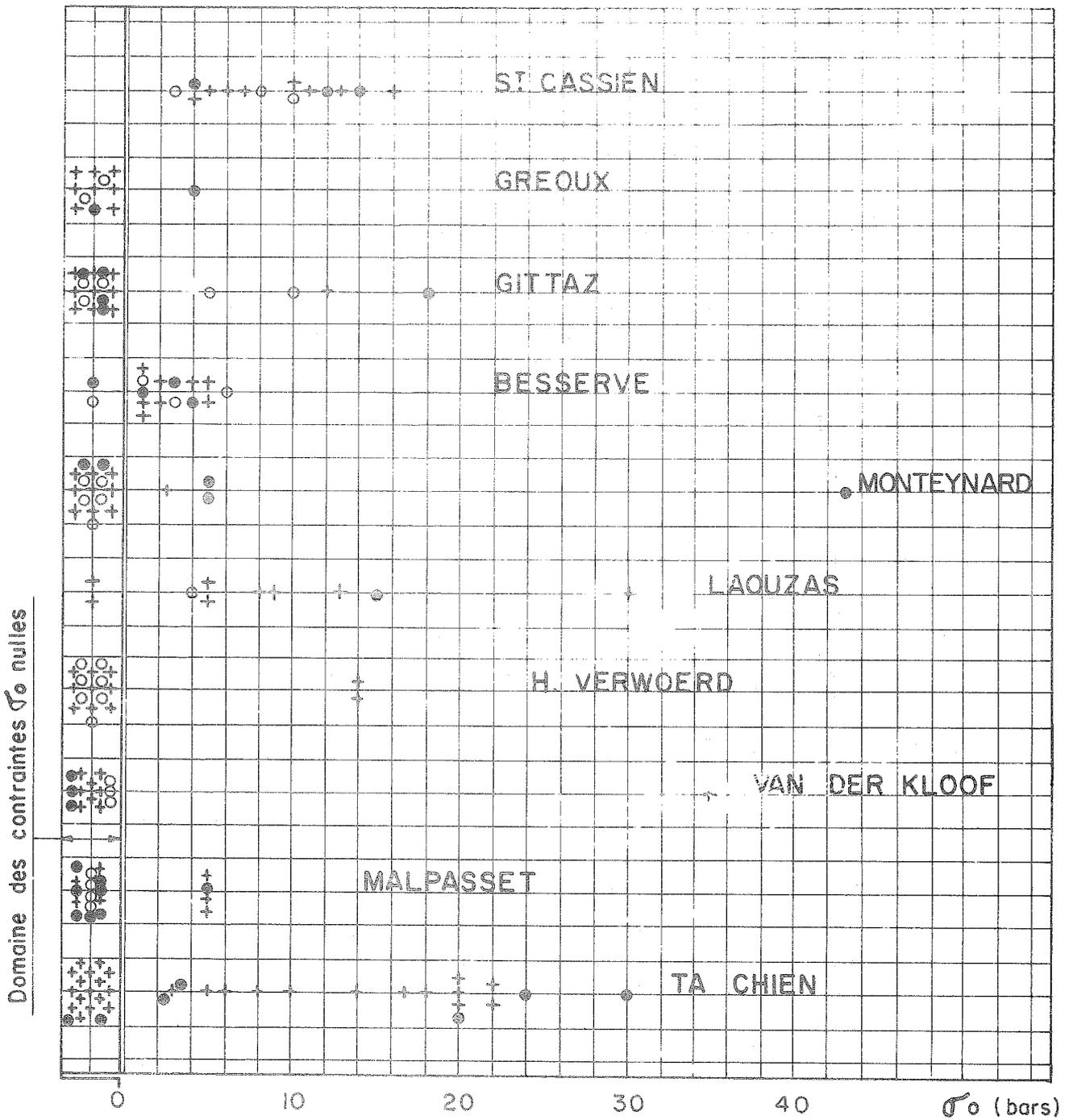
VARIATIONS DES COEFFICIENTS DE DEFORMATION AU SOMMET DES CYCLES POUR DIFFERENTES CONTRAINTES

fig 99.



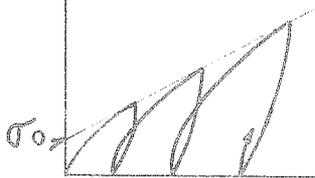
ESSAIS AU VERIN
 COEFFICIENTS DE DEFORMATION
 Cc ET Cd EN FONCTION DE LA
 CONTRAINTE

fig 100.



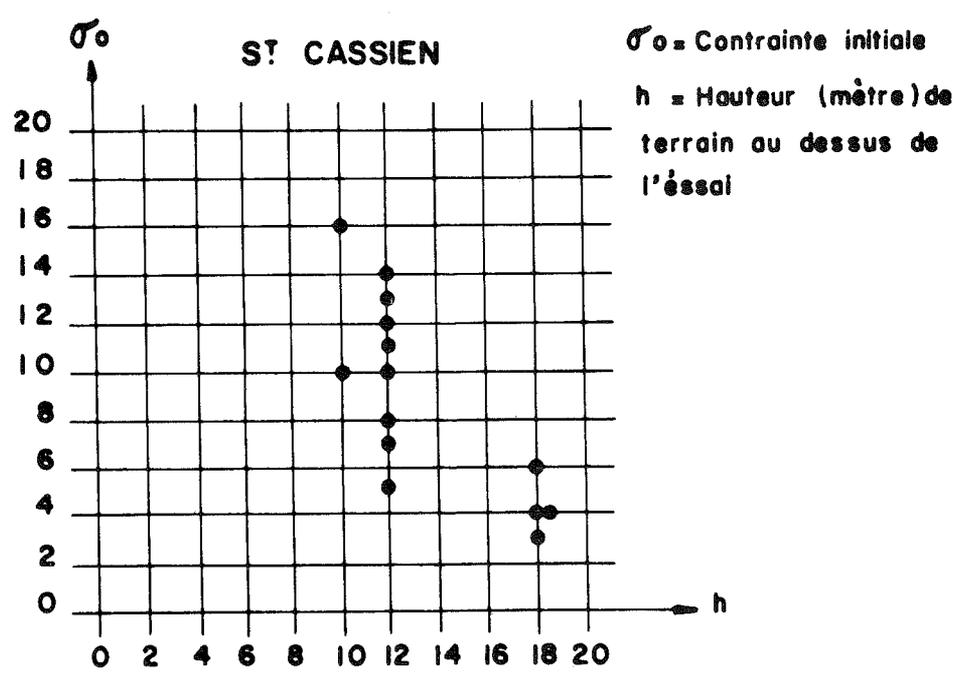
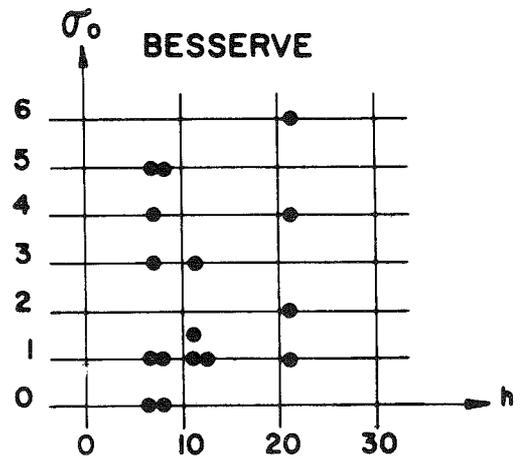
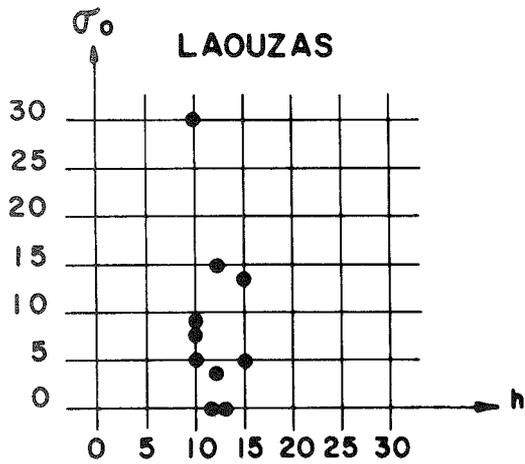
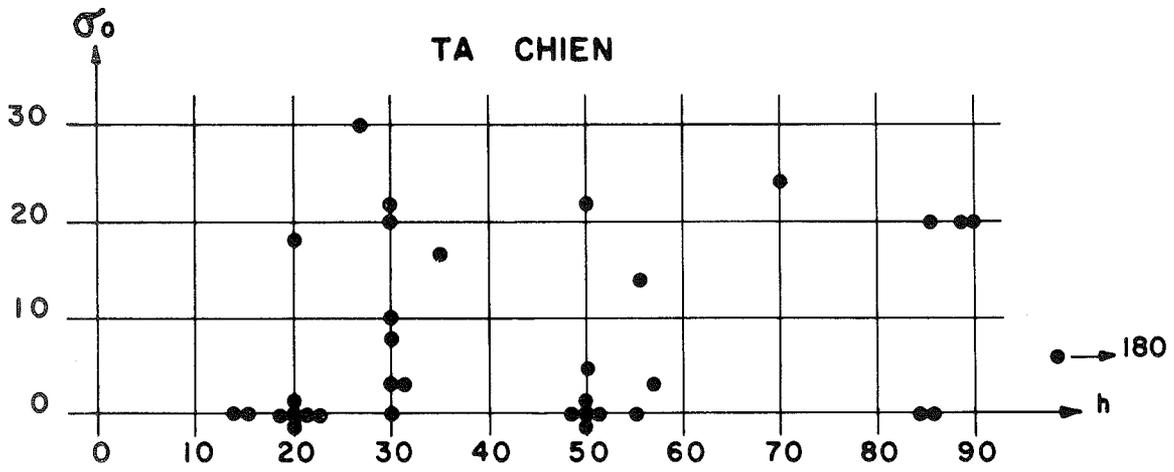
Contraintes

- Essai vertical en radier
- Essai vertical en calotte
- + Essai horizontal



Déformations

ESSAIS AU VERIN
 CONTRAINTES INITIALES
 RESULTATS GENERAUX



σ_0 = Contrainte initiale
 h = Hauteur (mètre) de terrain au dessus de l'essai

ESSAIS AU VERIN

fig 102. CONTRAINTES INITIALES RESULTAT PARTIEL

Pour le cas de Hendrik Verwoerd et de Van Der Kloof, nous avons pu mesurer par ailleurs des contraintes internes de l'ordre de plusieurs dizaines de bars sans que σ_0 traduise ces contraintes.

Nous pensons que, dans la plupart des essais, la frange de terrain affectée par le tir et le desserrage de surface masque complètement le phénomène.

L'essai au vérin est technologiquement complexe, aussi pensons-nous qu'il est préférable d'abandonner cette tentative de mesure de contraintes en paroi, qui demanderait une purge prohibitive des surfaces, au bénéfice d'essais plus simples, plus rapides et surtout plus nombreux.

1.5. - Conclusion

La complexité des phénomènes que nous venons d'étudier rend difficile le choix des valeurs à utiliser dans une formule, tirée de la théorie de l'élasticité, donnant le module élastique du rocher ; la notion même en est à revoir. Pourtant, son utilisation par l'ingénieur est indispensable car elle est nécessitée par les calculs élastiques des déformations et des contraintes de la structure projetée.

On déterminera donc les cas où l'on ne peut pas obtenir, par l'essai de déformation à la paroi, la vérification satisfaisante d'un comportement pratiquement élastique (par exemple, nous avons proposé $C_p < 1$). A ces cas là, on réservera les ouvrages conçus pour s'adapter à des déformations permanentes importantes.

Dans le domaine des déformations jugées élastiques, on ne peut admettre que celles qui sont modérées ; le traitement de peau des fondations par injection permet toutefois de ramener les grandes déformations dans des limites permises.

Le calcul, ou plutôt l'estimation du module de déformation élastique du volume de roche voisin de l'essai peut se faire, quand on a fait la vérification d'un comportement pratiquement élastique, à l'aide des déformations du cratère comme l'ont proposé P. DUFFAUT et J. LACKSHMANAN (1966).

La validité de la transposition de ces résultats locaux au site proprement dit est liée à la dimension des plateaux et à la maille de la fracturation. MULLER (1963) propose d'inclure 10 discontinuités dans le volume de roche intéressé par l'essai pour que les résultats commencent à être significatifs.

Au cours de nos mesures, nous avons obtenu des résultats cohérents en respectant des conditions très voisines de cette règle. Mais ceci impose, dans bien des cas, des dimensions d'essai énormes comme sur le site de Kurobé au Japon par exemple. L'usage de tels essais est un cas d'espèce ; le prix en est considérable.

Nous venons de voir, une fois de plus, l'influence fondamentale de la structure du site qui, dans l'essai au vérin, régit la signification de l'essai et la validité des transpositions, à grande échelle, des résultats obtenus. C'est l'étude de nombreux critères, autres que les simples modules trop souvent uniquement utilisés, qui redonne à l'essai au vérin la valeur que lui nient de très nombreux ingénieurs.

2. - Essais de petite sismique.

Nous avons abordé précédemment des volumes de roches de plus en plus grands sans toutefois dépasser quelques mètres cubes.

Nous possédons avec la géophysique un moyen d'étendre l'investigation d'une roche à des volumes importants. Cependant, les projeteurs de grands ouvrages ne tirent pas toujours la meilleure substance du procédé ; certains ont tendance à refuser systématiquement tout ce que la géophysique peut apporter, d'autres, par contre, acceptent sans critiquer les résultats même quand ils sont des plus hypothétiques.

Nous allons analyser la branche importante de la géophysique qu'est la sismique. Il n'est pas de notre propos d'aborder le problème à la même échelle que celle des prospections pétrolières, qui intéressent des épaisseurs de terrains de l'ordre d'un kilomètre, ni à l'échelle des prospections ultrasoniques étudiant à peine le mètre. Le massif de fondation du barrage nécessite une étude de volumes de quelques milliers de mètres cubes, ce qui impose alors une base de mesure de l'ordre de 50 mètres.

Nous verrons, au cours des développements qui suivent, que l'utilisation que nous faisons de la méthode sismique s'est écartée dès le départ des chemins habituellement suivis, qui consistent en une recherche géométrique des zones ou singularités géologiques.

Nous cherchons à délimiter des volumes rocheux qui soient homogènes en grand et nous les caractérisons - contrairement à l'habitude de ne choisir que la seule vitesse de propagation d'une onde - par le plus grand nombre de critères sismiques possibles : vitesse d'ondes, amortissement, fréquence, timbre.

2.1. - Les ondes sismiques

Il est d'usage de considérer que la théorie de l'élasticité s'applique aux lois de propagation des ondes sismiques, car elle lie proportionnellement des efforts et des déformations faibles, à condition qu'on s'éloigne de la source d'ébranlement. Des ondes de nature différente se propagent dans un milieu élastique.

2.11. - Onde plane longitudinale

Dans un milieu illimité, homogène, isotrope, de poids spécifique ρ , imaginons un plan d'abscisse x (figure 103), perpendiculaire à l'axe Ox , se déplaçant d'une quantité u par suite des déformations impliquées par l'application de contraintes parallèles à Ox . Les déformations ne dépendent que de x et du temps t suivant la relation classique :

$$(1) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\rho}{A} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

dans laquelle A est le module d'allongement transversal.

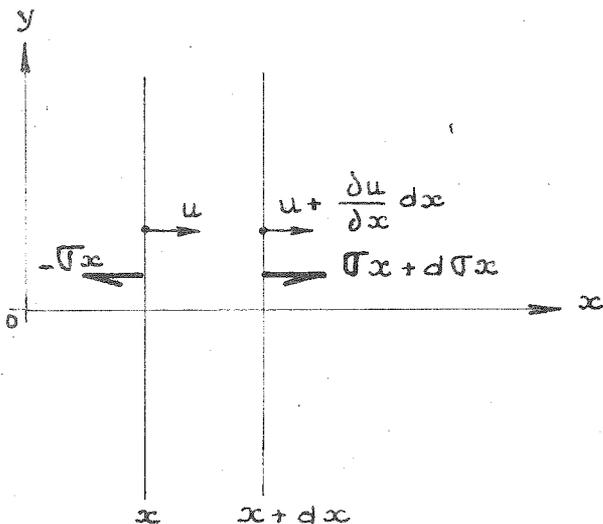


fig 103

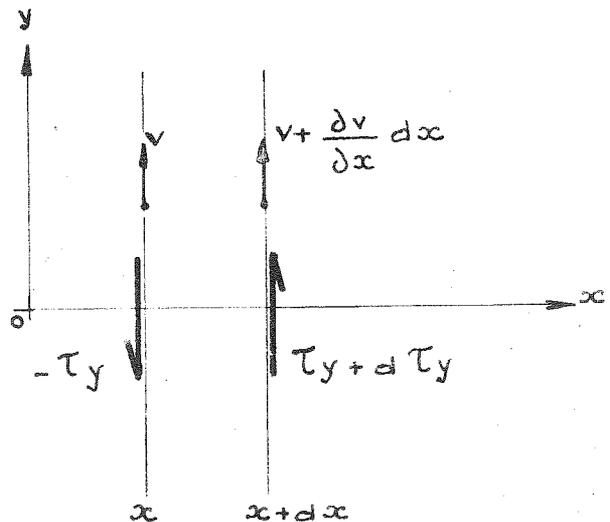


fig 104.

Si on imagine une particule élémentaire dont le mouvement est parallèle à la direction Ox, c'est-à-dire à u, elle vibrera au passage d'une onde répondant à l'équation (1) dont la vitesse de propagation est :

$$V_L = \sqrt{\frac{A}{\rho}}$$

Or, on sait que :

$$A = E \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

où E est le module de Young et ν le coefficient de Poisson sismiques.

$$\text{On en tire donc : } V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$

Considérons deux particules situées sur l'axe Ox à une distance telle que leur mouvement soit en opposition de phase, le segment de matière, qui les relie, est soumis à une suite de compressions et de tractions. L'onde qui est à l'origine de ce mouvement, appelée onde longitudinale puisqu'elle crée des mouvements de particules le long de l'axe de propagation, est une onde de compression.

2.12. - Onde plane transversale.

Dans le cas d'une tension tangentielle τ appliquée en tous points d'un plan d'abscisse x (figure 104), l'équation de propagation du phénomène est :

$$(2) \quad \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\rho}{G} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0$$

dans laquelle G est le module de déformation par cisaillement.

Si on imagine une particule élémentaire dont le mouvement est perpendiculaire à l'axe Ox, c'est-à-dire suivant v, elle vibrera au passage d'une onde répondant à l'équation (2) dont la vitesse de propagation est :

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$\text{on sait que : } G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

on en tire donc :

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \nu)}}$$

Considérons deux particules situées sur l'axe Ox à une distance telle que leur mouvement soit en opposition de phase. Le segment de matière qui les relie est soumis à des déviations angulaires sans changement de dimensions.

L'onde qui est à l'origine de ce mouvement, appelée onde transversale puisqu'elle crée des mouvements de particules perpendiculaires à l'axe de propagation, est une onde de cisaillement.

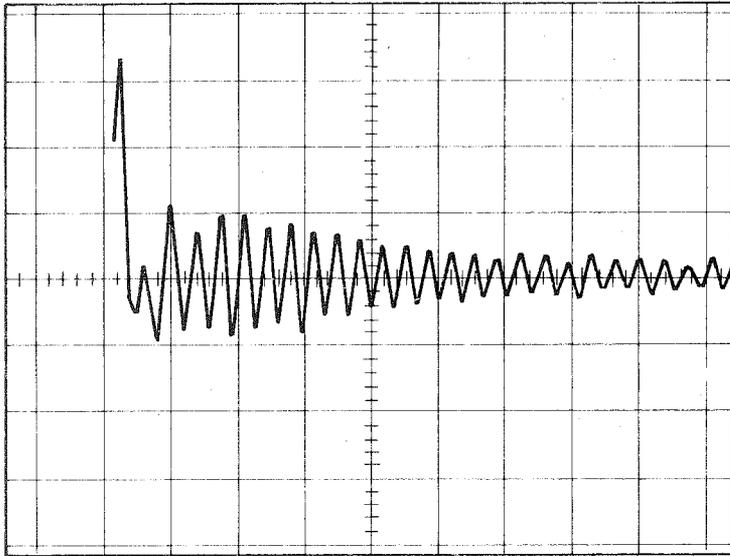
2.13. - Ondes annexes.

En plus des ondes planes intéressant un milieu infini, il faut envisager d'autres phénomènes qui s'appliquent quand le milieu est semi-infini. On trouve alors que, en plus des deux ondes précédentes qui restent valables et se propagent en profondeur, il faut distinguer une onde de surface dite de Rayleigh, qui se propage avec une vitesse plus faible que les deux autres et une onde également de surface dite de Love, encore plus lente, dont les mouvements sont plus complexes. Étant donné leur vitesse inférieure à celle des ondes de volume, on les distingue aisément de ces dernières qui, seules, font l'objet de nos mesures.

2.2. - Critique

La théorie précédente sur la propagation des ondes sismiques, utilise la théorie de l'élasticité, c'est-à-dire une loi valable dans un milieu élastique, isotrope, homogène, continu, infini.

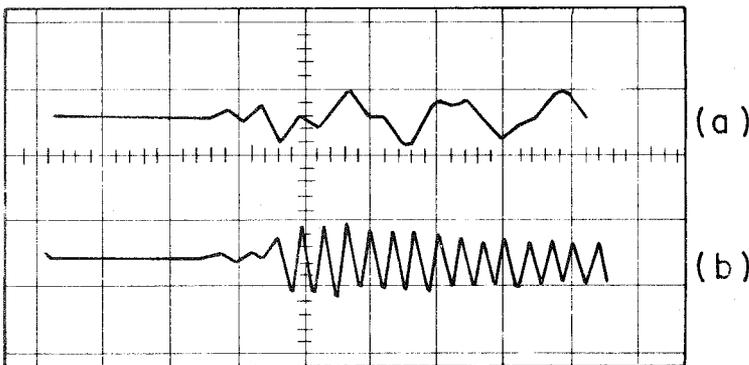
Pratiquement, de nombreuses difficultés s'opposent à un traitement mathématique du problème. Il suffit de rappeler que :



Enregistrement d'une onde transversale produite à 5m du géophone, par une masse de 5kg tombant de 1m. Impact sur le rocher.

H[†] 5 millisecondes par carreau
V[†] 5 millivolts par carreau

CALCAIRE DE S^{te} CROIX



Enregistrement d'une onde longitudinale (a) et d'une onde transversale (b) produite à 16m du géophone par une masse de 5kg tombant de 1m. Impact sur le rocher

H[†] 2 millisecondes par carreau
V[†] 2 millivolts par carreau

CALCAIRE DE S^{te} CROIX

PETITE SISMIQUE

Ondes longitudinales et transversales

fig 105.

- le corps rocheux n'est pas homogène ni isotrope, aussi bien à petite échelle - celle du cristal - qu'à grande échelle - celle des cassures et des bancs - .
- D'autre part, la zone en général prospectée n'est pas illimitée puisque les mesures ont toujours lieu soit en surface, le milieu étant alors semi-infini, soit dans une galerie dont les dimensions sont du même ordre de grandeur que celles des profils.

La théorie de propagation d'une onde d'ébranlement dans un milieu qui ne serait ni homogène, ni illimité, ni isotrope dépasse le cadre de ce travail, aussi avons-nous préféré aborder le problème de l'étude d'un site par voie sismique sous l'angle empirique, c'est-à-dire par la mesure et la comparaison de critères nombreux. Pour cela, nous avons d'une part sélectionné un matériel pratique, d'autre part fait avec ce matériel de très nombreuses mesures avec une technique normalisée au maximum. Nous avons ensuite utilisé ces mesures comparativement entre elles pour essayer non pas de caractériser un site par la valeur d'un coefficient quel qu'il soit, mais de classer qualitativement les sites les uns par rapport aux autres. Nous avons seulement essayé de caractériser quantitativement un site en reliant expérimentalement modules sismiques et statiques.

2.3. - Types d'ondes analysés.

Dans notre tentative d'employer les ondes sismiques comme moyen de caractériser un massif rocheux, nous n'utiliserons que l'onde réfractée. En effet, un milieu rocheux peut, en première approximation, se représenter comme une série de couches parallèles à la surface, dont la compacité augmente avec la profondeur. Entre le point d'impact de la masse et le capteur, le rayon sismique le plus rapide, seul perçu par l'appareil, ne suivra pas nécessairement la plus courte distance géométrique ; il subira une série de réfractions élémentaires au passage de chaque couche de sorte que sa trajectoire s'enfoncera d'abord pour remonter ensuite ; la profondeur atteinte dépend des compacités relatives ; on admet usuellement qu'elle atteint, dans les milieux rocheux très diaclasés, le tiers de la distance géométrique émetteur-récepteur.

Nous essayerons, parmi les ondes longitudinales et transversales provenant des réfractions successives, de ne capter, par l'intermédiaire de récepteurs sélectifs, que le phénomène transversal ou longitudinal au choix (figure 105).

2.4. - Choix du matériel.

Le matériel que l'on trouve classiquement dans le commerce pour les mesures sismiques se compose d'un générateur de vibration, d'un capteur de vibration et d'un compteur de temps. On crée dans le sol une série d'ondes successives appelée train d'onde qui peut être soit irrégulier lorsqu'il s'agit d'un choc, d'une explosion, soit régulier quand il est produit par des vibreurs.

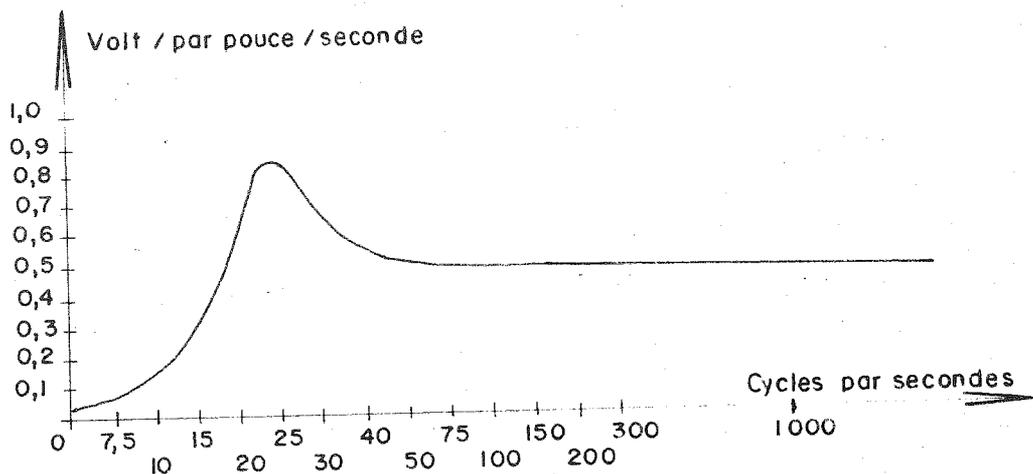
Comme nous devons utiliser l'appareil sur de nombreux sites, parfois à l'étranger, et toujours dans des conditions assez difficiles, nous avons choisi le choc produit par un marteau frappant sur la roche, le marteau étant manœuvré directement par un homme. Nous avons retenu une masse, couramment vendue dans le commerce, d'un poids standard de 6,4 kg (14 livres anglaises) et, afin de limiter au maximum l'encombrement pendant les transports, nous avons pris l'habitude d'acheter sur le lieu de l'emploi, chaque fois, un marteau correspondant aux caractéristiques du marteau type.

Les capteurs sont de plusieurs types ; ils peuvent soit mesurer le déplacement, soit la vitesse, soit l'accélération des particules de terrain sur lequel ils sont posés.

Les appareils mesurant l'amplitude des déplacements sont fragiles et lourds, ce qui condamne leur utilisation dans le cas présent. Les autres appareils sont soit les géophones mesurant les vitesses, soit les accéléromètres mesurant les accélérations.

Ils sont constitués d'un bâti léger directement posé sur le sol à l'intérieur duquel des masselottes métalliques suspendues par des ressorts de rappel portent un système de bobinage qui transforme les mouvements induits en impulsions électriques. Par construction, les masselottes ne peuvent enregistrer que, soit des mouvements verticaux, soit des mouvements horizontaux. On aura donc affaire à des géophones, soit verticaux capables surtout de capter les ondes transversales, soit horizontaux capables surtout de capter les ondes longitudinales.

Toujours par souci de robustesse et d'économie, nous avons choisi des géophones mesurant la vitesse de déplacement du terrain. Ce sont, en effet les plus robustes et les moins encombrants pour une grande sensibilité. La figure 106 donne la courbe de réponse des géophones utilisés. Sur le terrain, les fréquences enregistrées sont supérieures à 100, la réponse de l'appareil est donc pratiquement constante.



Courbe de réponse des géophones Hall-Sears HS - 1
en circuit ouvert.

Fréquence propre : environ 23 cps

Résistance interne : 215 ohms

fig 106.

Les indications reçues par le géophone sont transmises à un appareil : "le sismographe" qui est en réalité un compteur de temps. Pour des raisons d'encombrement et de prix, nous avons choisi le M.D.1. (Geophysical Specialities Co) que nous avons modifié pour pouvoir effectuer des lectures rapides avec plusieurs types de géophones d'une part et d'autre part pour qu'il puisse être couplé avec un oscilloscope.

Pendant la première partie de nos expériences, nous avons utilisé le M.D.1. en contrôlant les observations avec un oscilloscope de laboratoire (ces premières mesures ont été faites sur le carreau d'une carrière).

Les figures 107 a et b montrent tous les constituants de l'appareil utilisé :

- le sismographe proprement dit (figure 108),
- la boîte d'accessoires contenant géophone, fils électriques, etc. . . .
- le marteau et son contact.

Le tout pèse une quinzaine de kg.



**MATERIEL POUR PETITE SISMIQUE
 PRET POUR LE TRANSPORT.
 (POID TOTAL 16 Kg.) SANS LE
 MARTEAU.**

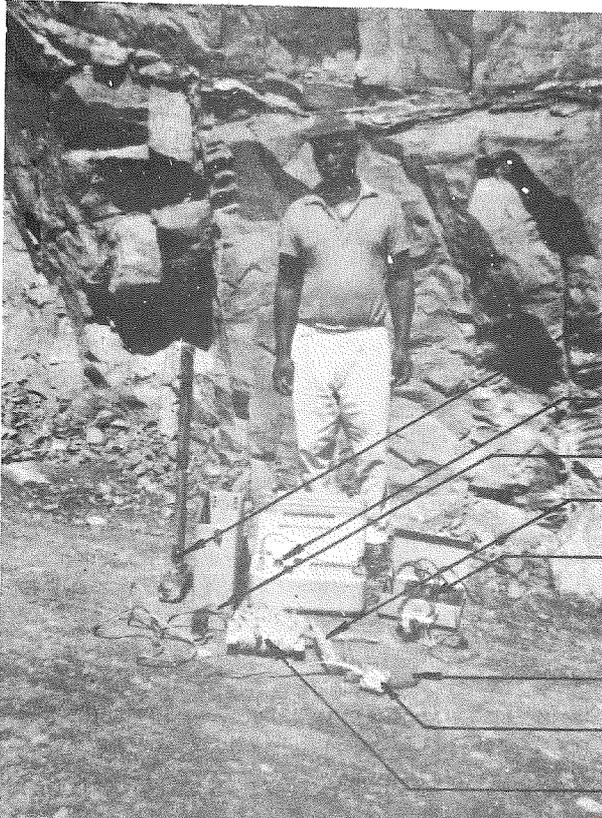
Marteau de 7 kg.

Boite a accessoire

Sismographe

Amplificateur acoustique

Marteau de géologue



**MATERIEL POUR PETITE SISMIQUE
 PRET A L'EMPLOI**

Contact électrique a inertie
 monté sur la masse

Sismographe

Geophone

Scleromètre

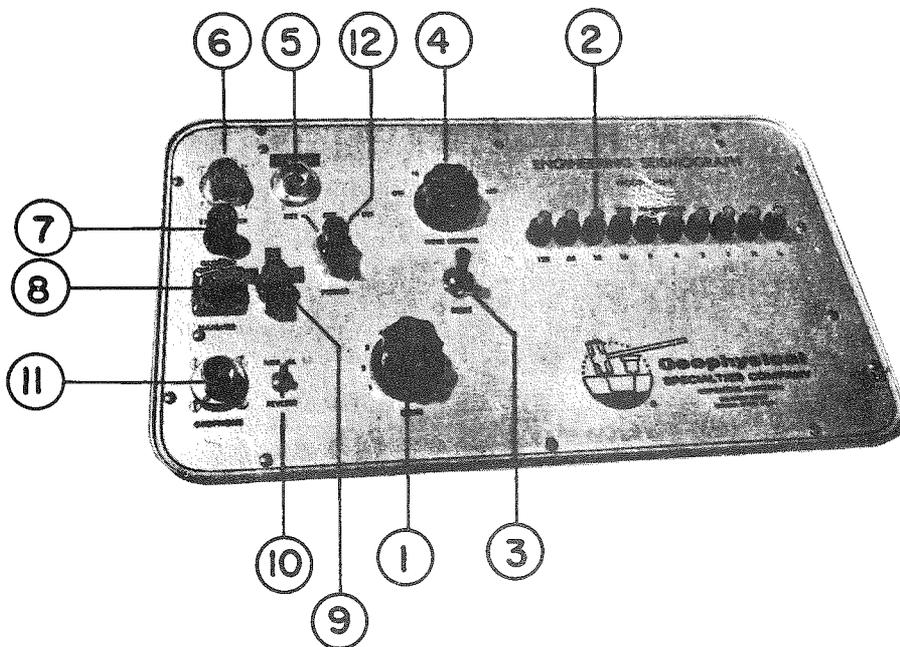
Amplificateur de son et ses écouteurs

Ruban gradué en distance

Boussole de terrain

Fils électriques reliant le marteau
 au sismographe

APPAREILLAGE POUR PETITE SISMIQUE



Vue du sismographe MD1 modifié par nos soins

- 1 - Bouton de l'amplificateur de puissance gradué de 1 à 9 (amplification linéaire)
- 2 - Lampes du compteur de temps. Valeur en millisecondes
- 3 - Bouton de remise à zéro du compteur
- 4 - Dispositif d'élimination des bruits parasites en dessous d'une certaine valeur de temps
- 5 - Prise pour oscillographe
- 6 - Prise pour amplificateur acoustique
- 7 - Prise de masse (terre)
- 8 - Prise du fil de contact (marteau)
- 9 - Sélecteur de géophone (une position géophone vertical, 2 positions pour géophones horizontaux)
- 10 - Levier de sélection mesure normale - mesure inversée
- 11 - Prise du fil blindé géophone
- 12 - Interrupteur de mise en marche (batteries uniquement)

APPAREIL MD 1 MODIFIE

2.5. - Mode opératoire

La fonction de base du M.D.1. est de mesurer le temps que met une onde produite par le choc d'un marteau à se transmettre jusqu'au géophone.

Le compteur de temps commence à fonctionner au moment où les deux lèvres du contacteur fixé au marteau viennent en contact. Or, comme l'ouverture de ces lèvres au départ n'est pas négligeable, il se passe un certain temps entre l'instant où le fer de la masse touche le rocher, c'est-à-dire l'instant réel de départ de l'onde, et le moment où le contact s'effectue. Si on suppose une vitesse de frappe de 1 mètre par seconde, on trouve donc un retard de 1 milliseconde par millimètre d'ouverture. Nous avons donc réglé l'ouverture à 0,25 mm pour rester dans la limite de précision du compteur (1/4 de milliseconde) ; cette ouverture est systématiquement vérifiée avec une cale d'épaisseur.

Nous verrons qu'il est très important d'obtenir la vitesse des ondes longitudinales et transversales. En utilisant successivement, à la même place, des géophones directionnels, on peut ainsi mesurer des temps correspondant au passage de l'une ou l'autre onde.

L'appareil comporte une amplification électronique commandée par un bouton gradué de 1 à 9 qui permet de grandir le signal reçu par le géophone, le niveau du compteur restant constant. Si le niveau d'amplification est réglé relativement bas, le compteur ne fonctionnera que pour les amplitudes importantes et vice versa.

L'appareil comporte également un inverseur de phase capable de déclencher le comptage soit au moment où la partie positive de l'onde sinusoïdale, soit au contraire au moment où la partie négative de l'onde arrive au géophone (repère 10, figure 108).

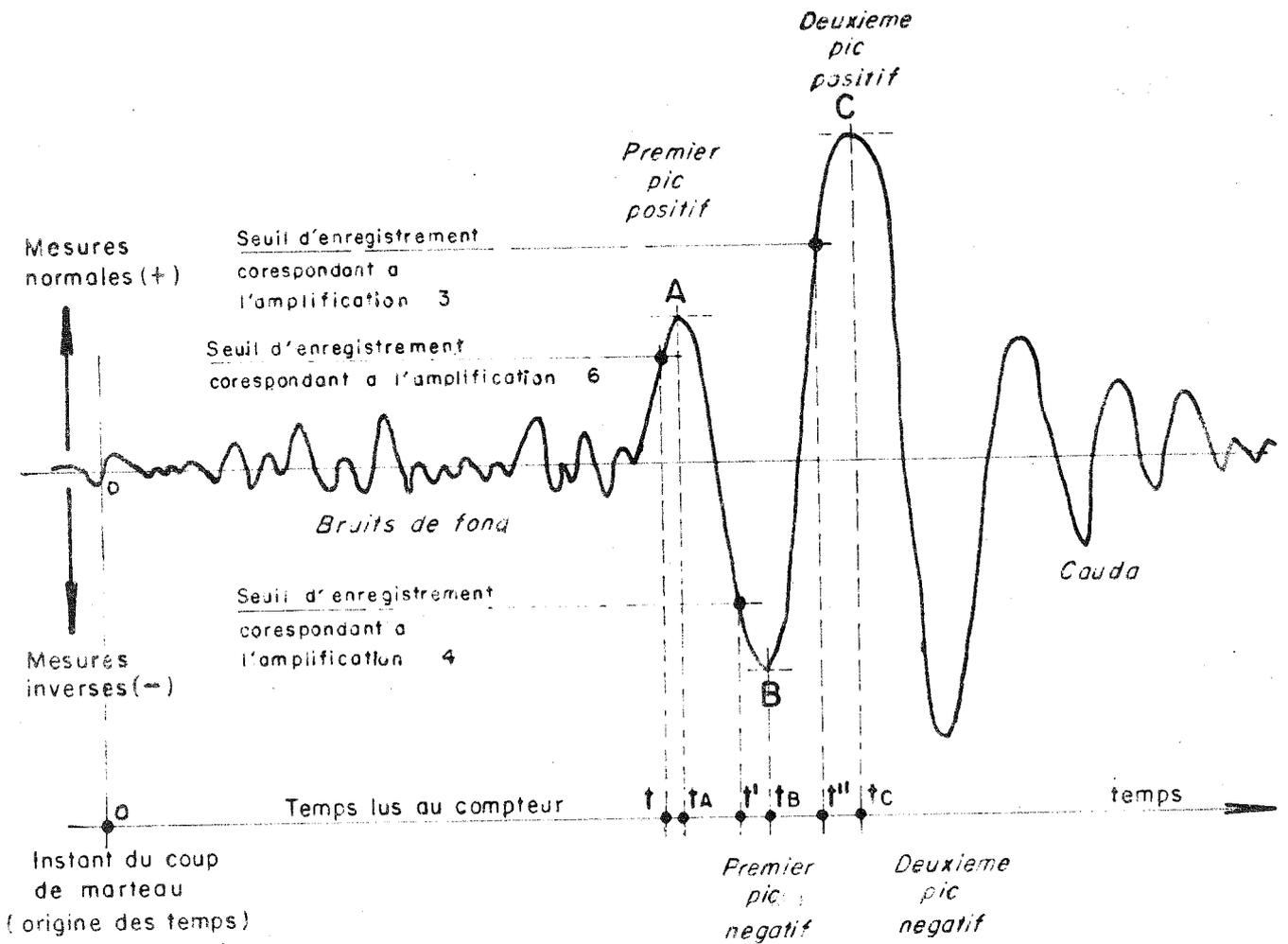
Avec ces deux dispositifs, amplificateur et inverseur de phase, nous avons pu obtenir les deux caractéristiques : amplitude et longueur d'onde des premières sinusoïdes. La figure 109 montre quelle est la forme sur le cadran de l'oscilloscope d'une onde recueillie par un géophone vertical situé à plusieurs dizaines de mètres de la source d'ébranlement. A partir du moment O, origine du comptage, on distingue usuellement, après les petits mouvements dus aux bruits de fond, une première pointe positive, une deuxième pointe négative, une troisième pointe positive très souvent supérieure à la première et enfin une cauda, succession irrégulière de vibrations plus ou moins importantes. La cauda est difficilement interprétable ; on arrive parfois en comparant les sismogrammes de géophones voisins à mettre en évidence des changements d'allures, mais nous ne nous sommes préoccupés, toutefois, dans ce travail que de la mesure des deux premières pointes. Nous verrons cependant que nous avons pu apprécier la cauda et en tirer des renseignements qui justifieraient une étude théorique.

Le jeu du bouton d'amplification et la mesure de la partie positive ou négative de l'onde permet, par itération, d'encadrer les pics pour lesquels on lira les temps t_A , t_B et t_C avec le gain d'amplification respectif.

Par construction, l'amplification est proportionnelle au carré des lectures de gain entre les valeurs 1 et 9 du cadran, il est ainsi facile de caractériser parfaitement les trois premières sinusoïdes de l'onde.

Mais ceci impose que le choc soit produit au même endroit avec la même puissance. Or, s'il est aisé de produire le choc, pratiquement au même endroit (la précision atteinte par un homme manoeuvrant un marteau est d'une dizaine de centimètres, tout à fait négligeables devant les dizaines de mètres qui séparent le géophone du point d'impact), il semble, par contre, difficile de mettre en jeu des énergies constantes à chaque choc. En fait, nous avons observé lors des essais avec l'oscilloscope que si on faisait tomber le marteau d'une hauteur constante, en utilisant si possible toujours le même manoeuvre, les amplitudes étaient très voisines pour toute une série de chocs. Nous avons reculé volontairement devant l'utilisation d'un mouton taré, apportant finalement une précision superflue, et par contre lourd et encombrant.

Si l'observation des amplitudes, à l'aide de l'oscilloscope, nous a montré qu'elles étaient assez peu influencées par des variations faibles de la puissance de la frappe, nous avons observé, par contre, qu'elles étaient énormément influencées par la qualité du rocher à l'emplacement du choc. Par exemple, dans une galerie, à la même distance du géophone, si la face gauche est beaucoup plus dure que la face droite, les amplitudes reçues après un choc à gauche sont extrêmement importantes alors que les amplitudes des ondes produites par un choc à droite sont beaucoup plus faibles, la différence correspondant à plusieurs unités du cadran de l'amplificateur, les vitesses de propagation étant les mêmes. Nous avons donc essayé, dans la mesure du possible au cours d'un profil de mesures, de produire



La demi-longueur d'onde est $(t_B - t_A) v_T$

La fréquence est $\frac{1}{2(t_B - t_A)}$

ENREGISTREMENT DU SIGNAL PRODUIT PAR UN GÉOPHONE
SENSIBLE AUX VITESSES DE DÉPLACEMENT DES PARTICULES

TYPE DE SEISMOGRAMME
D'UNE ONDE TRANSVERSALE

fig 109.

les chocs avec une énergie humainement constante et sur un rocher de même qualité. Pour cela, nous avons utilisé un appareil portatif utilisé couramment dans les laboratoires : le scléromètre SCHMIDT ; c'est un appareil basé sur la puissance de rebondissement d'une tige qui est mise en mouvement à énergie constante par un ressort.

L'utilisation pratique du scléromètre dans notre méthode est la suivante. On procède d'abord à la détermination de la caractéristique sclérométrique moyenne du site par méthode statistique. Pour cela, l'opérateur parcourt le site et note successivement les valeurs relevées sur tous les affleurements de qualité qu'il aura d'abord sondé rapidement avec un petit marteau de géologue pour que le son rendu soit clair. Pour tirer une courbe statistique correcte, l'expérience demande plusieurs centaines de lectures ; la traduction graphique de ces lectures est une courbe en cloche, du type courbe de Gauss, qui donne une valeur moyenne pour le site. Lors de l'exécution du profil sismique, l'opérateur cherche à déterminer (figure 110 a) un emplacement de choc dont la lecture sclérométrique moyenne, c'est-à-dire le produit moyen de 5 ou 6 lectures élémentaires, se rapproche le plus possible de la lecture moyenne statistique du site (figure 110 b).

Le manoeuvre produit ensuite avec sa masse une série de chocs à énergie constante, par exemple en la laissant tomber naturellement d'une même hauteur (figure 110 c). Pour chaque choc, des lectures sont effectuées ; l'opération est répétée ensuite en s'éloignant progressivement du géophone tous les deux ou trois mètres par exemple.

L'opérateur note pour chaque point et pour chaque type de géophone :

- la valeur sclérométrique de la surface,
- le temps de parcours en millisecondes de la première pointe positive et son amplification minimale,
- le temps de parcours de la première pointe négative et son amplification minimale.

Sur un graphique où les distances sont en abscisse, on porte en ordonnée les temps, les valeurs sclérométriques et les valeurs des amplifications pour chaque point. On y ajoute une description géologique sommaire (figure 111).

On peut ainsi déterminer des séries de courbes donnant les variations en fonction de la distance :

- du temps de parcours de l'oscillation positive et négative,
- des amplifications juste nécessaires à déceler l'une et l'autre de ces oscillations,
- des valeurs sclérométriques,

Plutôt que de caractériser un profil par la distance au-delà de laquelle on ne peut pas aller parce que l'énergie du marteau est insuffisante, nous avons limité le profil de telle façon que les points caractérisant les mesures de temps restent alignés. Autrement dit, on définit un certain volume de roche où la vitesse de l'onde reste constante.

Rappelons que les vitesses longitudinales caractérisaient les compressions et les extensions de matière, alors que les vitesses transversales caractérisaient des cisaillements. Par la comparaison de sites, qui sont, répétons le, non isotropes et non homogènes, nous avons trouvé que c'était la vitesse transversale qui était la plus intéressante à étudier, car c'est elle qui a tendance à varier le plus en fonction précisément de l'anisotropie et de la non homogénéité du massif. Aussi, nous sommes-nous fixés l'observation de cette vitesse transversale pour la limitation de la longueur des profils.

2.6. - Interprétation des mesures.

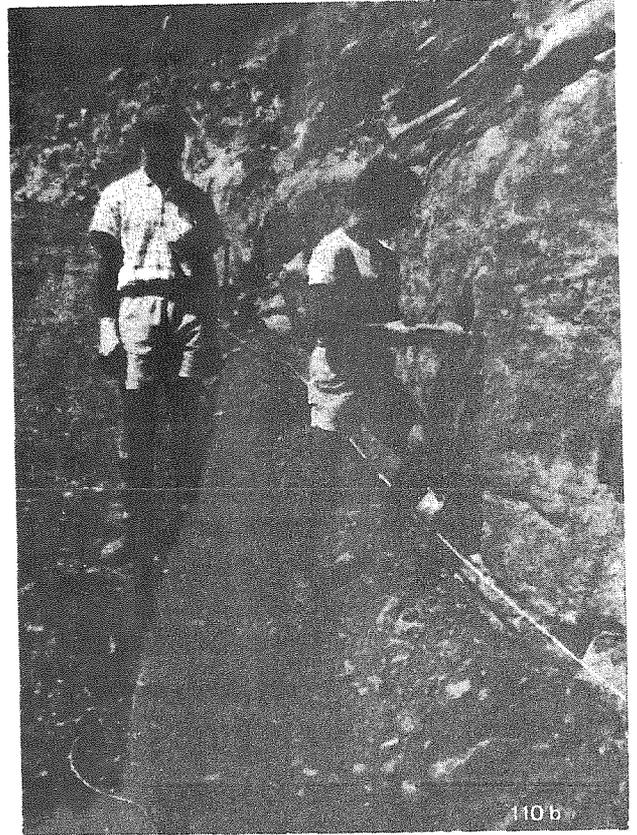
2.61. - Fréquences

Le produit de la vitesse de translation de l'onde par la différence de temps de parcours entre la première pointe positive et la première pointe négative, donne la demi-longueur de la première manifestation de l'onde, donc sa fréquence.

On sait que la fréquence prédominante, c'est-à-dire la fréquence des deux ou trois premières pointes change en fonction de la distance au point d'émission. SZENDREI (1960) a trouvé pour un certain nombre de milieux, que la fréquence diminuait avec la distance en restant toutefois peu variable entre 5 et 25-30 m. Ces variations de fréquence sont inférieures à l'écart de fréquence dû à la précision de notre appareil (1/4 de milliseconde) pour les vitesses couramment mesurées : 2000 à 3500 m/s et des longueurs d'ondes de 6 à 20 m. On peut toutefois remarquer, pour les profils très longs (50 m), une augmentation de la différence des lectures de temps pour les pics positifs et



DETERMINATION AU MARTEAU DE
GEOLOGUE D'UNE SURFACE DE
ROCHER SAIN



MESURE AU SCLEROMETRE SCHMIDT
DE 5 OU 6 POINTS DE LA SURFACE



MESURES EN UN POINT DU PROFIL

Masse de 7 kg

Ruban gradué en distances

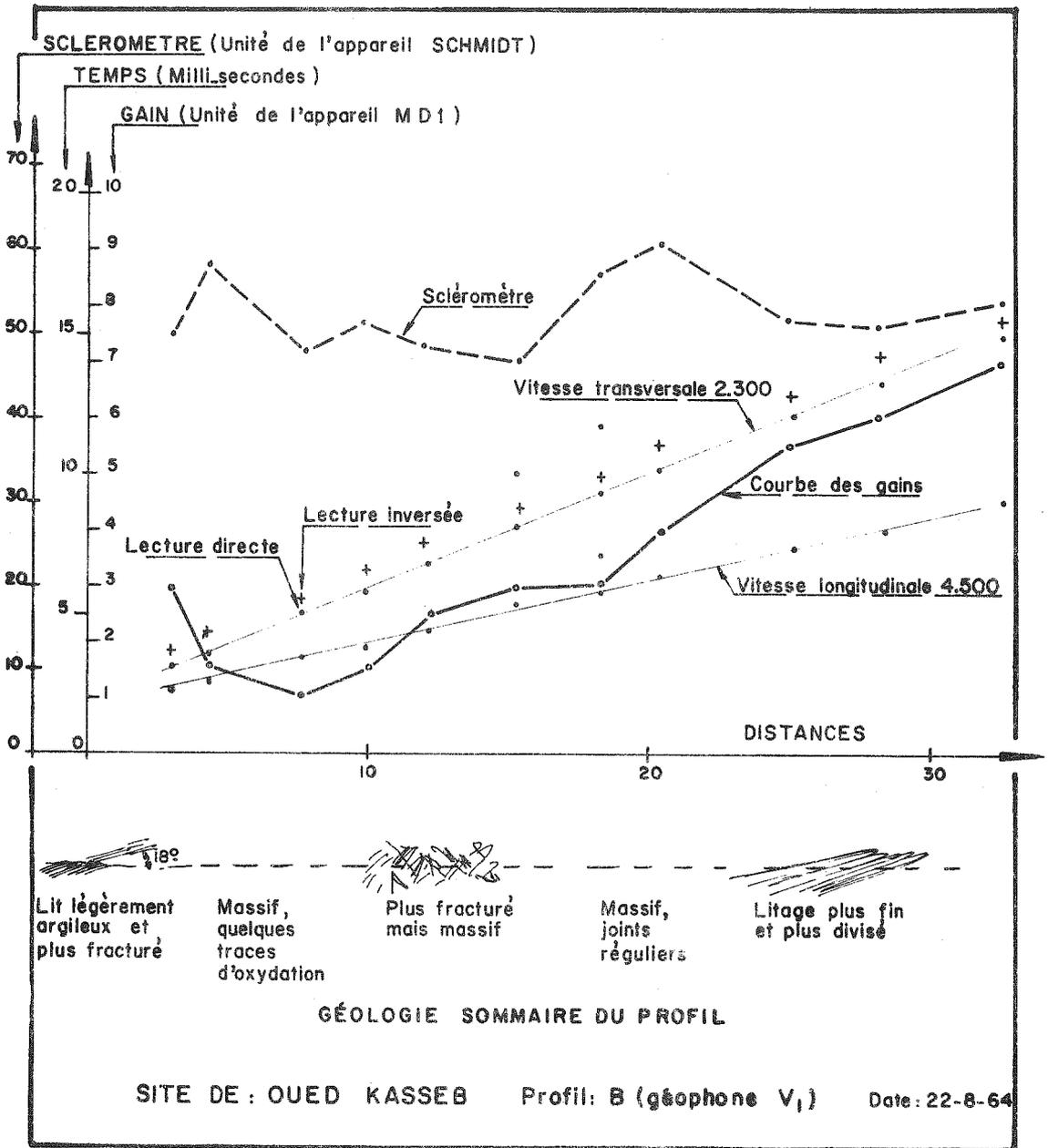
Sismographe MD1

Gaophone

Scleromètre

Marteau de géologue

OPERATIONS TYPES DE PETITE SISMOLOGIE



EXEMPLE DE GRAPHIQUE DONNÉ PAR LA MESURE D'UN PROFIL ROCHEUX EN GALERIE

négatifs en fonction de la distance, aussi avons-nous usuellement mesuré les longueurs d'onde dans la plage de distance 5 m - 30 m où elles semblent pratiquement constantes.

Nous nous sommes bornés à étudier seulement les premières manifestations de l'onde, car l'enregistrement du train d'onde est impossible à obtenir avec le M.D.1. Nous verrons cependant plus loin, que nous pouvons apprécier l'importance de la cauda par adjonction d'un dispositif acoustique.

2.62. - Pertes d'énergie

On a très souvent cherché à caractériser un milieu rocheux ou terreux par l'amortissement d'un signal en fonction de la distance (HALL 1963 - KESSLER 1953, 1962 - SELIG 1965).

Au cours des profils que nous avons effectués, nous avons suivi la variation d'amplitude du premier pic positif de l'onde transversale caractérisée par les lectures du potentiomètre d'amplification. Par construction, l'amplification est sensiblement proportionnelle au carré des lectures de gain. Si nous avons obtenu l'amplification tout juste nécessaire à recevoir la première pointe, nous avons donc une lecture de gain proportionnelle à la racine carrée de l'amplitude. Notons qu'avec les géophones utilisés, il s'agit d'une amplitude de vitesse de déplacement de particules.

Les amplitudes étant liées aux énergies, nous nous sommes efforcés d'émettre l'onde à énergie constante l'amortissement du signal que nous mesurons est donc représentatif des pertes d'énergie subies par l'onde en fonction de la distance de parcours.

Au cours de nos mesures, nous avons généralement trouvé, dans le cas de rocher peu fissuré, une bonne proportionnalité entre gain et distance :

$$G = K_1 x$$

Par construction, l'amplification est proportionnelle au carré des gains :

$$\text{amplification} = K_2 G^2$$

$$\text{d'où} \quad \text{amplification} = K_3 x^2$$

Or, pour le niveau de sensibilité du compteur, l'amplification est inversement proportionnelle à l'amplitude du signal A

$$A = \frac{K_4}{\text{Amplification}}$$

d'où $A = K x^{-2}$, résultat conforme à ceux publiés par SZENDREI (1960) et RIKER (1963) qui proposent :

$$A = K x^{-n}$$

avec $n = 2$ pour l'onde transversale

et $n = \frac{5}{2}$ pour l'onde longitudinale.

De son côté, LANGER (1964), avec la même formule, a trouvé n compris entre 1,5 et 2,5 avec semble-t-il des valeurs plus faibles pour une propagation parallèle aux strates que perpendiculairement à elles.

2.63. - Etude des sons reçus par le géophone.

Les longueurs d'onde mesurées correspondent à des fréquences qui sont celles de sons audibles par l'oreille humaine. Nous avons donc essayé, par une amplification correcte, de les rendre perceptibles par l'opérateur.

2.631. - Ecoute des bruits produits par la masse frappant le rocher.

Pour chacun des points de station, en plus des mesures citées dans le chapitre précédent, l'opérateur caractérise son interprétation personnelle des bruits reçus dans les écouteurs.

Par expérience, nous avons classé en trois catégories les caractéristiques des bruits :

- a) - le timbre qui caractérise la pureté du son ; le son est pur ou au contraire semblable à celui d'une cloche fêlée.

De plus, la résonance perçue donne une indication sur la durée de la cauda du train d'onde.

- b) - La force du bruit ; le bruit est fort, moyen ou faible.
- c) - La hauteur de la note perçue ; le son est aigu, moyen ou grave, (nous nous servons d'un pipeau pour apprécier la hauteur du son reçu).

De ces trois valeurs, le timbre seul est une appréciation originale. En effet, l'intensité du bruit étant une fonction de l'amplitude de l'onde, on doit vérifier qu'un bruit fort correspond à une amplitude assez importante, c'est-à-dire à un gain faible sur l'appareil. D'autre part, à la hauteur du son reçu, correspond la longueur d'onde. On doit vérifier qu'à un son grave correspond une longueur d'onde grande.

Au cours des mesures, nous nous attachons donc à caractériser le bruit reçu par le timbre. Nous avons trouvé que les roches dures, peu fissurées, donnaient des sons brefs et mats, alors que les roches très divisées donnaient des sons longs très chantants. Les observations sont valables à une distance d'une vingtaine de mètres de la source du bruit ; plus près de cette source, le son est trop bref et l'oreille ne peut plus alors faire de distinction.

D'autre part, au passage d'une discontinuité, le changement de timbre est très sensible - le son devient plus chantant - même quand on ne peut pas mesurer des variations d'amplitudes ou de vitesses.

Nous avons volontairement conservé l'appréciation du timbre par l'oreille humaine, car c'est elle qui fait l'analyse harmonique d'un son audible de la manière la plus rapide. Les résultats encourageants recueillis après ces observations des timbres nous portent à penser que leur étude, combinée à celle des amortissements, doit sans doute être très utile pour améliorer notre connaissance des discontinuités des milieux rocheux.

2.632. -

La seconde partie de l'utilisation de l'appareil acoustique est l'enregistrement des bruits naturels reçus. Dans une galerie en cours de percement, immédiatement après l'explosion d'une volée, c'est-à-dire 10 à 15 minutes après l'explosion elle-même (le temps d'une ventilation accélérée), nous avons placé un géophone au voisinage du front de taille et nous avons compté le nombre de bruits produits par le roc.

Ces bruits se composent soit de craquements brefs à fréquence élevée, soit de sons plus longs, sourds et à beaucoup plus basse fréquence. Par comparaison avec des écoutes de bruits naturels sans explosion préalable, nous avons trouvé que les sons brefs pouvaient venir du rocher affecté par l'explosion, les sons plus sourds venant de plus loin.

Nous avons donc décidé de ne compter que les premiers et, ceci dans des intervalles de temps donnés en profitant d'une explosion, soit à la fin du creusement de la galerie, soit avant une assez grande période de repos pour ne pas avoir d'interférence avec des explosions successives.

Les courbes de la figure 112 montrent les résultats obtenus dans les dolérites des sites de Van Der Kloof et d'Hendrik Verwoerd et dans les argilites du site d'Hendrik Verwoerd. La dolérite a un niveau de bruit extrêmement haut au commencement suivi par une rapide atténuation alors que dans l'argilite, les niveaux de bruit sont un peu plus faibles. Après deux jours, pour les deux types de rocher, les bruits cessent complètement. Ceci est à rapprocher des études de R. GOODMAN (1964) qui a enregistré les bruits d'une éprouvette en cours d'écrasement, et les bruits produits par une éprouvette brusquement déchargée. Il a trouvé qu'au bout de 12 heures, une diorite quartzreuse, préalablement soumise à une contrainte de 500 bars, brusquement annulée, ne produisait plus que quelques bruits ; ceux-ci semblent pratiquement disparaître après une vingtaine d'heures.

Il est impossible d'obtenir une indication de la contrainte interne d'un rocher par simple écoute des bruits de décompression, mais ceux-ci peuvent nous renseigner sur la façon dont les contraintes peuvent se dissiper. Dans le cas d'un contact franc entre deux rochers différents, (cas des dolérites et argilites du site d'Hendrik Verwoerd), on peut ainsi très rapidement approcher le problème de cisaillements éventuels du contact au cours de fouilles profondes et étendues.

Pour un certain nombre de cas, nous sommes en bonne voie de trouver une corrélation expérimentale entre le niveau de bruits reçus dans les premières minutes après une explosion et les valeurs des contraintes internes mesurées par la suite aux mêmes endroits.

SITE DU BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD

- Dolerite, fond de RA2
- ▽----- Dolerite a 33m. de l'entrée de RA1
- Argilite, fond de RA1

SITE DU BARRAGE DE VAN DER KLOOF

- x----- Dolerite, fond de VA1
- Dolerite à 50m. de l'entrée de VA1

Nombre de craquements
par minute

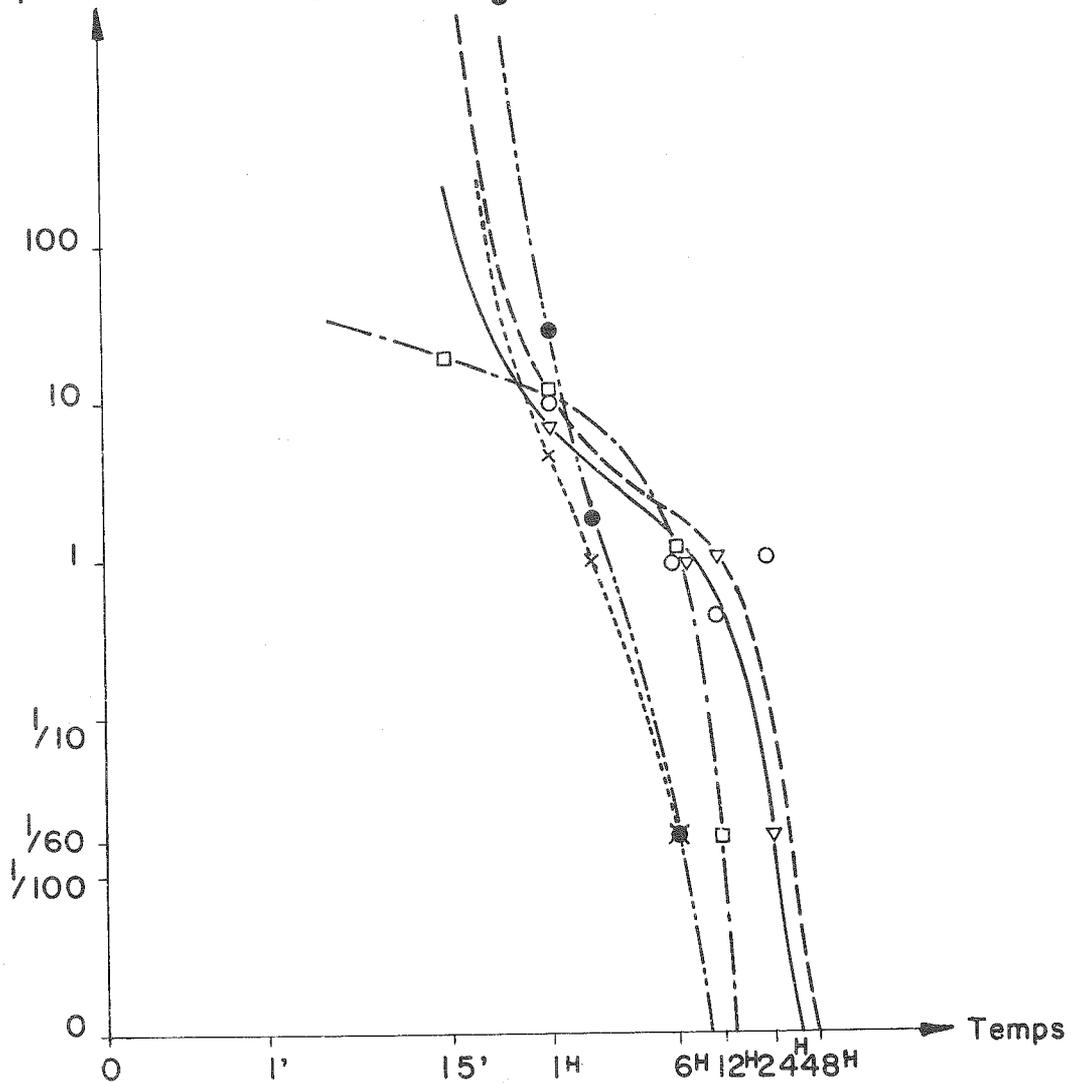


fig 112.

NIVEAU DE BRUIT DANS UNE GALERIE
EN FONCTION DU TEMPS

2.64. - Etude sismique comparative de quelques massifs.

Sur un graphique général du même type que celui d'un profil (figure 111), on groupe; pour un site donné, tous les renseignements obtenus pour chacun des profils. On obtiendra ainsi une valeur moyenne des vitesses transversales et longitudinales, une valeur moyenne de la courbe d'amplification, une valeur moyenne de la courbe sclérométrique. On portera également toutes les valeurs des demi-longueurs d'onde obtenues ; si les profils sont suffisamment nombreux, on peut aborder les répartitions statistiques. En plus des valeurs moyennes ci-dessus, on obtient aussi les dispersions.

Nous avons fait des séries de mesures, avec la même méthode, sur une quinzaine de sites (1) dont on trouvera la description géologique au chapitre A. III. De plus, nous avons également effectué des profils sur des bétons de barrages, entre joints de contraction.

Nous avons prospecté des sites tels que Malpasset, où était intervenu un phénomène prouvant la mauvaise qualité de la fondation, tels que La Gittaz où beaucoup d'experts avaient manifesté une certaine prudence et d'autres sites comme ceux d'Hendrik Verwoerd et Van Der Kloof où il n'y avait pas lieu d'envisager de problèmes particuliers pour les fondations. La comparaison du profil type d'un site en cours d'étude, et de profils types de sites dont on connaît bien les caractéristiques peut mettre en lumière des points particuliers.

De l'examen des graphiques types (figures 113 à 124) et du tableau résumé XIII on peut tirer les conclusions suivantes :

a) - La longueur d'onde des premières vibrations captées est très significative. Si le nombre de mesures est suffisant, il est très important de caractériser cette longueur d'onde par sa valeur moyenne et par la dispersion des mesures.

b) - La dispersion des critères (vitesse, gains, longueur d'onde) semble traduire, d'une façon assez sensible, l'hétérogénéité d'un massif ; il faut toutefois que la dispersion soit simultanée pour les gains et les longueurs d'onde (Malpasset, Kardjali, St-Cassien, St-Jean du Gard). Une faible dispersion indique un massif homogène (béton, Hendrik Verwoerd, Van Der Kloof, Ste-Croix).

c) - Longueurs d'onde et lectures sclérométriques peuvent être rapprochées : en effet, il est possible de trouver une certaine corrélation entre les deux valeurs (figure 125) et leurs dispersions sont du même ordre de grandeur.

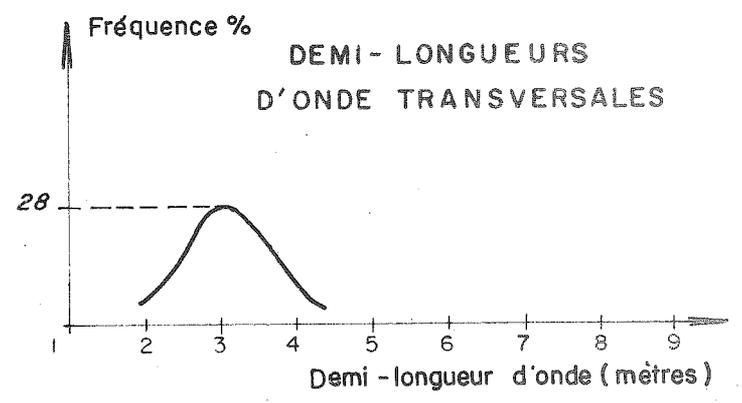
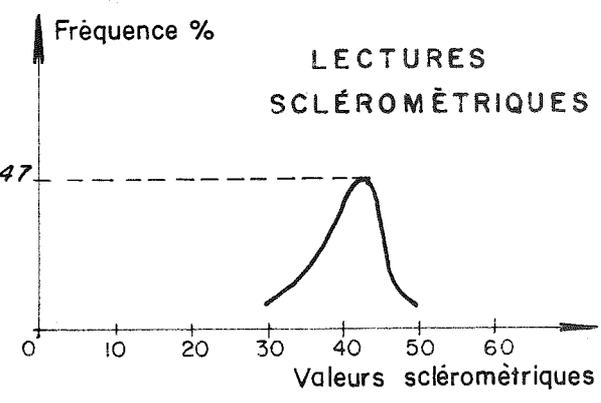
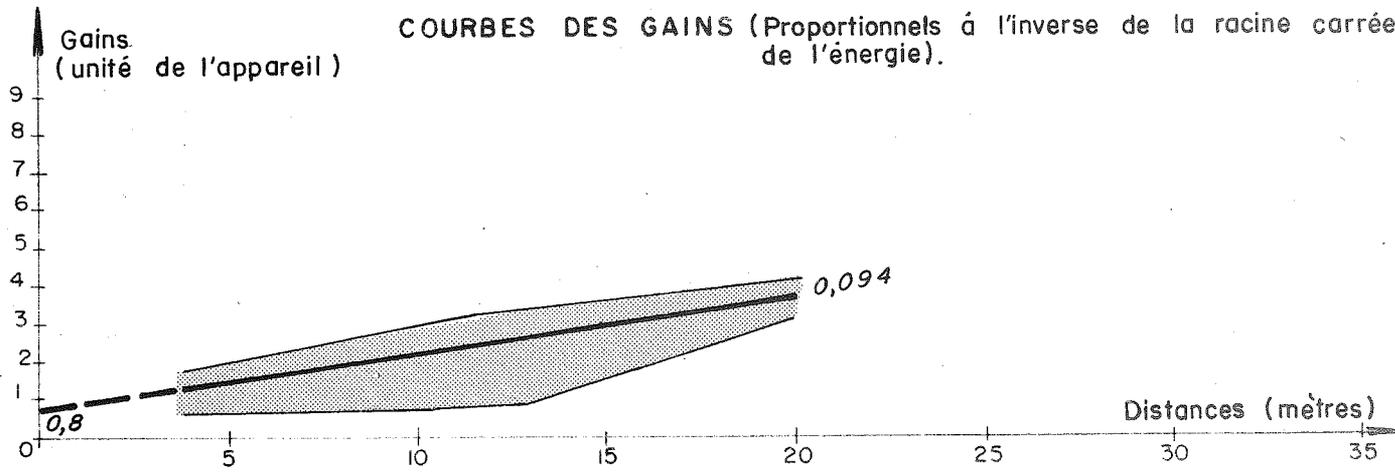
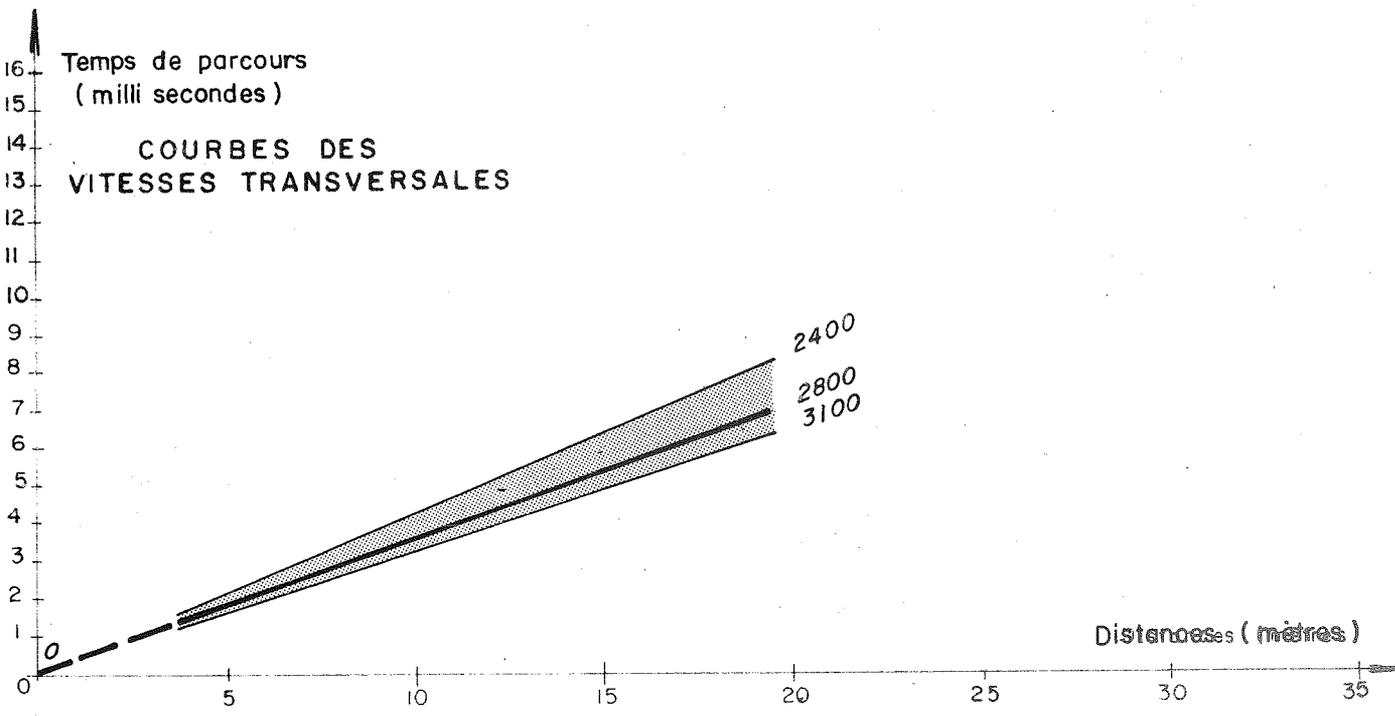
d) - Les gains et leurs variations c'est-à-dire les pertes d'énergie de l'ébranlement au cours de son trajet ne semblent pas caractériser seulement la fracturation, mais aussi la nature de la matrice, la nature des remplissages et également l'orientation des discontinuités structurales par rapport au sens de propagation de l'onde. Ci-dessous ont été classés les sites par valeurs décroissantes de la pente de la courbe des gains (1) et de l'ordonnée à l'origine de la courbe des gains extrapolée (2).

(1)

La Gittaz
St-Jean du Gard
Kardjali
St-Cassien
Kasseb
Malpasset - Ste Croix
Béton en masse
Lanoux - Hendrik Verwoerd (dolérite)
Van Der Kloof - Hendrik Verwoerd
(argilite)

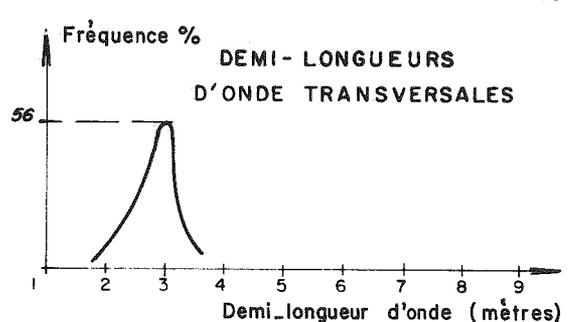
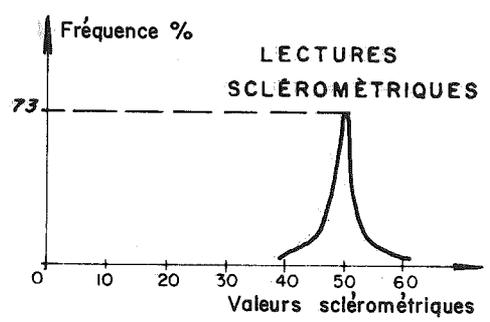
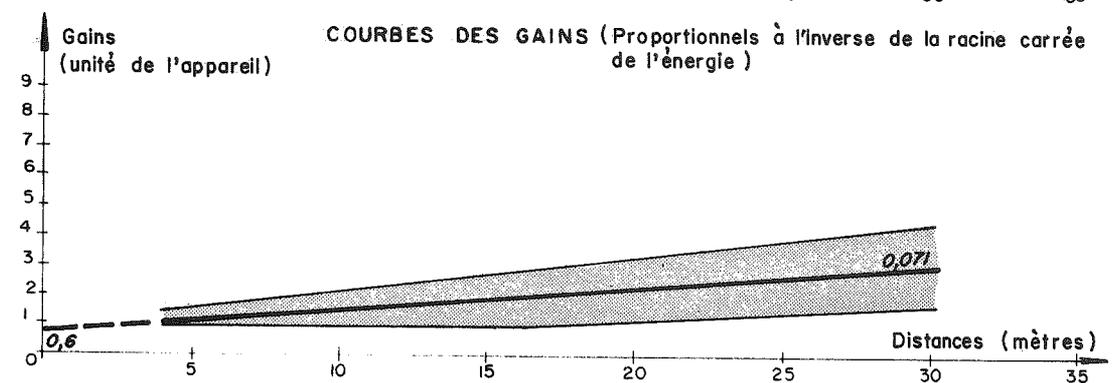
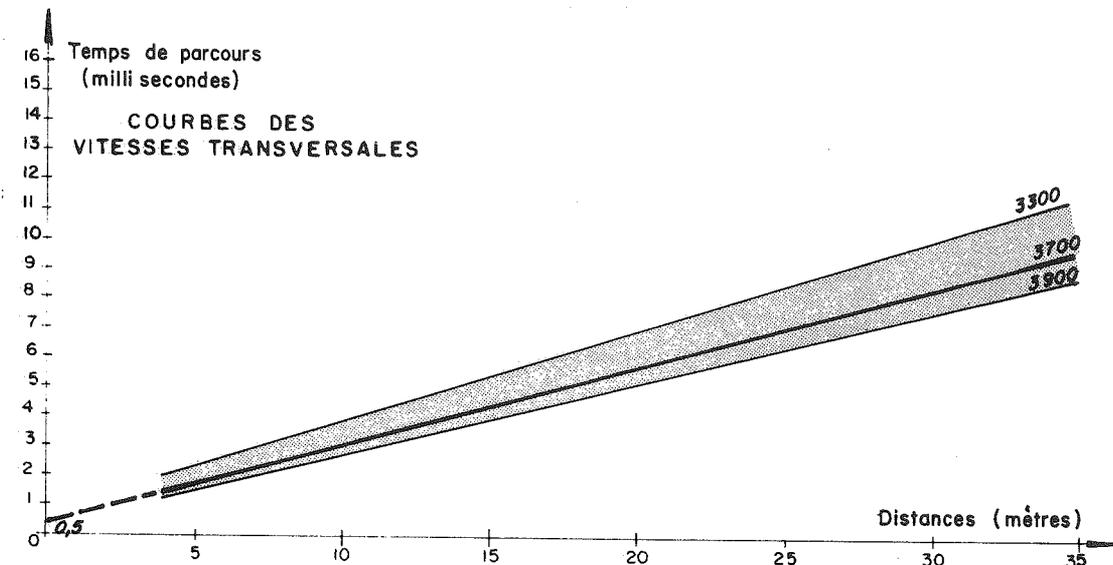
Valeurs décroissantes des pertes
d'énergie le long du profil.

(1) - Ces sites sont systématiquement repérés sur les graphiques par les numéros de la première colonne du tableau XIII,



Timbre (apprécié à l'oreille) : variable, résonne
 Vitesse longitudinale moyenne : 4 500 mètres/seconde
 Coefficient de poisson : 0,2

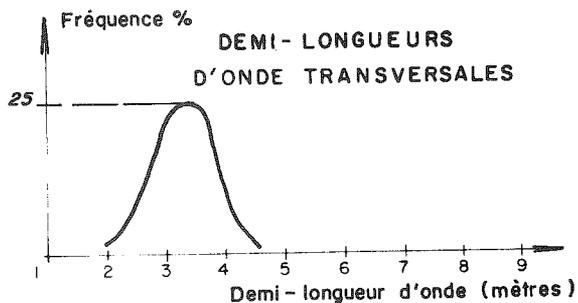
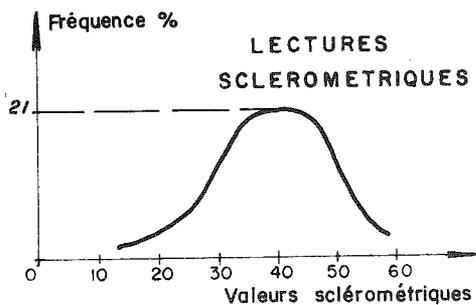
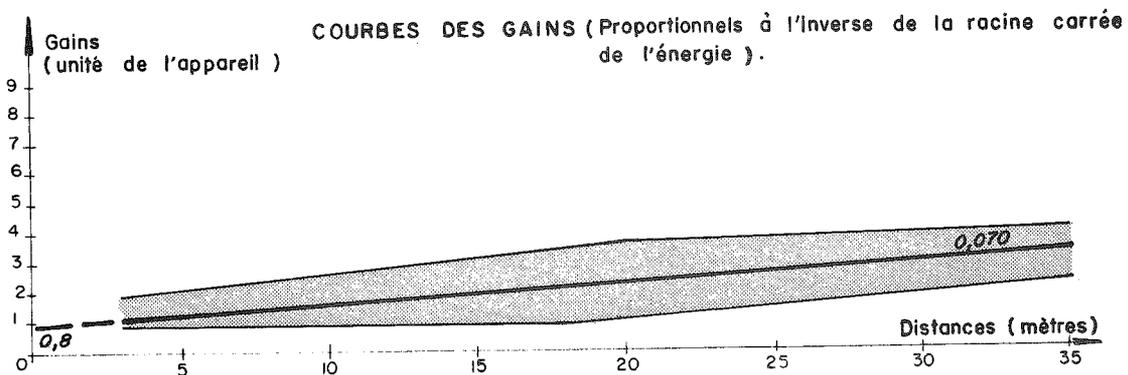
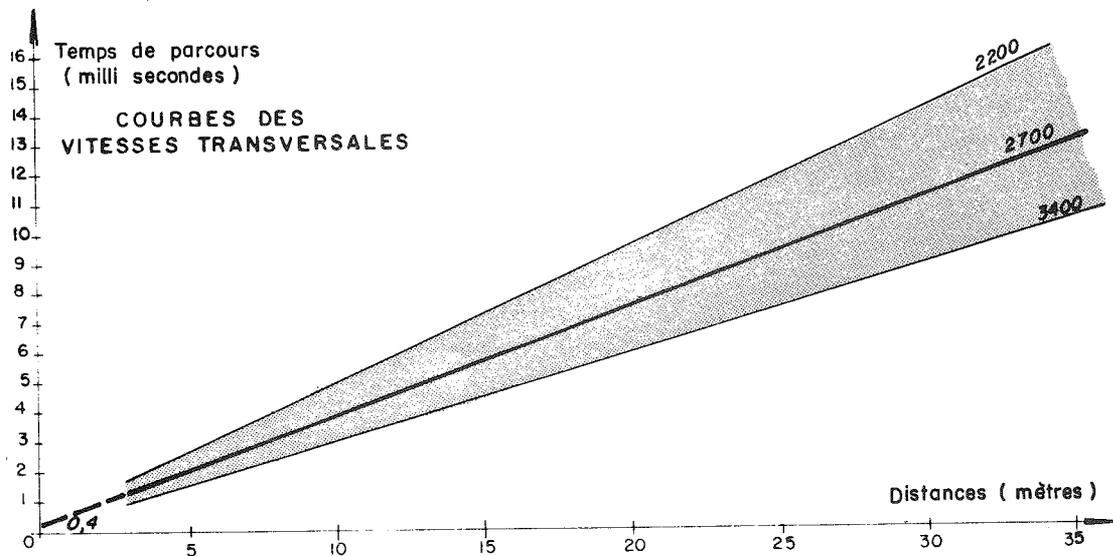
fig. 113 - BETONS DE BARRAGES EN MASSE ENTRE JOINTS (1)
 Profils sismiques



TIMBRE (apprécié à l'oreille): fêlé, ne résonne pas
 VITESSE LONGITUDINALE MOYENNE: 5700 mètres / seconde
 COEFFICIENT DE POISSON 0,18

**SITE DU BARRAGE DE VAN DER KLOOF (2)
 DOLERITE MASSIVE
 PROFILS SISMIQUES**

fig 114.



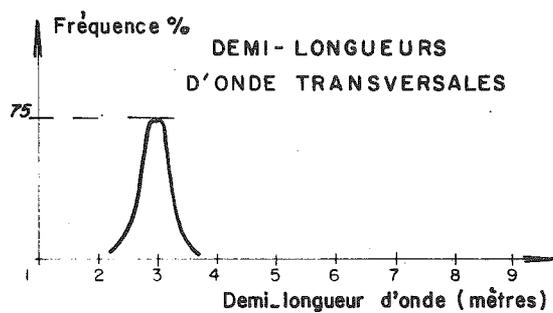
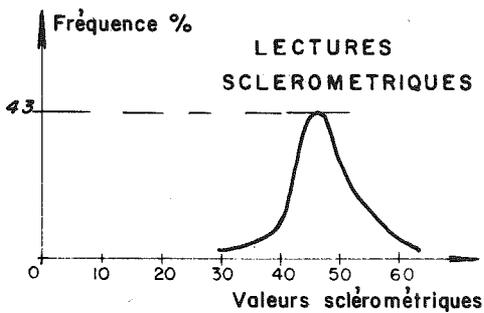
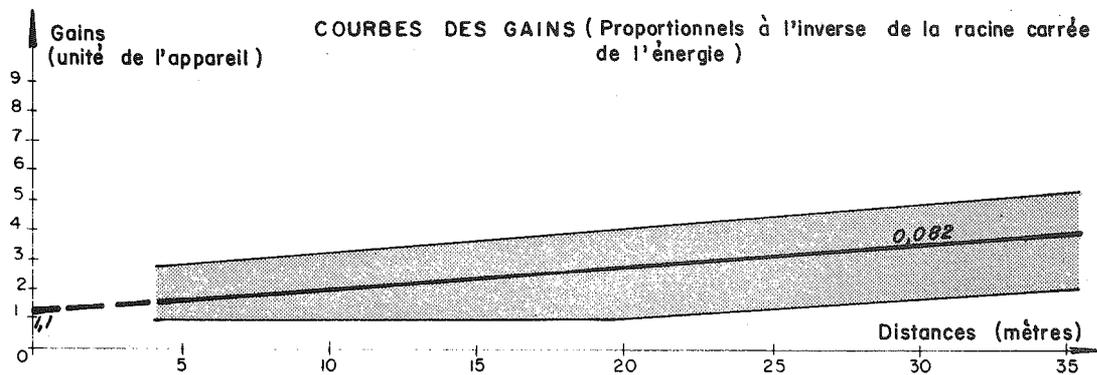
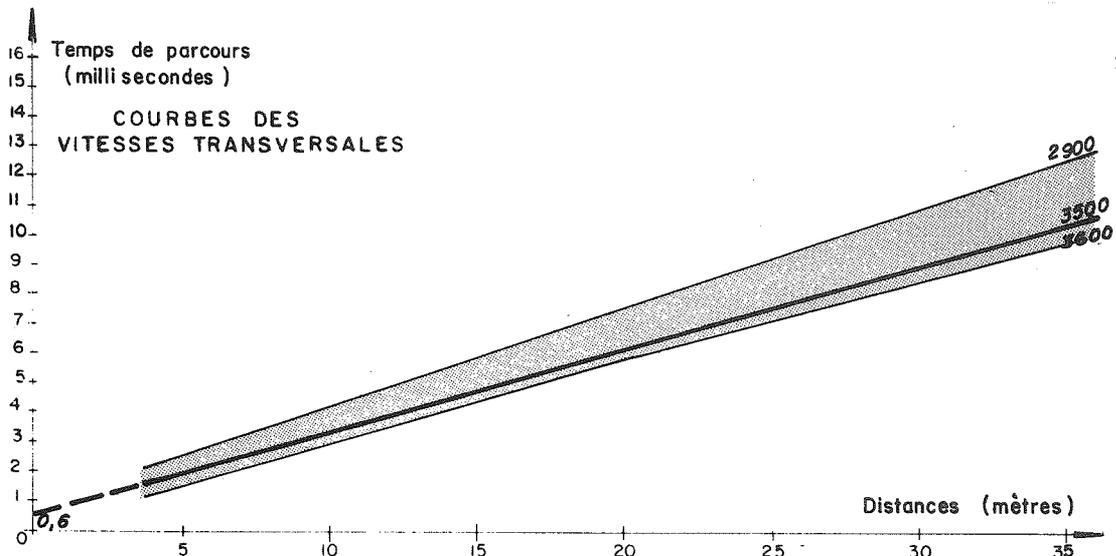
TIMBRE (apprécié à l'oreille): relativement pur, résonne
 VITESSE LONGITUDINALE MOYENNE: 5 100 mètres/seconde
 COEFFICIENT DE POISSON 0,3

SITE DU BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD (3)

ARGILITE MASSIVE

PROFILS SISMIQUES

fig 115.

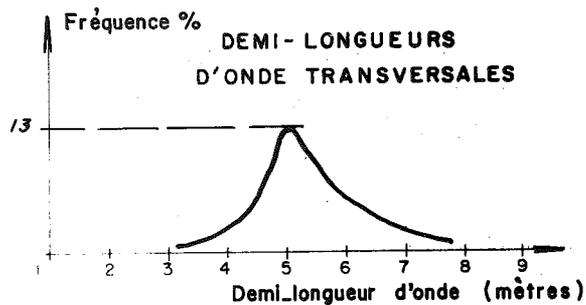
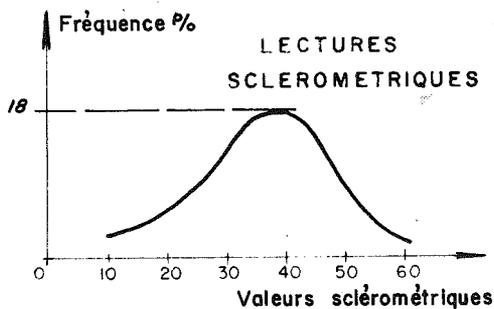
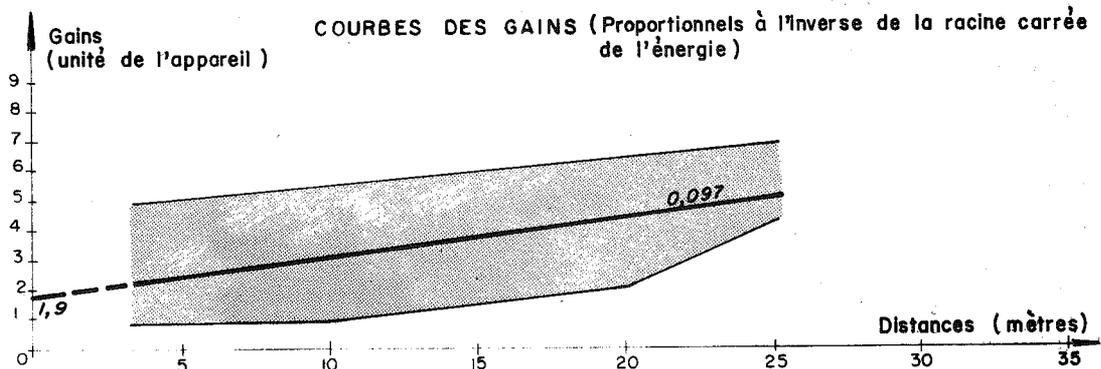
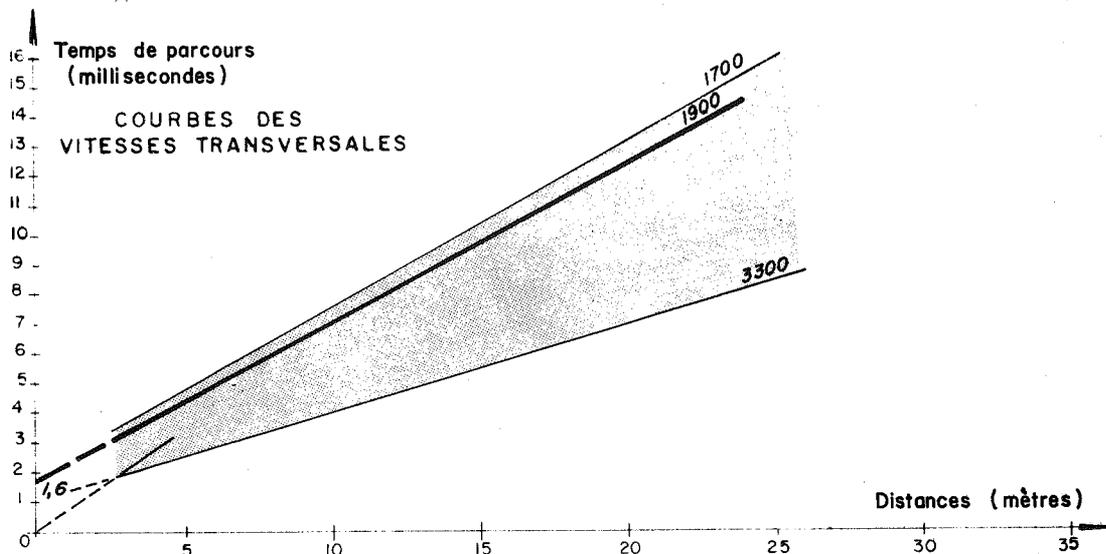


TIMBRE (apprécié à l'oreille): félé, ne résonne pas
 VITESSE LONGITUDINALE MOYENNE: 5500 mètres / seconde
 COEFFICIENT DE POISSON 0,18

SITE DU BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD (4)

DOLERITE MASSIVE
 PROFILS SISMIQUES

fig 116.



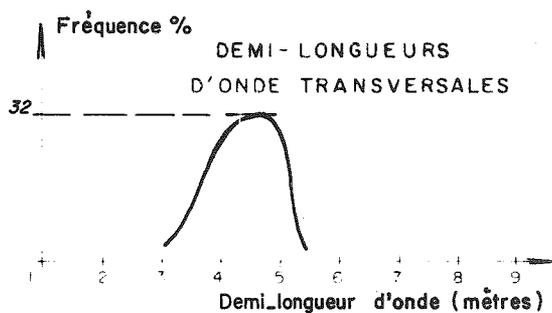
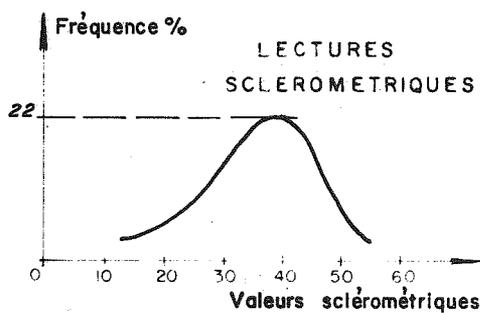
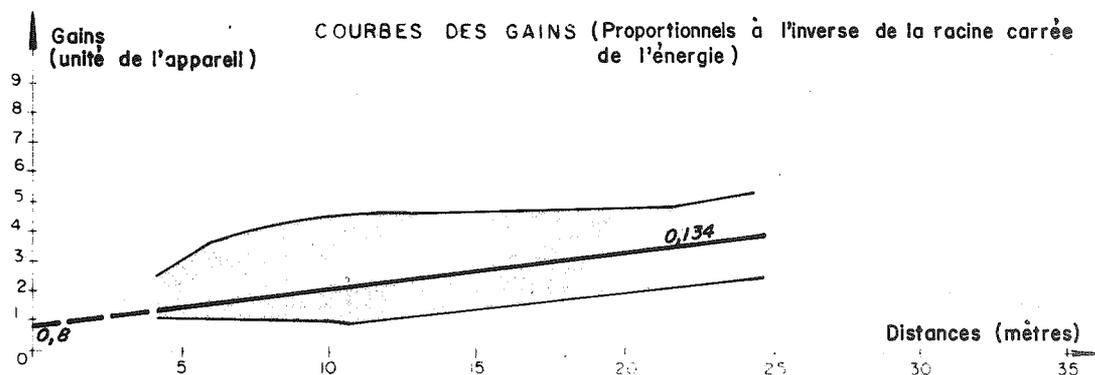
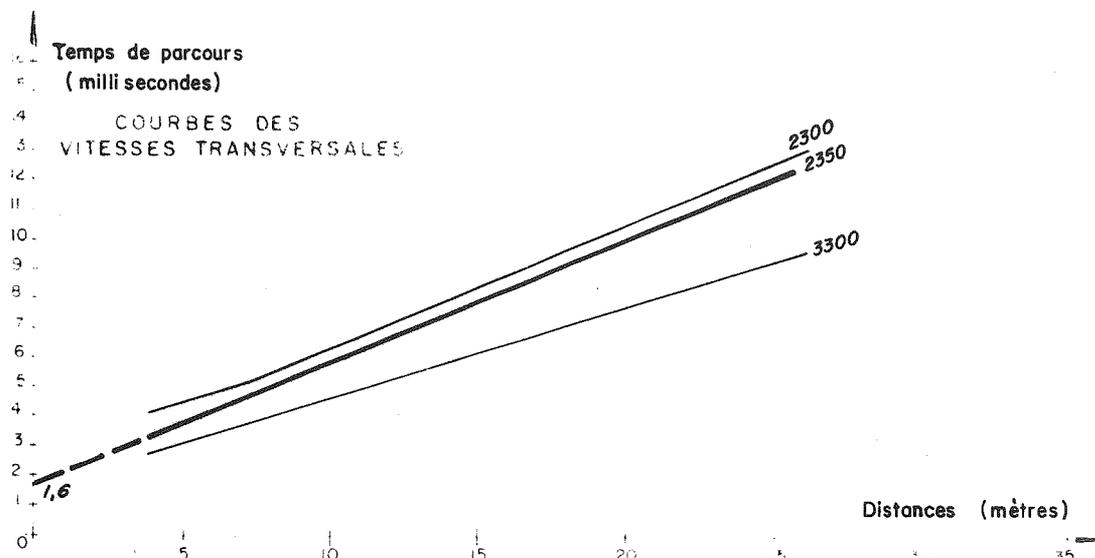
TIMBRE (apprécié à l'oreille): très pur, résonne bien
 VITESSE LONGITUDINALE MOYENNE: 3700 mètres / seconde
 COEFFICIENT DE POISSON 0,33

SITE DU BARRAGE DE MALPASSET (5)

GNEISS TECTONISÉ

PROFILS SISMIQUES

fig 117.



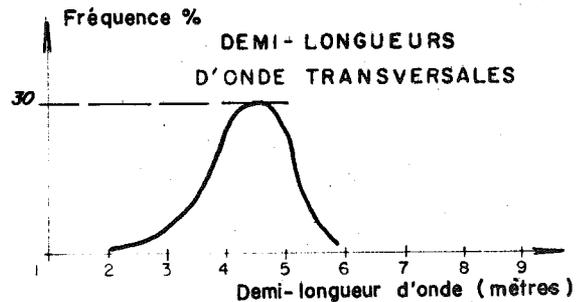
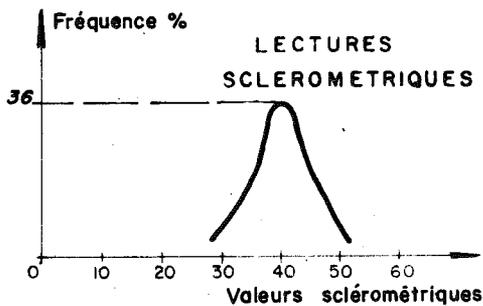
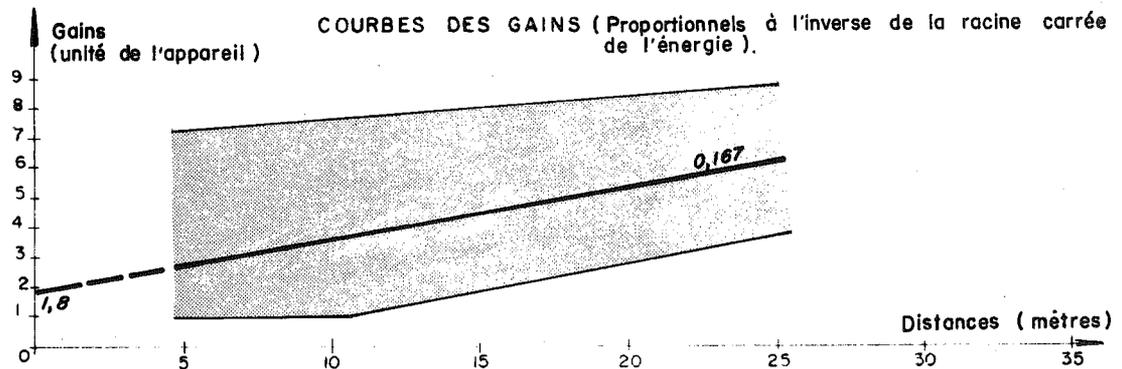
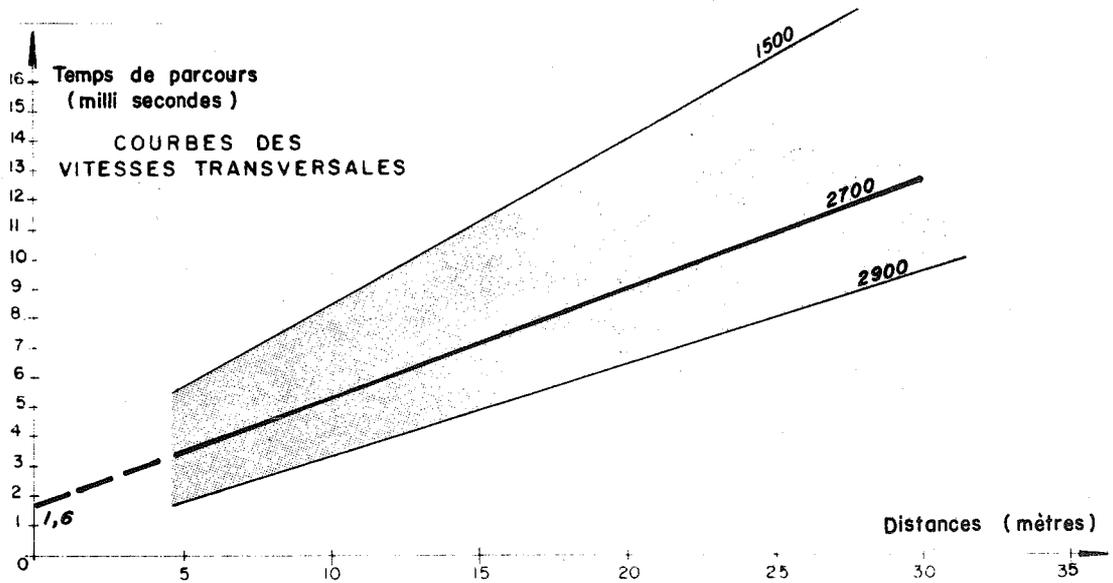
TIMBRE (apprécié à l'oreille): relativement pur, résonne bien
 VITESSE LONGITUDINALE MOYENNE: 4 400 mètres/seconde
 COEFFICIENT DE POISSON: 0,31

SITE DU BARRAGE DE ST. CASSIEN (6)

GNEISS A DEUX MICAS

PROFILS SISMOLOGIQUES

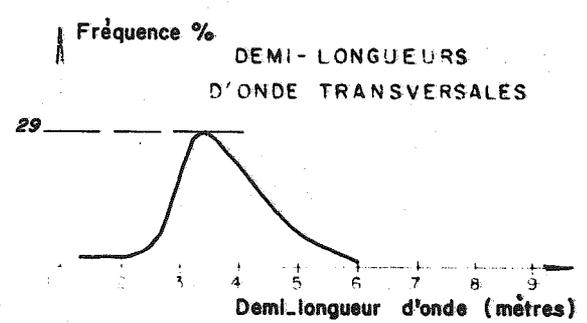
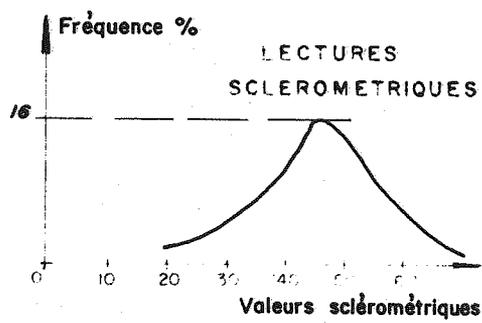
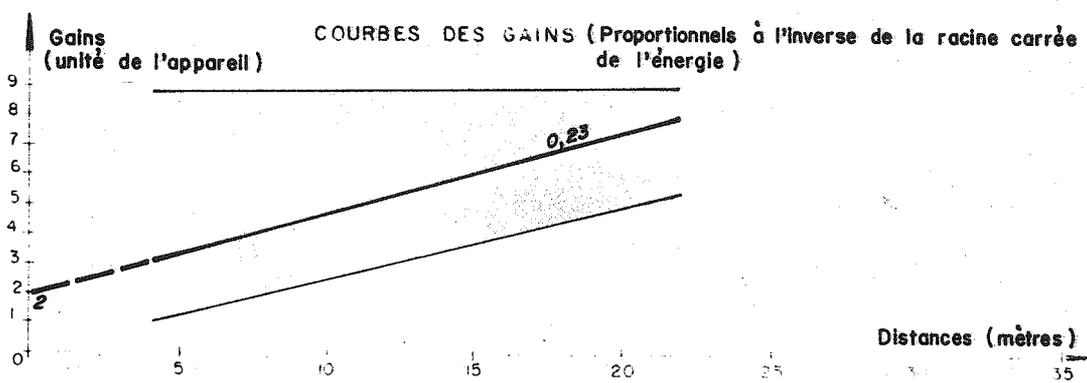
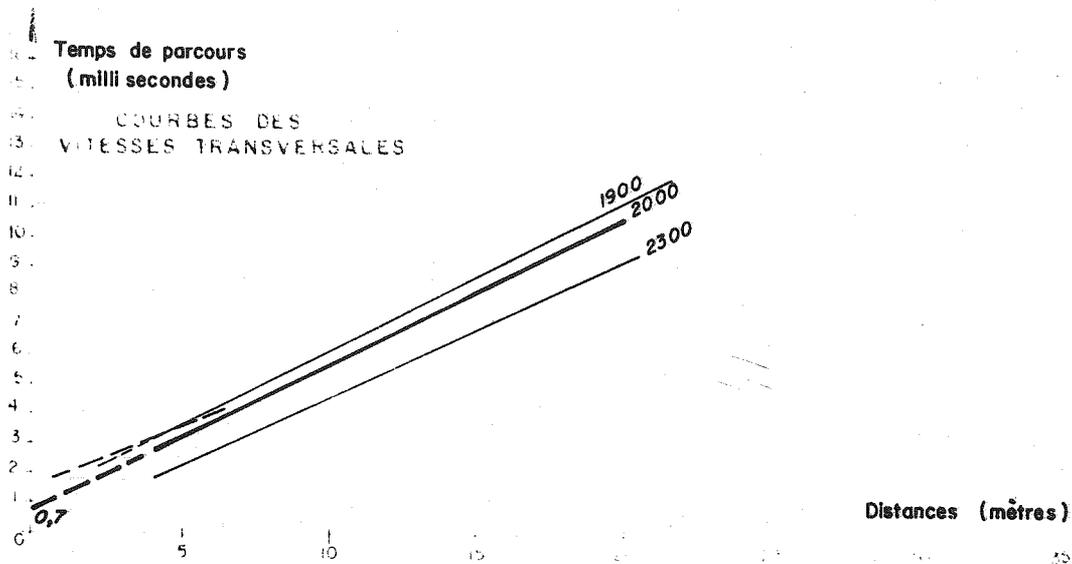
fig 118.



TIMBRE (apprécié à l'oreille): pur, résonne peu
 VITESSE LONGITUDINALE MOYENNE: 4900 mètres/seconde
 COEFFICIENT DE POISSON 0,3

SITE DU BARRAGE DE ST. JEAN DU GARD (7)
GNEISS TRÈS DIACLASÉ
PROFILS SISMIQUES

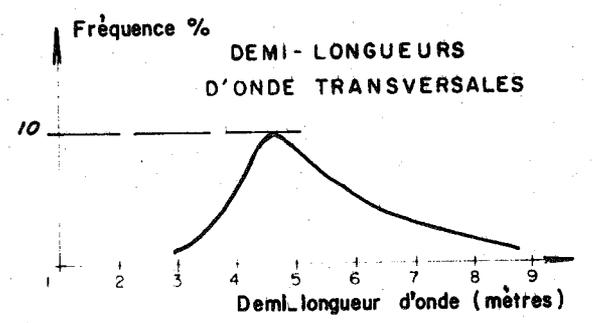
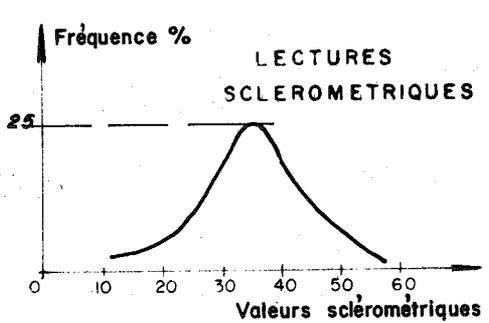
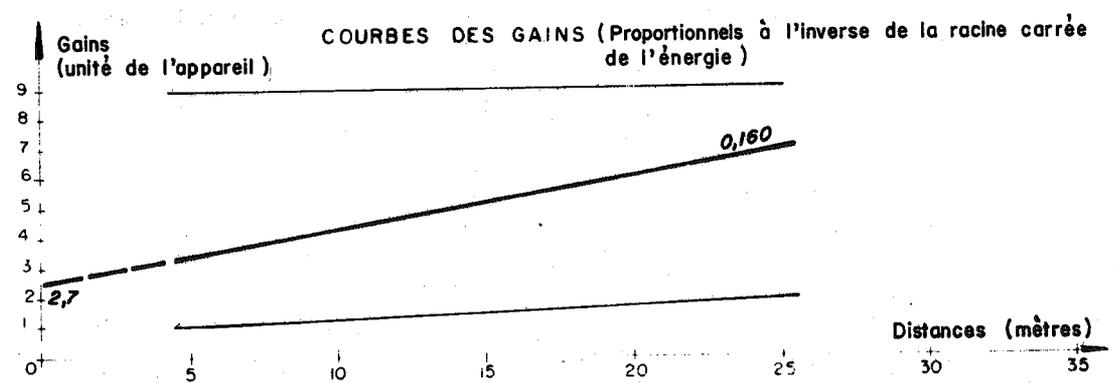
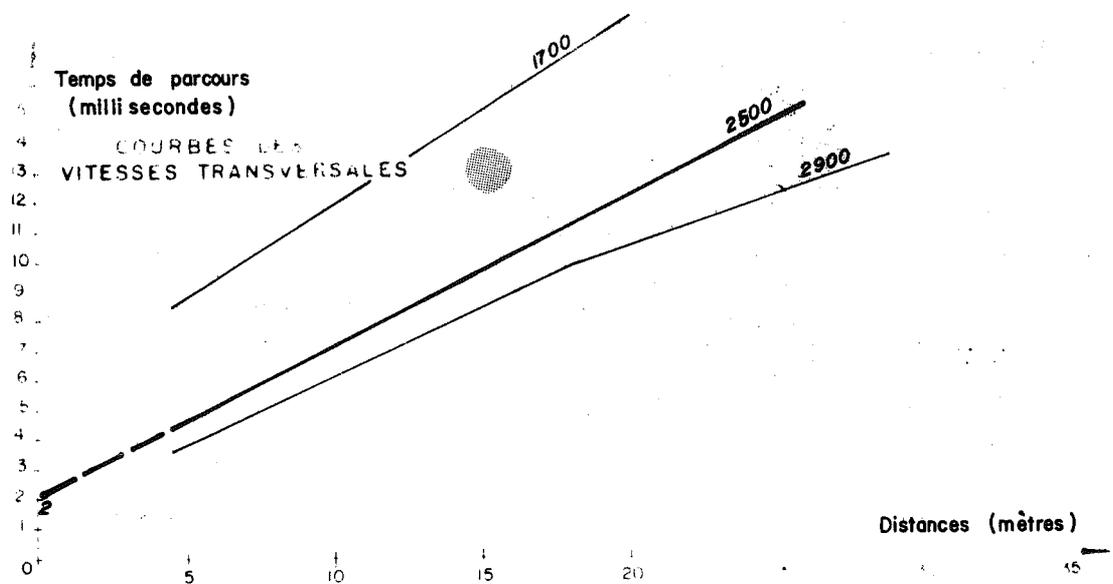
fig 119.



TIMBRE (apprécié à l'oreille) un peu fêlé, faible résonance
 VITESSE LONGITUDINALE MOYENNE 4 000 mètres /seconde
 COEFFICIENT DE POISSON 0,33

SITE DU BARRAGE DE LA GITTAZ (8)
 SCHISTES CRISTALLINS TRÈS DIACLASÉS

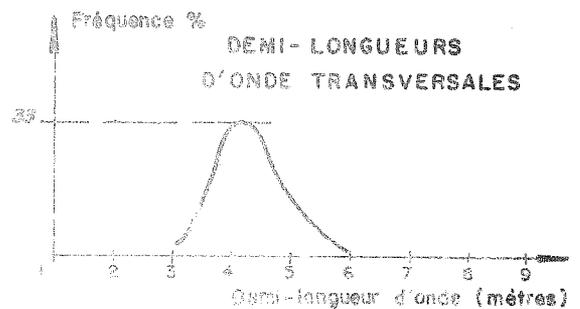
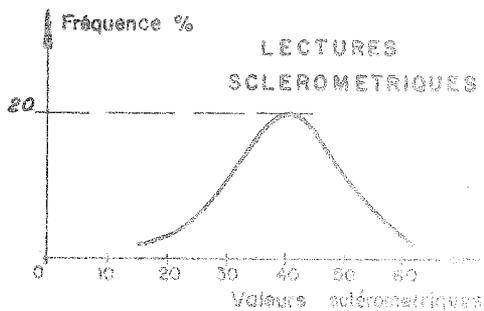
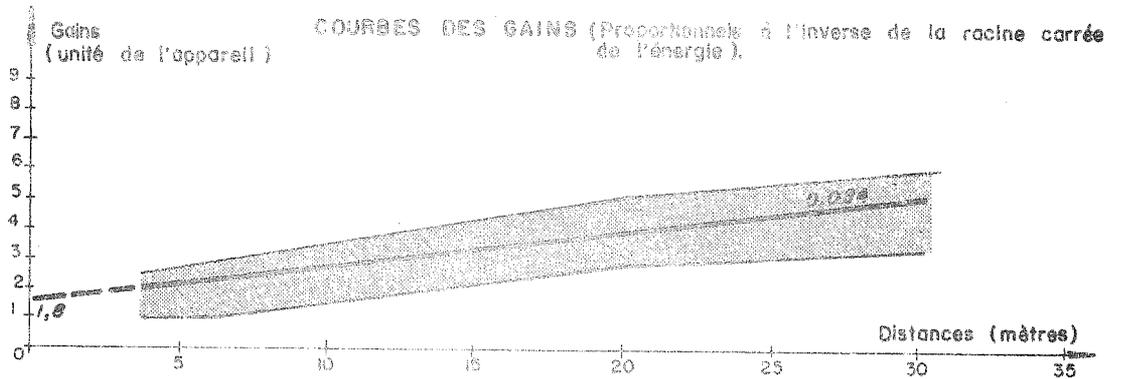
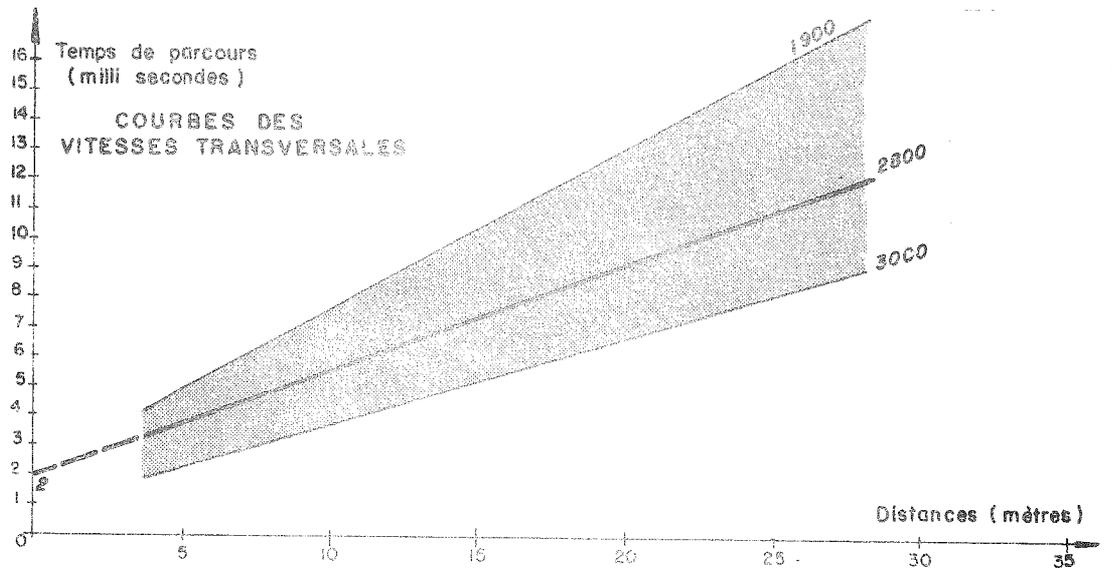
PROFILS SISMQUES
 fig 120.



TIMBRE (apprécié à l'oreille): très pur, résonne bien
 VITESSE LONGITUDINALE MOYENNE: 5 000 mètres / seconde
 COEFFICIENT DE POISSON 0,33

SITE DU BARRAGE DE KARDJALI (9)
 CALCSCHISTES TECTONISÉS
 PROFILS SISMIQUES

fig 121.

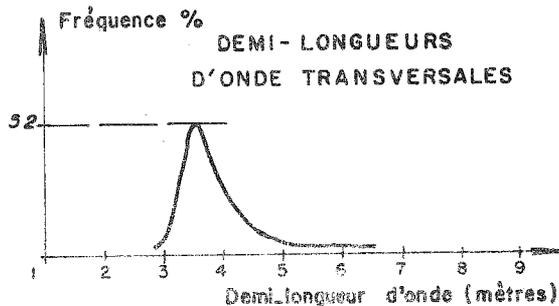
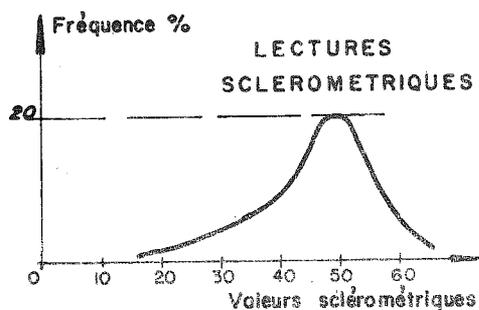
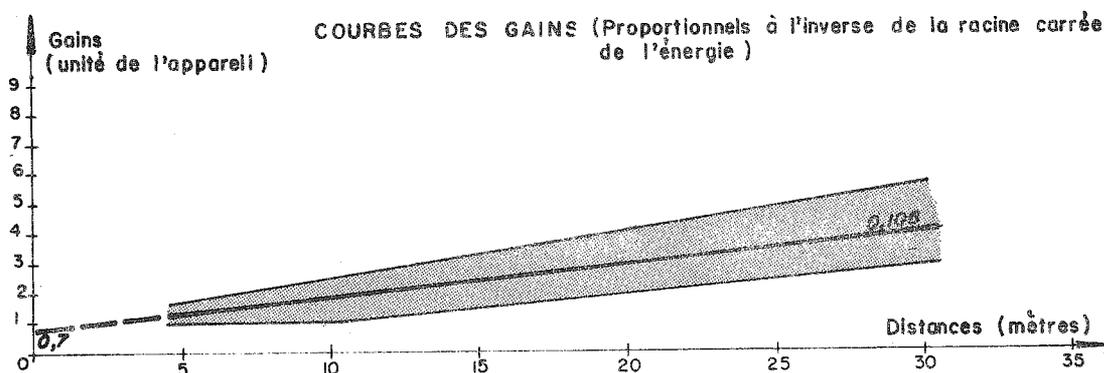
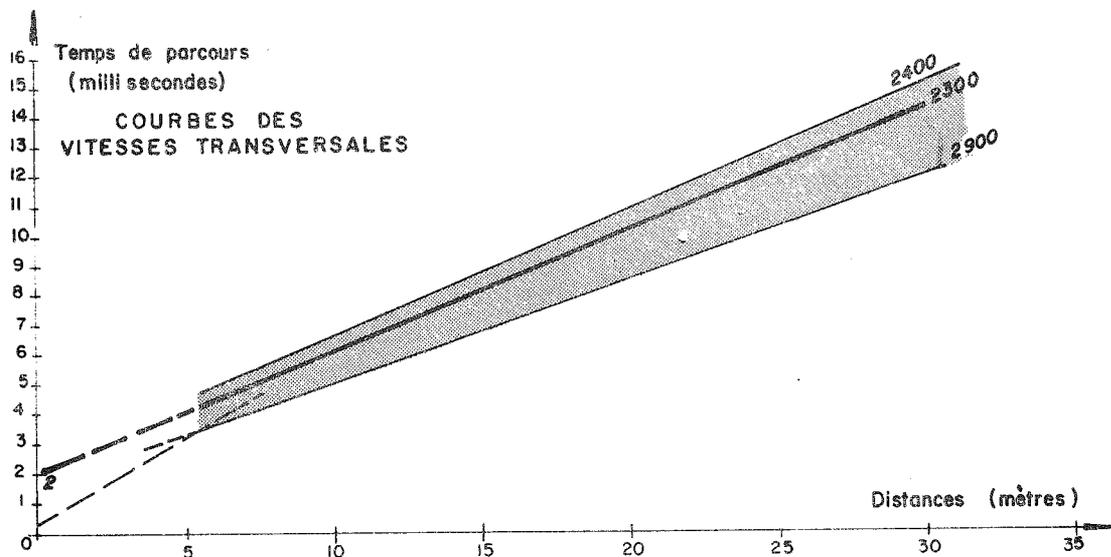


TIMBRE (apprécié à l'oreille): pur, résonne faiblement
 VITESSE LONGITUDINALE MOYENNE: 4 800 mètres / seconde
 COEFFICIENT DE POISSON 0,27

SITE DU BARRAGE DE LAMOUX (12)

SCHISTES MÉTAMORPHIQUES

PROFILS SISMiques



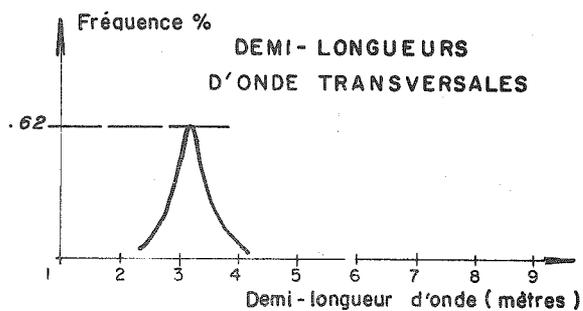
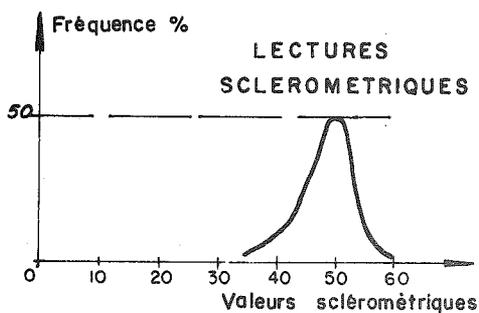
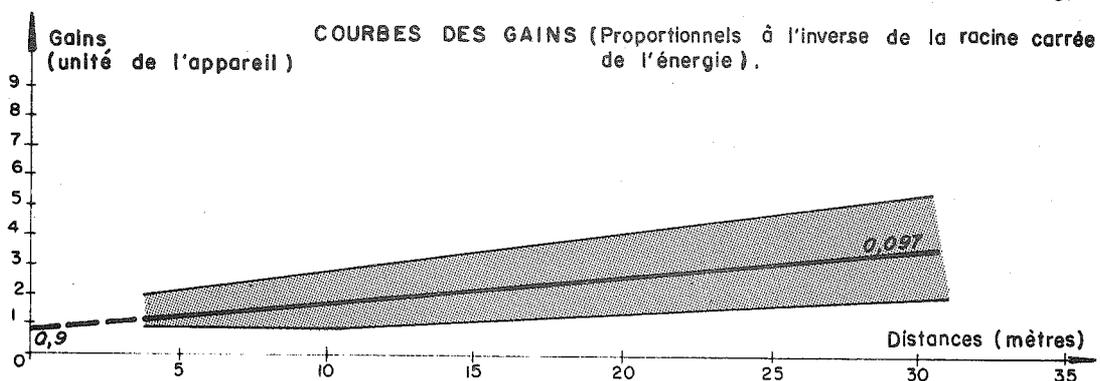
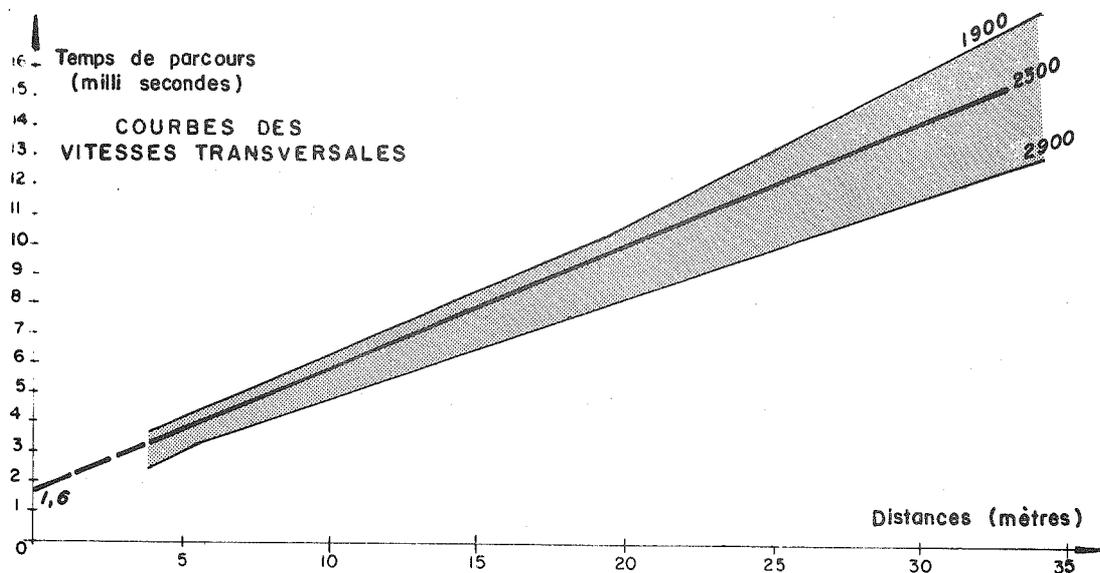
TIMBRE (apprécié à l'oreille): un peu fêlé, résonne faiblement
 VITESSE LONGITUDINALE MOYENNE: 4 200 mètres/seconde
 COEFFICIENT DE POISSON 0,3

SITE DU BARRAGE SUR L'OUED KASSEB (13)

CALCAIRES EN BANCS INCLINÉS A 60°

PROFILS SISMQUES

fig 123.



TIMBRE (apprécié à l'oreille): fêlé : résonne peu
 VITESSE LONGITUDINALE MOYENNE: 4100 mètres /seconde
 COEFFICIENT DE POISSON 0,3

SITE DU BARRAGE DE STE CROIX (15)

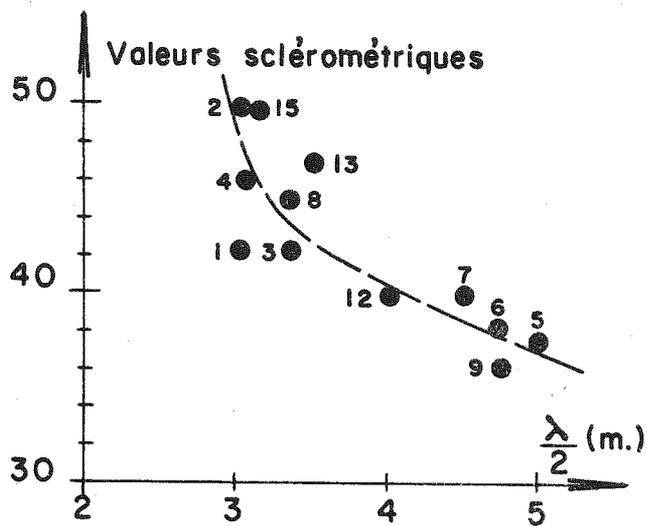
CALCAIRES EN BANCs HORIZONTALS.

PROFILS SISMQUES

fig 124.

Sites	poids spécifique ρ	V_L m/s	V_T m/s	ordonnée à l'origine de V_T (mill. sec.)	demi-longueur d'onde de V_T (mètre)	ν	Energie		E sismique (bar)	E statique (bar)	$\frac{E \text{ sismique}}{E \text{ statique}}$
							penne (unité de gain) mètre	ordonnée à l'ori- gine (unité de gain)			
1. BETONS	2,4	4.500	2.800	0	3.0	0.20	0.094	0.8	440.000	150.000	2.9
VAN DER KLOOF											
2. (dolérite)	2.9	5.700	3.700	0.5	3.0	0.18	0.071	0.6	840.000	250.000	3.3
HENDRIK VERWOERD											
3. (argilite)	2.7	5.100	2.700	0.4	3.3	0.30	0.070	0.8	500.000	140.000	3.5
HENDRIK VERWOERD											
4. (dolérite)	2.9	5.500	3.500	0.6	2.9	0.18	0.082	1.1	790.000	240.000	3.3
5. MALPASSET	2.75	3.700	1.900	1.6	5.0	0.33	0.097	1.9	260.000	20.000	13.0
6. S ^t -CASSIEN	2.75	4.400	2.350	1.6	4.6	0.31	0.134	0.8	370.000	40.000	9.2
S ^t JEAN DU GARD											
7. GARD	2.75	4.900	2.700	1.6	4.5	0.30	0.167	1.8	480.000	50.000	9.5
8. GITTAZ	2.8	4.000	2.000	0.7	3.3	0.33	0.230	2	310.000	85.000	3.6
9. KARDJALI	2.85	5.000	2.500	2	4.7	0.33	0.160	2.7	540.000		
10. BESSERVE	2.75	4.300	2.150	1.2	4.0	0.33			350.000	59.000	5.8
11. VOUGLANS	2.7	4.600	2.550	0.2	3.5	0.30			420.000	120.000	3.5
12. LANOUX	2.7	4.800	2.800	2	4.0	0.27	0.084	1.8	490.000	67.000	7.3
13. KASSEB	2.7	4.200	2.300	2	3.5	0.30	0.106	0.7	350.000	100.000	3.5
14. TACHIEN	2.8	5.100	2.700	1	4.2	0.32			500.000	80.000	6.2
15. SAINTE- CROIX	2.75	4.100	2.300	1.6	3.1	0.30	0.097	0.9	340.000		

Tableau XIII. - VALEURS DES CARACTERISTIQUES MESUREES PAR ESSAIS SISMIQUES ET STATIQUES.



RELATIONS EXPERIMENTALES ENTRE
 DEMI-LONGUEURS DE L'ONDE TRANS-
 VERSALE ET INDICES SCLEROMETRI-
 QUES (Scléromètre à bétons SCHMIDT)

fig 125.

(2)

Kardjali	}	Valeurs décroissantes des pertes d'énergie au départ.
La Gittaz		
Malpasset		
St-Jean du Gard - Lanoux		
Hendrik Verwoerd (dolérite)		
Ste-Croix		
St-Cassien - Hendrik Verwoerd (argilite)		
Béton en masse		
Kasseb		
Van Der Kloof		

La perte d'énergie au départ (2) semble très sensible à l'état de la surface du rocher. En effet, Malpasset, St-Jean du Gard, sont des sites où l'on constate une grande altération de surface et La Gittaz, Kardjali, Lanoux et même dans une faible mesure les dolérites de Hendrik Verwoerd, montrent un sensible desserrage de surface.

On retrouve le même phénomène dans les variations de l'ordonnée extrapolée à l'origine de la courbe des vitesses, sans que la coïncidence soit aussi systématique. En particulier, le site de Kasseb montre une forte ordonnée à l'origine des courbes distance-temps et une très faible ordonnée à l'origine des courbes de gain, que nous ne pouvons pas expliquer. Notons qu'il semble que la surface rocheuse ne s'altère pas avec le temps (4 années).

Les pertes d'énergie pendant le parcours (1) sont, dans une certaine mesure, influencées par la division en masse du massif : Gittaz, St-Jean du Gard, Kardjali sont, entre autres, des sites où l'on observe des discontinuités mécaniques ouvertes. Par contre, St-Cassien, Malpasset montrent une structure complexe et des signes d'altération sans que les pertes d'énergie soient parmi les plus grandes. On peut sans doute mieux approcher ce problème en comparant la liste (1) avec le graphique de corrélation expérimentale (figure 126) de la vitesse transversale et de la valeur sclérométrique. En effet, on peut voir sur le graphique une limite à droite de laquelle il n'y a plus de points représentatifs de site. De plus, tous les sites, sauf trois, sont très groupés autour de cette ligne. On peut penser qu'il y a effectivement une relation entre la valeur sclérométrique et la vitesse du son dans un milieu homogène, en particulier le béton. Donc, les points qui s'écartent de cet alignement vers la plage des valeurs sclérométriques fortes, sont représentatifs de sites ayant une matrice élémentaire dure, (à l'échelle du scléromètre, c'est-à-dire 1 à 2 dm^3), mais offrant une incertitude à de plus grandes échelles. Dans l'ordre ce sera le cas des sites :

Ste-Croix
Kasseb
La Gittaz
Malpasset

Le site de La Gittaz figure en tête de toutes les listes, on peut, dans ce cas, en trouver l'origine dans la très grande division du massif.

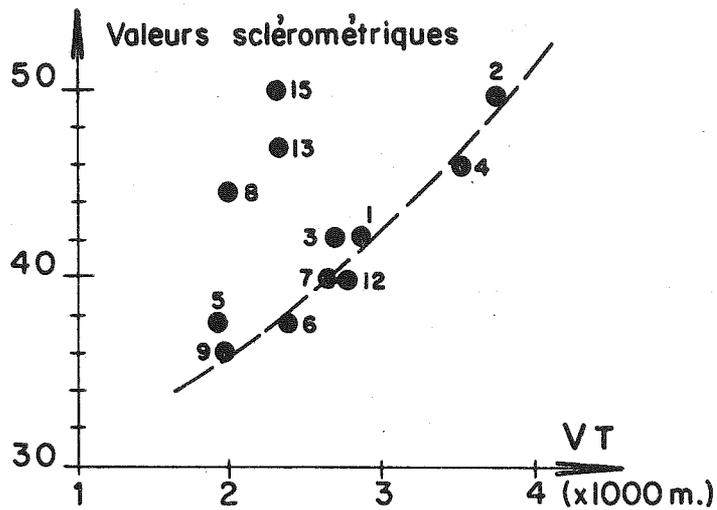
Les sites de Ste-Croix et Kasseb ont un indice sclérométrique élevé et peu de perte d'énergie durant le profil. Il peut s'agir de massifs comportant une fracturation non continue des bancs calcaires, augmentant les temps de parcours sans affecter l'énergie.

Pour les sites de St-Jean du Gard, Kardjali, St-Cassien, les pertes d'énergie peuvent être attribuées à la matrice rocheuse et sans doute aussi aux remplissages plus ou moins argileux des joints.

Au site de Malpasset, passée la frange de surface très altérée, il semble que le massif soit compact (la longueur d'onde décèle le phénomène de microfissuration).

Les sites de Van Der Kloof et Hendrik Verwoerd offrent toutes garanties de compacité.

Les changements de caractéristiques de la roche avec le temps sont mis en évidence par les mesures sismiques répétées à intervalles réguliers ; ces mesures ont été effectuées en des points précis des sites de Malpasset, Hendrik



RELATIONS EXPERIMENTALES ENTRE
 VITESSES TRANSVERSALES ET INDICES
 SCLEROMETRIQUES (Scléromètre à bétons
 SCHMIDT.)

fig 126.

Verwoerd et Van Der Kloof. Dans le cas des sites de Hendrik Verwoerd et Van Der Kloof, nous n'avons constaté aucun changement : l'ordonnée des courbes de gain reste constante. Les parois de la galerie sont saines et aucune chute de pierre, même dans les argilites, n'a été observée. Par contre à Malpasset, nous avons constaté une augmentation des ordonnées des courbes de gain, en même temps qu'une dégradation des surfaces mesurées. Ceci est à rapprocher des résultats observés en étudiant les lames minces (chapitre B, II.3.) où nous avons vu qu'un bloc de gneiss de Malpasset soumis à des cycles eau-air se microfissurait.

2.65. Module de déformation.

2.651.

On sait que l'utilisation des formules de l'élasticité permettait de relier module de Young, coefficient de Poisson et vitesses transversale et longitudinale. Nous nous servons de ces formules tout en notant bien qu'elles sont théoriquement inapplicables, le milieu étant anisotrope, non continu et non idéalement élastique ; mais puisqu'il s'agit de comparaison de sites entre eux, les approximations que l'on peut faire sont plus ou moins les mêmes.

A l'aide des vitesses de propagation de l'onde longitudinale et transversale, on calcule le coefficient de Poisson du site, et le module de Young dit module sismique.

Ce processus de calcul est très souvent utilisé, mais il demande à être analysé avant toute conclusion. Nous avons vu que le module sismique s'obtenait par l'une ou l'autre des formules suivantes :

$$E \text{ sismique} = \frac{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}{1 - \nu} V_L^2 = 2(1 + \nu) V_T^2$$

Les courbes de la figure 127 traduisent en graphique les relations :

$$A = \frac{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}{1 - \nu}$$

$$B = 2(1 + \nu)$$

$$\text{et } \nu = \frac{\alpha^2 - 2}{2(\alpha^2 - 1)} \quad \text{où } \alpha = \frac{V_L}{V_T}$$

On peut constater qu'une très faible variation de $\alpha = \frac{V_L}{V_T}$, compris pratiquement entre 1,5 et 2, entraîne une très grande variation de ν coefficient de Poisson. Il faut donc mesurer V_L et V_T avec beaucoup de soin pour calculer ν et se garder d'employer un coefficient de Poisson arbitraire comme c'est fréquemment le cas.

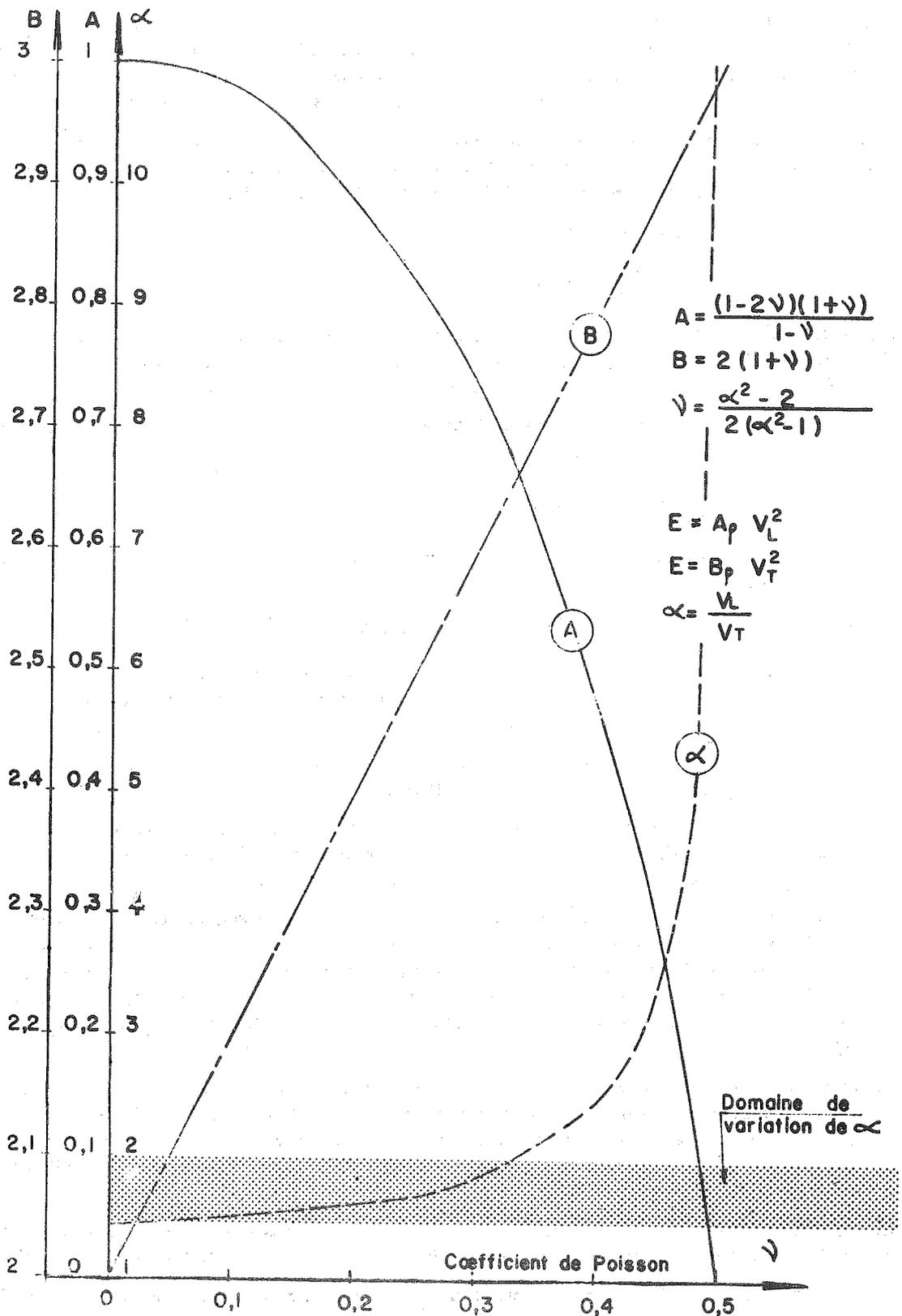
On constate trop souvent que les seules vitesses mesurées sont les vitesses longitudinales. Si on choisit arbitrairement ν , les modules sont alors connus à 20% près (en admettant que ν peut être compris entre 0,15 et 0,30). En plus, on peut se demander parfois s'il n'y a pas eu confusion des deux vitesses, ce qui donne alors une erreur relative de 100 à 300%.

Dans ce travail, nous analysons des modules calculés à partir des deux vitesses toujours mesurées. Dans la mesure du possible, nous avons exécuté des profils sismiques dans les galeries où ont lieu des essais statiques du type essais au vérin ou essais en galerie en charge.

Le tableau XIII donne les valeurs moyennes obtenues pour 15 sites prospectés par petite sismique.

Dans 13 de ces cas, nous avons à notre disposition les résultats d'une campagne d'essais statiques exécutés par les soins d'E.D.F. (sites 5 - 6 - 8 - 10 - 11 - 12), par le C.E.B.T.P. (site 7), sous notre direction (sites 2 - 3 - 4 - 14), ou par une compagnie soviétique (site 13).

Nous avons retenu pour le module de déformation élastique statique, les valeurs obtenues pour de faibles contraintes puisque l'essai sismique met également en jeu de faibles contraintes. Il serait toutefois imprudent de considérer le premier cycle de l'essai au vérin car l'essai n'intéresse alors que la peau de la galerie, alors que



RELATIONS ENTRE COEFFICIENT DE POISSON
 ET VITESSES DE TRANSMISSION D'ONDES SONIQUES
 fig 127.

l'essai sismique intéresse une zone plus profonde. Nous avons donc examiné les courbes de variation des coefficients de déformation tracées à l'occasion des essais au vérin (chapitre B, III, 1.) et retenu comme contrainte maximale pour le calcul du module, la contrainte à partir de laquelle la courbe devient sensiblement horizontale, c'est-à-dire la valeur au-delà de laquelle la déformation est sensiblement linéaire en fonction de la pression.

Nous avons considéré, pour chaque site, la moyenne des modules sismiques et statiques disponibles ; il ne faut pas toutefois considérer les chiffres obtenus comme représentatifs du site dans son ensemble, mais plutôt représentatifs de certains volumes élémentaires du site dans lequel ont été faits les essais,

Les valeurs du rapport :

$$\frac{E \text{ sismique}}{E \text{ statique}} \text{ vont de } 2,9 \text{ à } 13.$$

H. LINK (1964) donne des exemples où ce même rapport varie de 1,4 à 16,6; les plus fréquents variant de 3 à 10. ONODEKA (1963) donne un tableau de valeurs comparées d'où il ressort des rapports variant de 3 à 11. Il trouve, pour un site donné, une relation expérimentale entre E sismique et E statique,

La figure 128 montre pour nos résultats et ceux d'ONODEKA, les relations entre ces modules ; les points représentatifs sont situés à gauche d'une droite :

$$\frac{E \text{ sismique}}{E \text{ statique}} = 2,5$$

Les sites compacts sont groupés au voisinage de la droite, les sites de plus en plus jointés ou altérés s'en éloignent de plus en plus.

Si nous portons sur un graphique les valeurs $K = \frac{E \text{ sismique moyen}}{E \text{ statique moyen}}$ en fonction de la longueur d'onde moyenne transversale, nous voyons apparaître une corrélation satisfaisante (figure 129). On trouve également une bonne corrélation entre E statiques et fréquences de l'onde transversale (figure 130) alors qu'il n'en existe pas entre E sismiques moyens et longueurs d'onde ou fréquences.

Signalons que D. DEERE (1966) corrèle expérimentalement K avec le pourcentage de carottage obtenu par des sondages dans des conditions spéciales parfaitement normalisées.

Si, comme il est classique de le faire, on relie fracturation et fréquence, on est conduit à penser que les modules statiques donnés par l'essai au vérin sont essentiellement représentatifs de la fracturation du massif et que les modules sismiques sont plus directement liés à l'élasticité de la matrice.

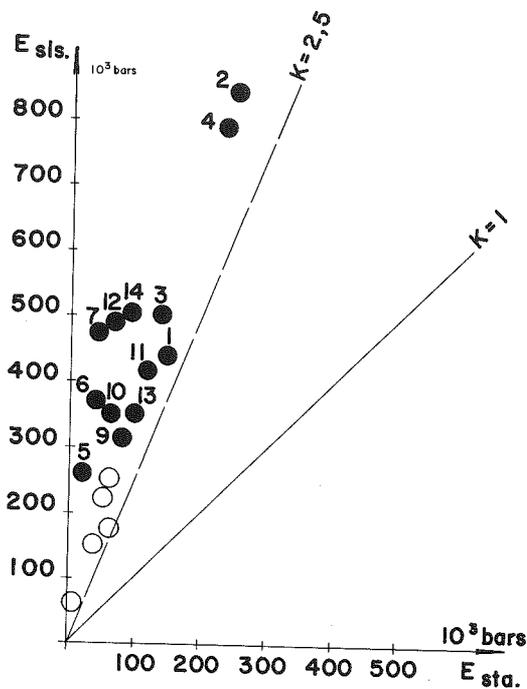
Toutefois, comme nous n'avons pas vu de corrélation entre fréquence (donc longueur d'onde) et distance d'une part, et entre fréquence et perte d'énergie d'autre part, il semble donc que la comparaison des résultats d'essais statiques et sismiques dépend d'un autre facteur que la simple fracturation. Au cours des mesures statiques, les cycles de mise en pression sont effectués sensiblement toutes les demi-heures ; au cours des essais sismiques, les fréquences sont au contraire de plusieurs centaines de cycles par seconde. C'est le temps qui différencie les deux types d'essais.

L'influence du temps a été souvent analysée. Pour cela, on distingue usuellement, soit la vitesse de la mise en charge au cours d'un essai dit statique ou la fréquence des tensions alternées au cours d'un phénomène dynamique. SUSTRUNCK (1956) par exemple avance qu'en dessous de 1 à 2 cps, il résulte des modules dynamiques 20 à 30% inférieurs à ceux obtenus avec des fréquences de quelques centaines de cps alors qu'il y a peu de différence entre 500 cps et plusieurs milliers de cps.

Dans les cas que nous étudions, les modules dits statiques ont été obtenus avec des essais durant plusieurs heures et les fréquences donnant les modules sismiques sont supérieures à 100, le temps doit donc être très influent.

LANGER (1965) et BUCHHEIM (1961) ont bien étudié ce phénomène. Ils définissent un certain nombre de modèles mathématiques susceptibles de représenter en première approximation la loi de matière des corps rocheux. Nous en donnons très sommairement les principaux :

- Le corps de Hooke est le modèle d'un milieu idéalement élastique dans lequel contraintes et déformations sont reliées linéairement,



- ⁶ Essai cité dans le texte avec référence au tableau
- Essai fait par F. Onodeka

RELATION EXPERIMENTALE ENTRE MODULES DE DEFORMATION ELASTIQUE STATIQUES ($E_{sta.}$) ET SISMQUES ($E_{sis.}$) OBTENUS IN SITU

fig 128.

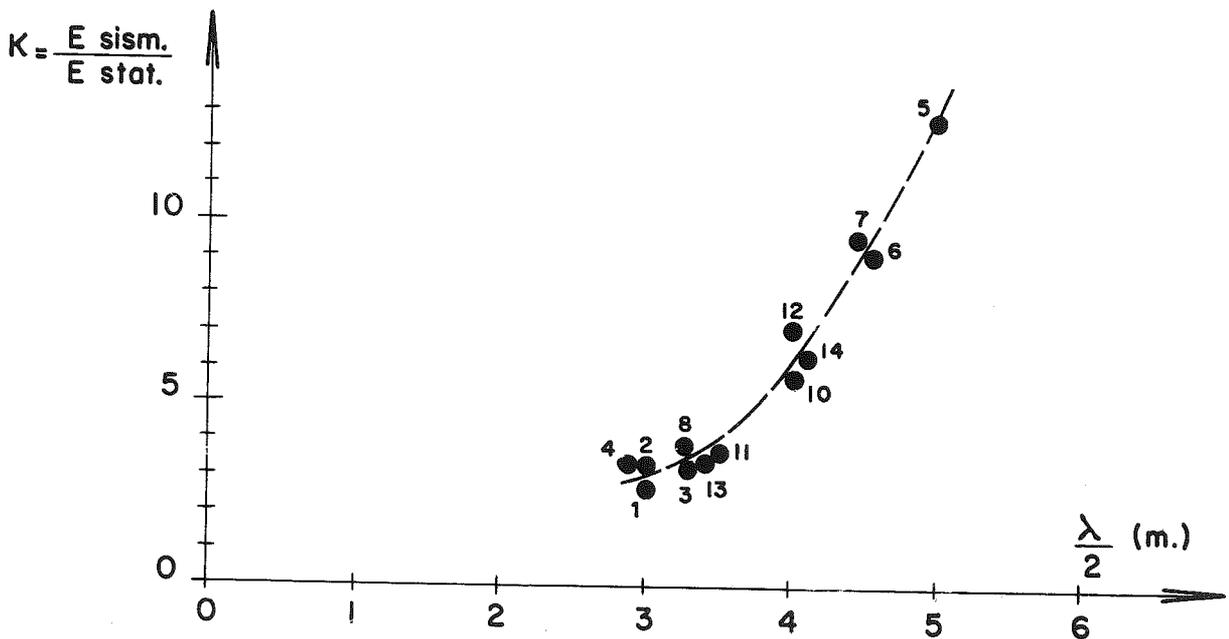
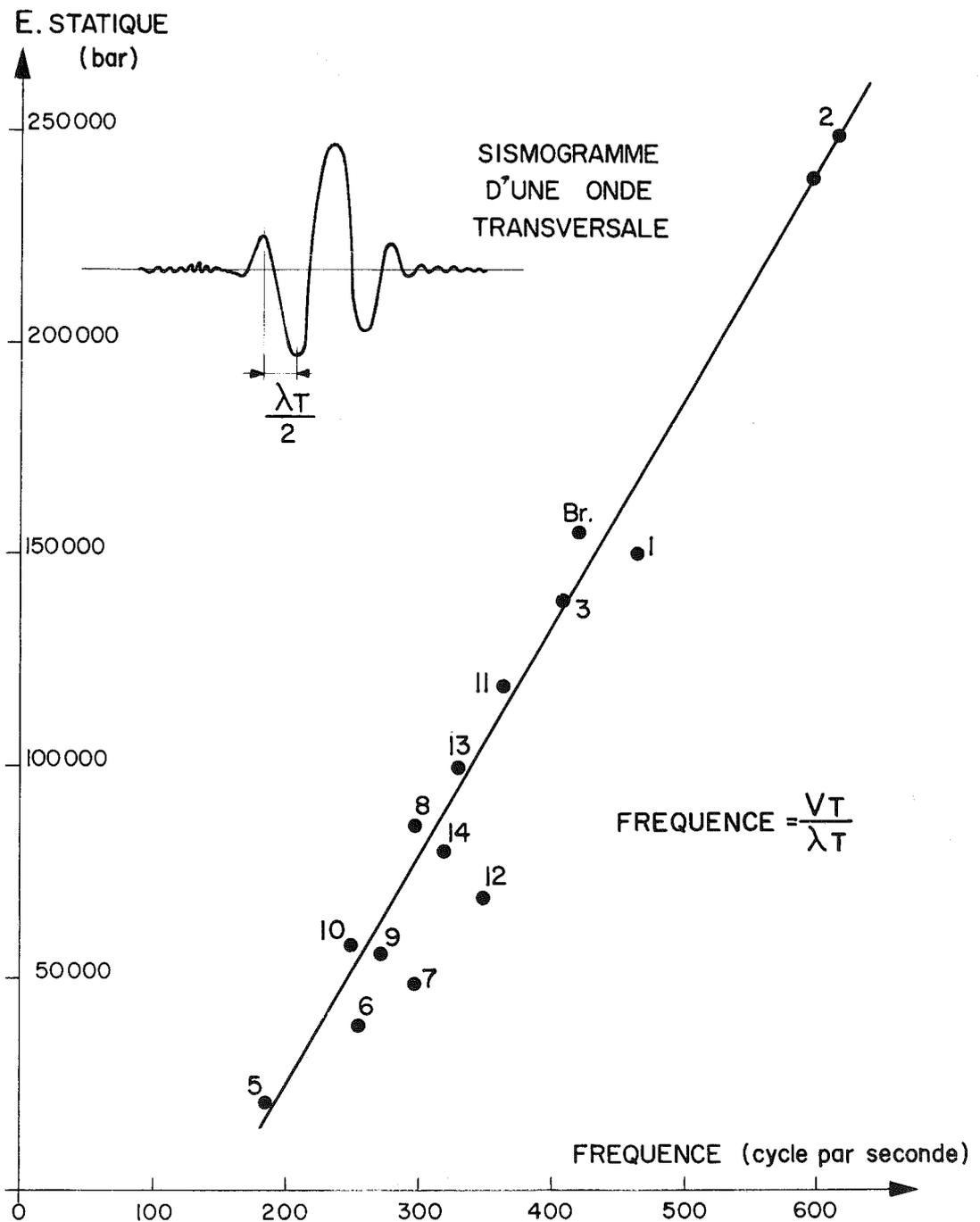


fig 129. RELATIONS EXPERIMENTALES ENTRE MODULES DE DEFORMATION ELASTIQUE (SISMQUES ET STATIQUES) ET DEMI-LONGUEURS DE L'ONDE TRANSVERSALE.



RELATION EXPERIMENTALE ENTRE
LE MODULE STATIQUE MESURE AU VERIN
ET LA FREQUENCE DE L'ONDE TRANSVERSALE

fig 130.

- Le corps de Maxwell est un modèle de fluide dans lequel, au repos, peuvent exister des contraintes non hydrostatiques passagères disparaissant avec le temps (relaxation).
- Le corps de Newton est un modèle de fluide visqueux.
- Le corps de Kelvin résulte de la combinaison d'un corps de Hooke et d'un corps de Newton.
- Le corps de Nakamura résulte de la combinaison d'un corps de Hooke et d'un corps de Kelvin.

On peut représenter graphiquement la relation liant dans le temps les déformations et les contraintes - sous forme tensorielle - (figure 131).

Dans le corps de Hooke, la déformation suit instantanément et linéairement la tension (point A) ; au bout d'un temps très court (A_1), la déformation et la contrainte n'ont pas changé, car elles sont indépendantes du temps.

Dans le corps de Kelvin, pour un temps très petit on aurait, par l'application d'une contrainte donnée, des déformations infiniment petites, d'où des modules d'élasticité infinis qu'on ne mesure jamais en pratique.

Dans le cas du corps de Nakamura, en un temps très court (essais dynamiques), on obtiendra une relation contrainte-déformation du type de Hooke et ensuite une relation complémentaire du type Kelvin avec le temps.

On vérifie qu'il est impossible, lors d'un essai statique lent, d'obtenir une valeur d'un module d'élasticité puisque le point mesuré C2 représente la somme de deux phénomènes dont un n'est pas élastique. Les valeurs obtenues ne sont que des approximations assez grossières. Nous continuerons à les utiliser cependant, mais seulement comparées entre elles. La différence entre les valeurs des essais statiques et des essais sismiques peut représenter la part des phénomènes non élastiques dans les déformations et on peut alors vérifier la corrélation existant entre cette différence et la déformation résiduelle obtenue lors des essais au vérin (figure 132).

2.7. Conclusion

La méthode sismique de reconnaissance d'un massif rocheux est en général moins lourde que d'autres types d'essais, mais elle nécessite un matériel et une compétence qui en font presque toujours une affaire de spécialiste. Nous avons voulu aborder ce problème surtout par l'expérience en usant d'un matériel peu coûteux et léger. Nous avons pallié le manque de puissance des moyens mis en oeuvre par l'utilisation d'une méthode normalisée au maximum, employée comparativement sur le plus de sites possibles.

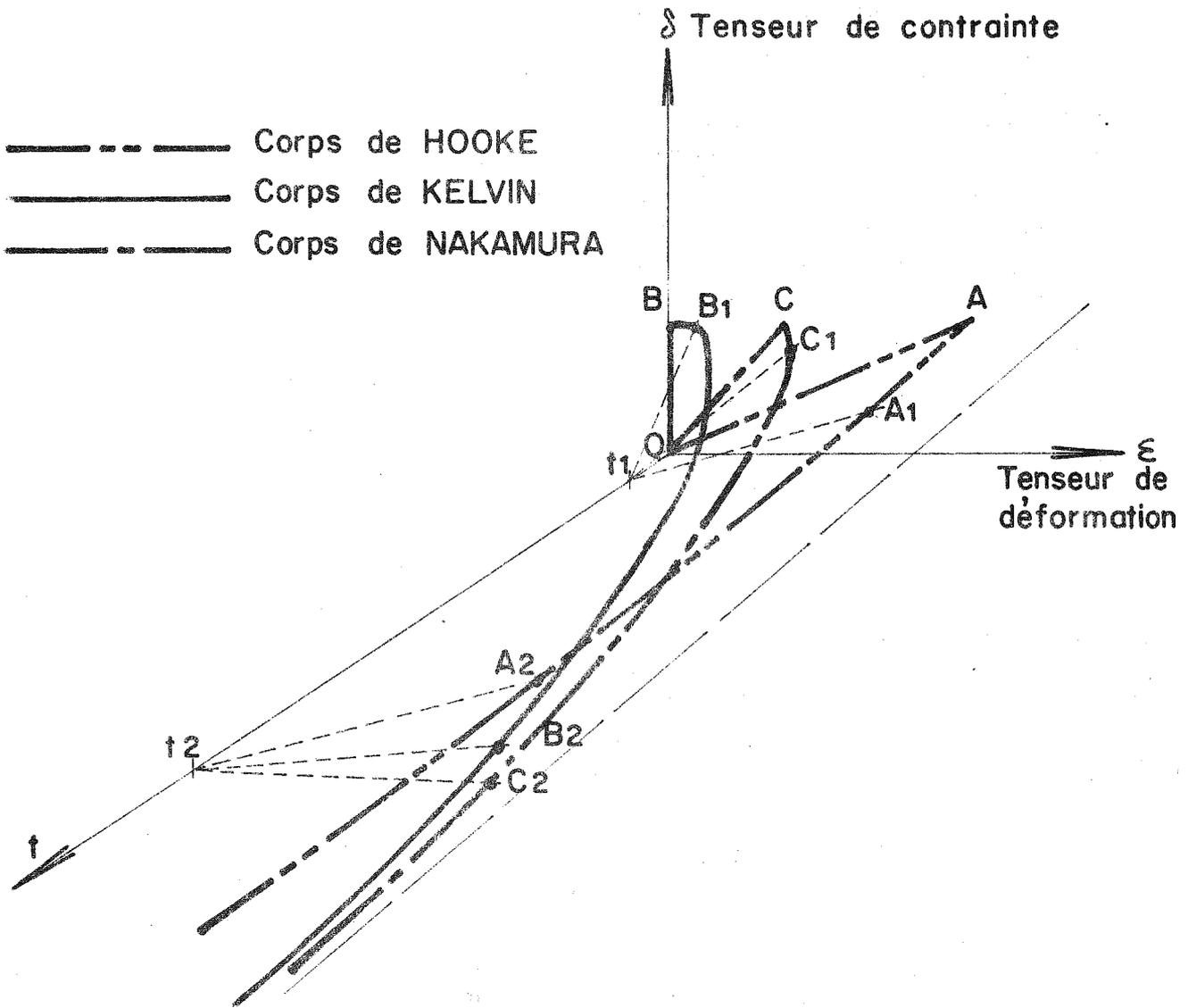
A la suite de campagnes d'essais effectuées sur de nombreux types de roches ainsi que sur du béton en place, un certain nombre de points peuvent être précisés quant à l'utilisation de la petite sismique dans l'étude des fondations de barrages.

a) - Dans le calcul d'un module d'élasticité sismique, il est nécessaire de connaître la valeur des deux vitesses, longitudinale et transversale, de propagation des ébranlements dans le terrain. Si on n'en mesure qu'une et à condition de savoir laquelle, on peut calculer le module sismique avec un coefficient de Poisson supposé, l'erreur faite pouvant atteindre 20% par rapport à la valeur réelle.

b) - Avec beaucoup de prudence, on peut estimer l'ordre de grandeur du module de déformation statique que l'on pourrait obtenir par des essais au vérin, en utilisant la corrélation expérimentale établie entre modules et longueur d'onde.

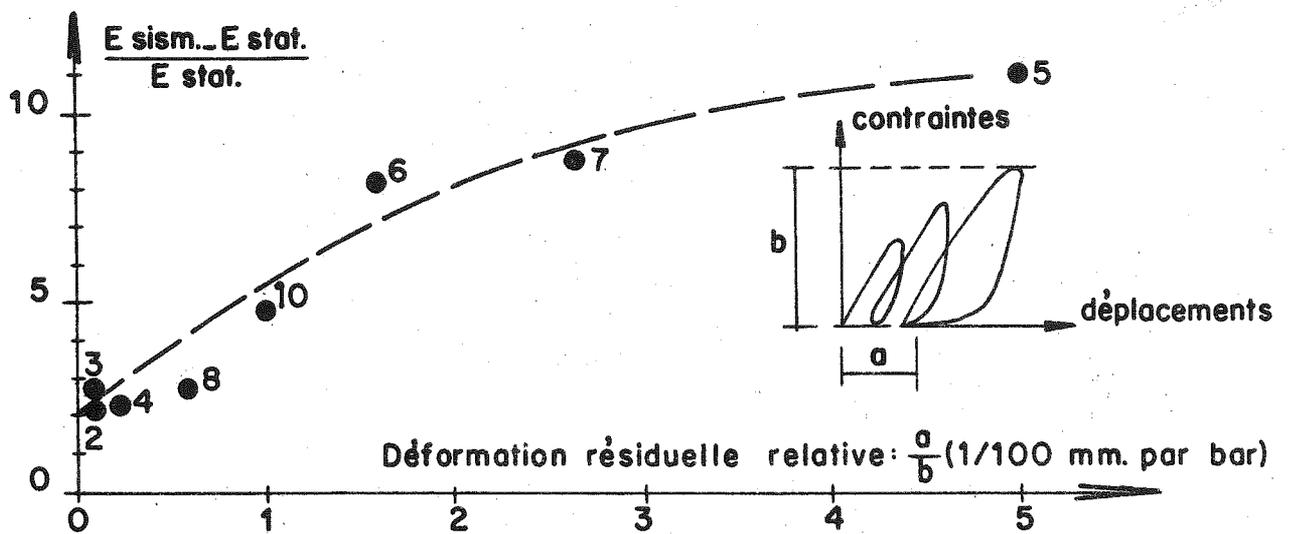
c) - La qualité d'un massif rocheux peut être appréciée en comparant toutes les caractéristiques sismiques mesurées (vitesses, fréquence, variation d'énergie et timbre) à celles d'autres massifs dont l'étude plus complète permet de mieux connaître les propriétés.

Il semble impossible de relier sélectivement une des caractéristiques sismiques mesurées et un caractère particulier du massif rocheux. Toutefois, certaines propriétés du massif, liées souvent à sa structure, peuvent plus que d'autres influencer les variations de l'une des mesures. Les cas où les correspondances ne sont pas vérifiées compliquent toute tentative de classification ; celle que nous proposons ci-après, très empirique, rend compte des résultats moyens que nous avons obtenus.



REPRESENTATION GRAPHIQUE
 DE LA RELATION LIANT: TENSEUR DE DEFORMATION,
 TENSEUR DE CONTRAINTE ET TEMPS
 (D'APRES LANGER)

fig 131.



RELATIONS EXPERIMENTALES ENTRE MODULES DE DE_ FORMATION ET COEFFICIENTS DE DEFORMATION RESI_ DUELLE DES ESSAIS AU VERIN

fig 132.

Propriété du massif	Caractéristiques sismiques influencées
<p>Hétérogénéité</p> <p>Altération, hétérogénéité superficielles</p> <p>Division et desserrage du massif</p> <p>Compacité</p> <p>Matrice élémentaire dure, fracturation non continue (bancs durs par exemple)</p> <p>Altération matricielle, structure finement divisée</p>	<p>Dispersion des vitesses, des pertes d'énergie et des longueurs d'onde.</p> <p>Grandes pertes d'énergie au départ, faibles vitesses au départ.</p> <p>Grandes pertes d'énergie durant le parcours.</p> <p>Faibles pertes d'énergie durant le parcours.</p> <p>Grandes valeurs sclérométriques, faibles vitesses et peu de perte d'énergie.</p> <p>Grande longueur d'onde, son clair et long.</p>

d) - Il est très difficile, voire même impossible, de déceler les accidents que peut recouper un profil sismique, sauf si le cheminement se fait dans l'accident ou si son épaisseur est très importante. Aussi, la méthode proposée sera-t-elle employée non pas pour fournir une description géométrique de la structure, rôle laissé aux sondages, galeries, etc. . . , mais pour mesurer un certain nombre de caractéristiques physiques représentatives d'échantillons non remaniés de très grands volumes dont le géologue se servira dans le cadre de son étude compréhensive du site.

3. Traitement de quelques cas d'espèce

Nous avons vu, lors de l'étude du contexte géologique des sites, que certains facteurs liés aux accidents structuraux ou aux conditions de mise en place des matériaux du massif demandaient à être éclaircis.

Par exemple, sur le site de Ta Chien, la présence d'interbancs argilo-graphiteux pose des problèmes d'érosion ou de gonflement qui peuvent mettre en jeu la stabilité du massif ; sur le site de Hendrik Verwoerd, la dolérite peut avoir gardé des contraintes internes susceptibles de provoquer des incidents lors de l'ouverture d'un front de carrière étendu ou d'excavations profondes.

Nous allons aborder ces problèmes particuliers, par la description d'une suite d'expériences menées in-situ ; nous nous sommes fixés comme objectif de trouver, par des procédés simples mis au point par le chantier, une première réponse rapide au problème cherché.

3.1. Site de Ta Chien (géologie : chapitre A.1.3.).

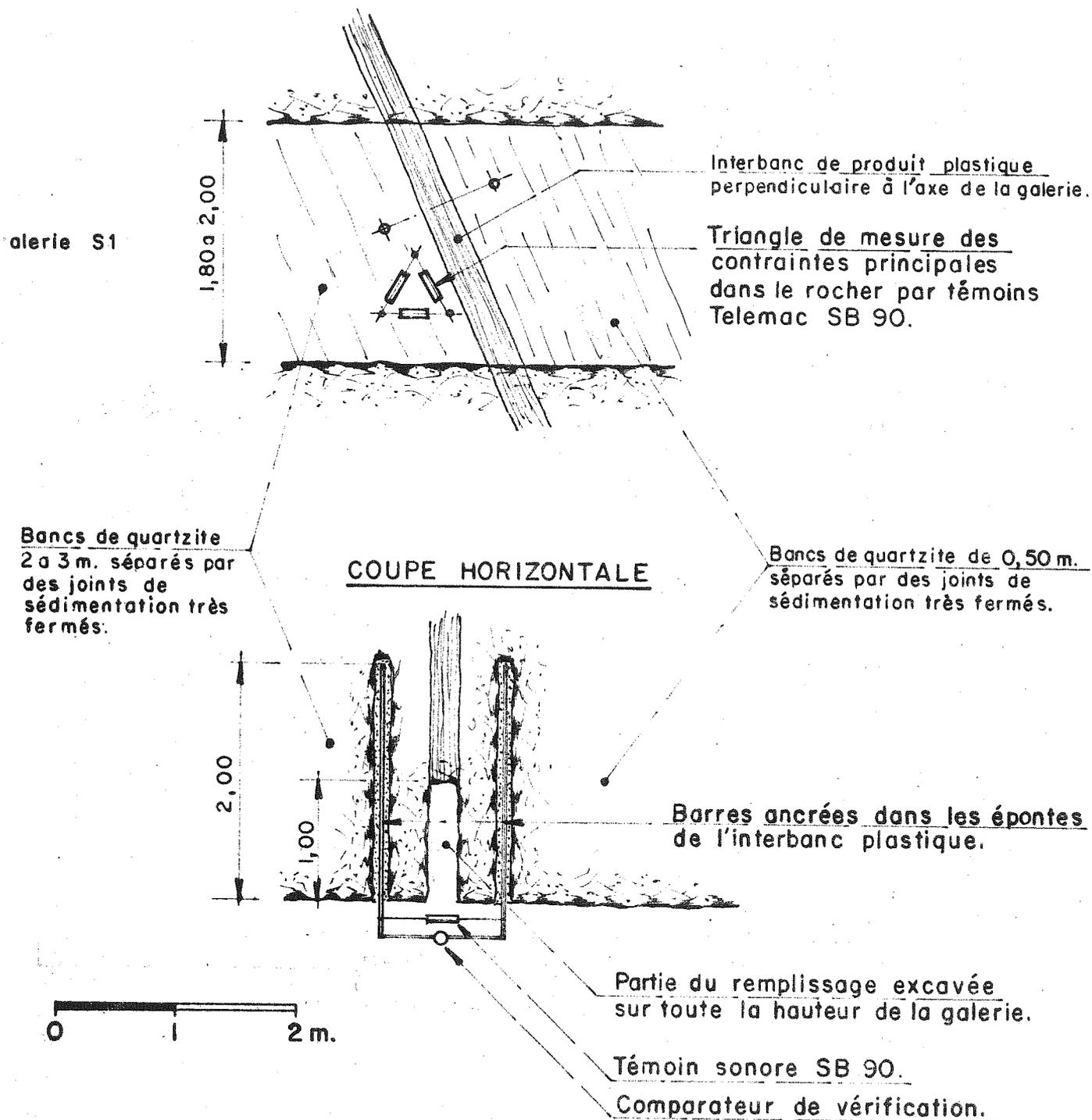
3.11. Décompression des épontes d'un interbanc plastique.

3.111.

Nous avons choisi sur le site principal, les deux interbancs les plus importants pour y exécuter une mesure de décompression d'épontes pendant l'enlèvement du matériau meuble. L'expérience a d'abord été tentée dans la galerie NA 6 (galerie profonde excavée depuis longtemps) sur un interbanc de 20 cm. La charge de terrain au-dessus du point de mesure est de 235 m. La figure 133 montre le dispositif utilisé. On a excavé à la main le matériau mou, l'opérateur suivant continuellement la déviation des instruments de mesure (comparateurs au 1/100 et témoins de déformation Télémac SB 90). Cette première expérience a été négative, aucun déplacement notable n'a été observé.

Nous avons alors profité de l'excavation de la galerie S 1 pour refaire la même expérience immédiatement

COUPE VERTICALE



SITE DU BARRAGE DE TACHIEN

ESSAI DE RELAXATION D'ÉPONTES DE QUARTZITE

fig 133.

après la découverte d'un interbanc caractéristique de 35 cm. La charge de terrain au-dessus du point de mesure était de 85 m. L'expérience a été mise en place 3 jours après la mise à jour de l'interbanc et l'excavation a eu lieu 8 jours après.

Le grattage des matériaux de remplissage a duré 1 jour (11.7.62), la partie excavée a mesuré finalement 1 m de profondeur sur toute la hauteur de la galerie ; la déformation du comparateur a été inappréciable, le témoin Télémac a enregistré un raccourcissement de 25 microns par mètre, les témoins en triangle n'ont pas bougé. Au cours du mois qui a suivi, nous avons continué à mesurer les déformations ; les témoins en triangle ont donné toujours des lectures constantes et le témoin central a donné seulement un raccourcissement total de 75 microns/mètre. Il n'y avait donc pas lieu de craindre la présence dans le quartzite de contraintes capables de déformer dangereusement les interbancs plastiques.

3.112.

Des échantillons de remplissage non remaniés ont été, d'autre part, envoyés à un laboratoire de mécanique des sols qui a mesuré une pression de consolidation faible : 1 à 1,5 bar. C'est a priori étrange, car le remplissage montre des traces très nettes de friction qui attestent une série d'efforts tectoniques. Néanmoins, il se peut qu'une récente circulation d'eau (mise en évidence par de très fins réseaux de calcite sillonnant le remplissage noir) ait transformé les matériaux.

Le cisaillement d'éprouvettes non remaniées, après saturation, a donné des angles de frottement interne voisins de 25°, la cohésion étant de 0,1 à 0,3 bar, la vitesse de cisaillement étant de 0,01 mm/minute.

3.12. Action de l'eau sur le remplissage plastique d'un interbanc.

Si une réaction mécanique des épontes sur les interbancs plastiques, n'était plus à craindre, il restait cependant encore à étudier la réaction à l'eau de circulation. Nous avons décomposé cette action de l'eau en plusieurs cas : une action dynamique par délavage, et une action statique par imprégnation sous pression ou sans pression.

3.121. Délavage

Le but de l'essai était d'étudier l'érodabilité, par un courant d'eau sans pression, de matériaux plastiques interstratifiés. Nous avons choisi un de ces remplissages dans une galerie de l'éperon (RA 9) où de telles circulations pourraient éventuellement avoir lieu après la mise en eau de l'ouvrage. Le montage utilisé est indiqué sur la figure 134.

Un trou a été creusé à la sondeuse dans le plan de l'interbanc avec une pente de 10% (diamètre 7 cm, outil au carbure de tungstène). L'extrémité haute a été munie d'un tuyau relié à une source d'eau, l'extrémité basse a été équipée d'un rajutage empêchant l'érosion régressive. L'eau sortant de cet rajutage était déversée dans un filtre de sable blanc fin, de manière à recueillir les petits dépôts argileux noirs provenant du remplissage de l'interbanc.

On a constaté un faible dépôt noir pendant quatre jours après la mise en route de l'essai, les débits étant limités à 15 litres/minute sans pression. Nous avons éliminé ce dépôt, car il pouvait s'agir de débris dus à la perforation du trou et non pas d'une érosion de matériau compact. Toutefois, le dépôt argileux noir a de nouveau été observé avec la même intensité. Nous n'avons malheureusement pas eu communication des poids de matériaux entraînés en fonction du temps. Toutefois, pendant les deux mois, où nous avons personnellement observé l'essai (juillet - août 1962), les faibles apports de produits argileux ont été constants dans le temps. Il peut donc y avoir une légère érosion dans un chenal préexistant par simple circulation d'eau même sans pression.

3.122.

Le deuxième cas, celui du claquage d'un remplissage mou par de l'eau sous pression a été étudié dans une galerie du site principal (MA 24) en profitant d'un rameau recoupant les bancs.

Deux petites niches ont été excavées (figure 135) de chaque côté de la galerie dans les matériaux de remplissage ayant ici une épaisseur de 55 cm. Puis deux trous borgnes de 15 cm de diamètre et de 1,00 m de long ont été percés à la main, verticalement en remontant. On a ensuite coulé un bouchon de béton muni de tuyaux pour pouvoir mettre en charge le trou borgne. La perméabilité, très faible mais non nulle, du remplissage a permis à l'air de s'échapper sans que les fuites soient trop importantes ultérieurement. Une trentaine de cm séparent le trou de la surface.

ESSAIS D'ÉROSION D'UN INTERBANC PAR CIRCULATION D'EAU

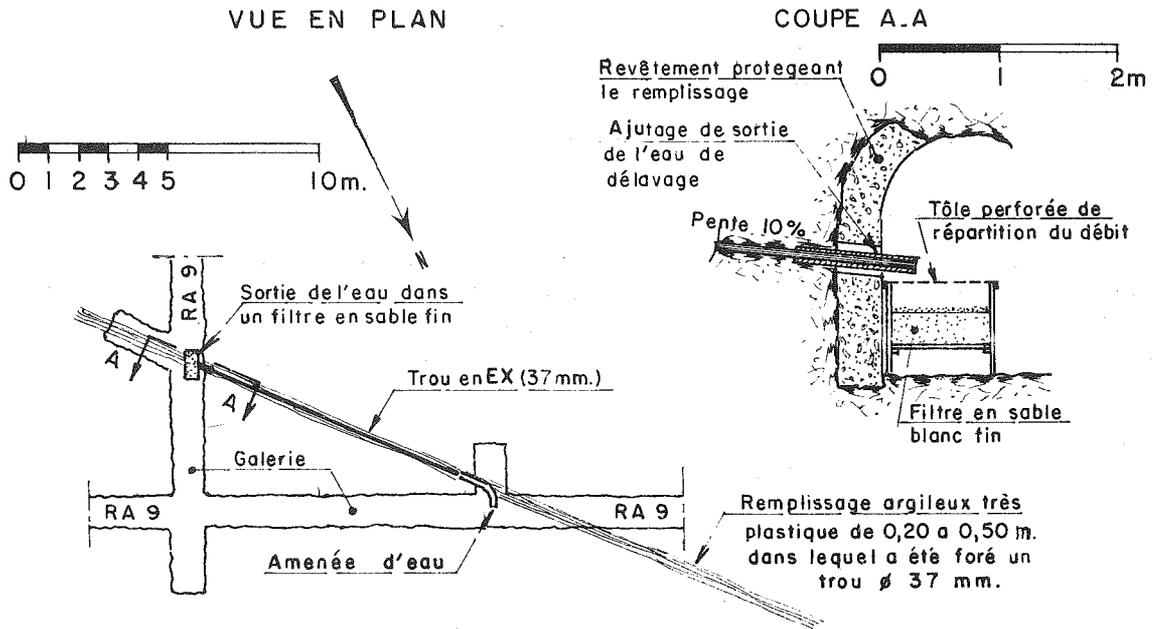


fig 134.

SITE DU BARRAGE DE TACHIEN

ESSAIS D'EAU SUR UN REEMPLISSAGE PLASTIQUE

ESSAIS DE CLAQUAGE D'UN INTERBANC PAR PRESSION D'EAU

COUPE DANS LE PLAN DE L'INTERBANC COUPE VERTICALE B.B

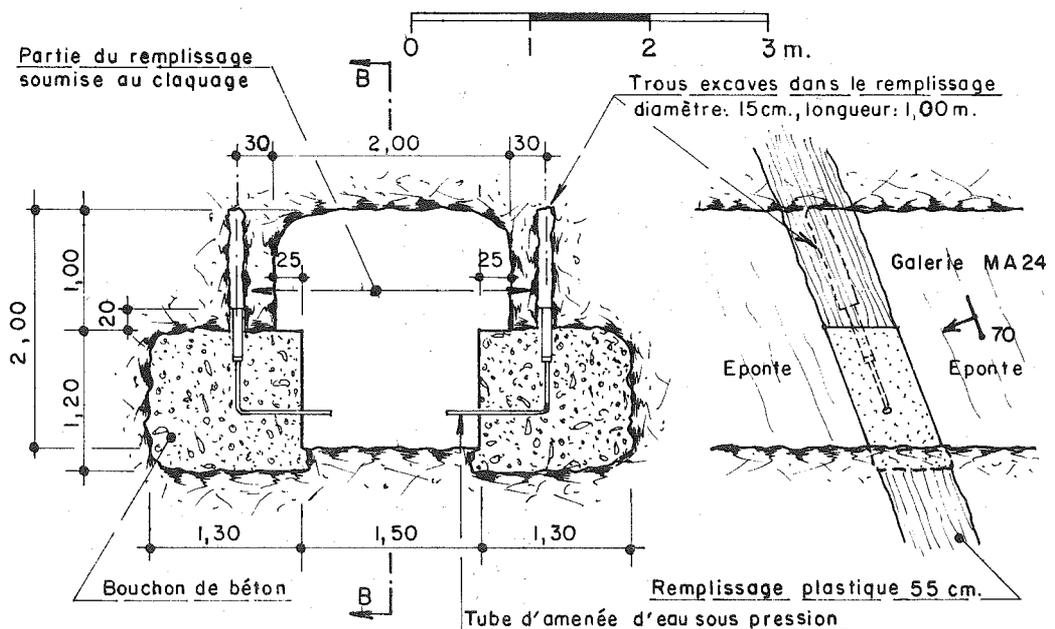


fig 135.

Sur l'essai de droite, on a fait croître la pression jusqu'à l'éclatement. La pression de claquage a été de 14 bars. Elle est élevée et a nécessité un gradient qui ne sera jamais réalisé dans la nature (gradient de $\frac{140}{0,30} = 400$).

Pour l'essai de gauche, on a maintenu une pression d'eau constante de 7 bars (correspondant à la pression statique naturelle de l'alimentation en eau du chantier). La déformation plastique du remplissage a été mesurée optiquement par la comparaison de deux pointes, l'une solidaire du remplissage, l'autre solidaire du rocher des épontes. On a constaté un déplacement très faible de 1 mm en 4 mois, puis les fuites sont devenues trop importantes pour que la pression puisse être maintenue.

Cette série d'expériences a permis de conclure que le matériau mou des interbanes a une bonne tenue à la pression.

3.123.

Après qu'une série d'analyses minéralogiques des remplissages plastiques interstratifiés, ait révélé une teneur de quelques pour-cent en montmorillonite, on pouvait craindre des phénomènes de gonflement créant des contraintes exagérées ou des éboulements dans les galeries de drainage. Nous avons donc entrepris l'observation d'un remplissage caractéristique d'une galerie de l'éperon (RA 63) pendant son humidification. La figure 136 donne la description de l'essai que nous avons surveillé personnellement de juin à août 1962.

Les déformations dues à un éventuel gonflement ont été nulles et, en 3 mois, aucun éboulement n'a eu lieu dans la partie du remplissage immergé.

Des essais oedométriques sur échantillons non remaniés n'ont également pas donné de gonflement appréciable.

Par la suite, BJERRUM (1963) a décrit par contre des cas d'éboulements et de gonflements observés en Norvège, pour des remplissages contenant également de la montmorillonite mais en proportion plus élevée.

3.2. Site du barrage de Hendrik Verwoerd (géologie : chapitre II, A. 2)

Afin d'étudier la contrainte interne existant dans un rocher, bien des méthodes sont connues, (HABIB - 1952, 1965) (HAST - 1964), répondant à des objectifs parfois différents. Pour aborder le problème du site d'Hendrik Verwoerd, nous nous sommes fixés d'abord de déterminer si des contraintes importantes existaient dans les dolérites, sans chercher tout de suite à déterminer direction ou répartition. En effet, le projet ne comporte pas de souterrains de grandes dimensions, la présence de contraintes internes ne peut alors intéresser que les fouilles ou les fronts de carrière. La connaissance de l'ordre de grandeur des contraintes est suffisante pour poser le problème qui, rappelons-le, est le but de notre travail.

3.21. Principe de l'essai.

Afin de fournir des indications valables pour les fouilles futures, l'essai a été localisé dans la dolérite au voisinage de la surface de rocher sain déterminé par les sondages.

Il comporte (figure 137) un tronçon cylindrique de galerie de 2,30 m de diamètre, de 13 m de longueur, revêtue d'une gunité mince, qui peut être mis sous pression par de l'eau.

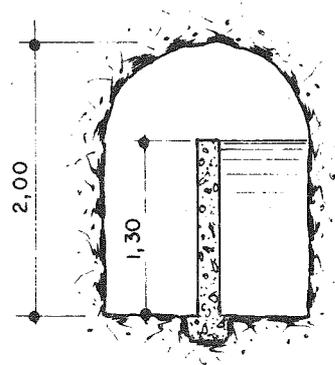
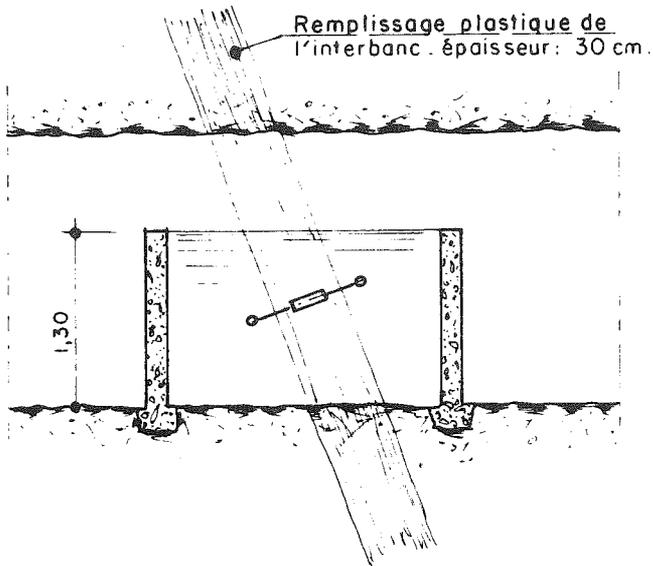
Tout d'abord, cinq trous de sondage de diamètre EX (37 mm) disposés comme l'indique la figure 137, sont forés rigoureusement verticalement dans un plan perpendiculaire à l'axe de la future galerie. Après un examen des carottes, nous avons déterminé, dans chacun des sondages, un emplacement correct pour placer des témoins de déformation à corde vibrante Télémac (E 90 et E 140) ; ces témoins ont été scellés avec un coulis sable-ciment sans pression. Au bout de 15 jours, temps de durcissement du scellement, l'excavation de la partie circulaire de la galerie qui a servi de chambre de mise en pression a été commencée.

On a spécifié à l'entrepreneur de n'utiliser que le minimum d'explosif en volée réduite. Le chiffre moyen de consommation d'explosif ressort à 130 grammes par tonne pour des volées de 2,50 m.

La déformation des témoins scellés dans le rocher a été mesurée avant et après chaque volée jusqu'à ce que la galerie ait sa longueur définitive ; puis la décompression du rocher a été suivie par des lectures espacées convenablement dans le temps. Les parois de la galerie ont été ensuite gunitées, simplement pour les rendre imperméables et un bouchon de 3 mètres d'épaisseur a été coulé à l'entrée de la chambre de mise en pression puis injecté pour le rendre étanche. Il comporte des canalisations électriques, des canalisations pour l'introduction d'eau sous pression et un trou pour le passage d'un homme. A l'intérieur de la chambre de mise en pression, on a scellé dans les parois

COUPE VERTICALE

COUPE VERTICALE A-A



COUPE HORIZONTALE

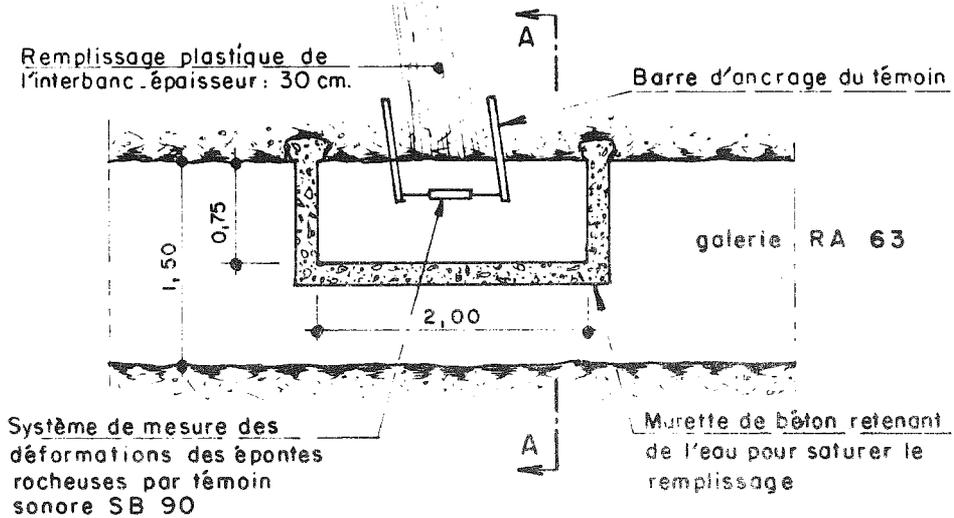
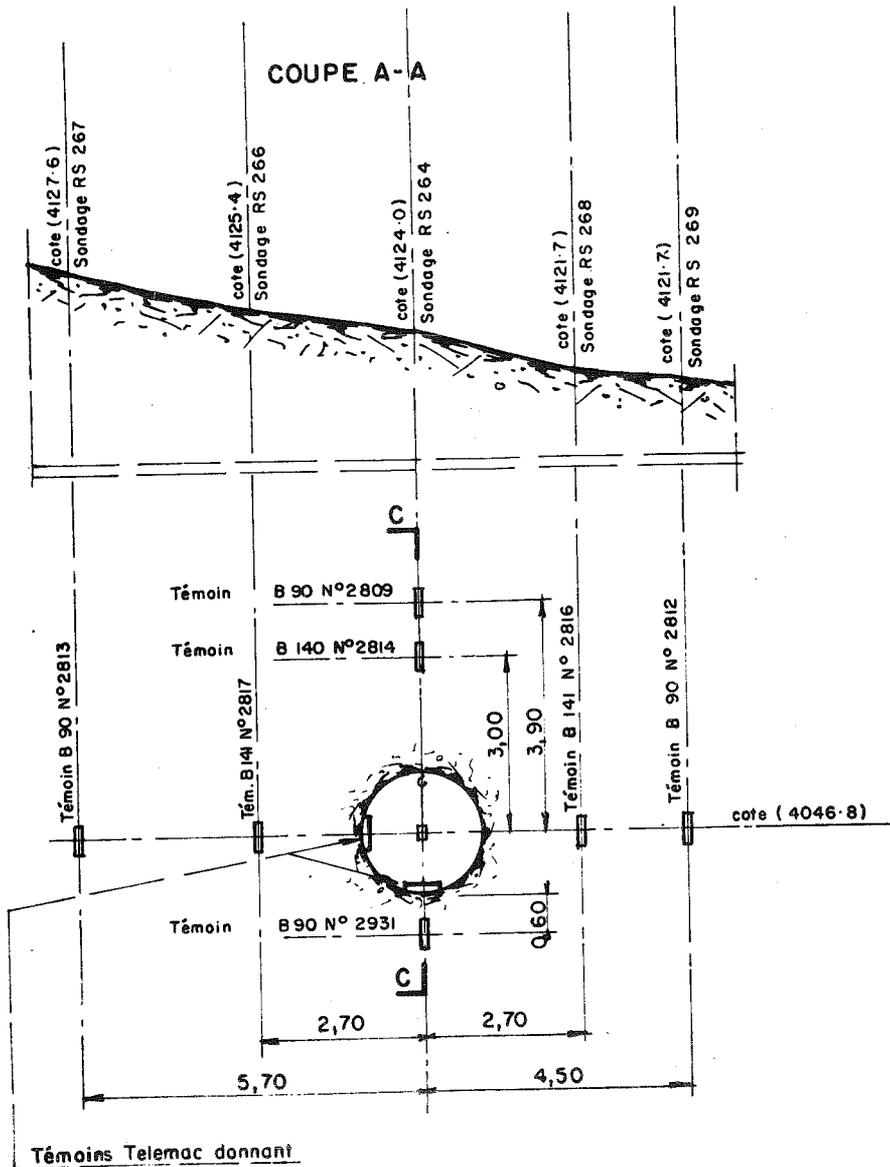


fig 136

SITE DU BARRAGE DE TACHIEN

ESSAIS DE GONFLEMENT

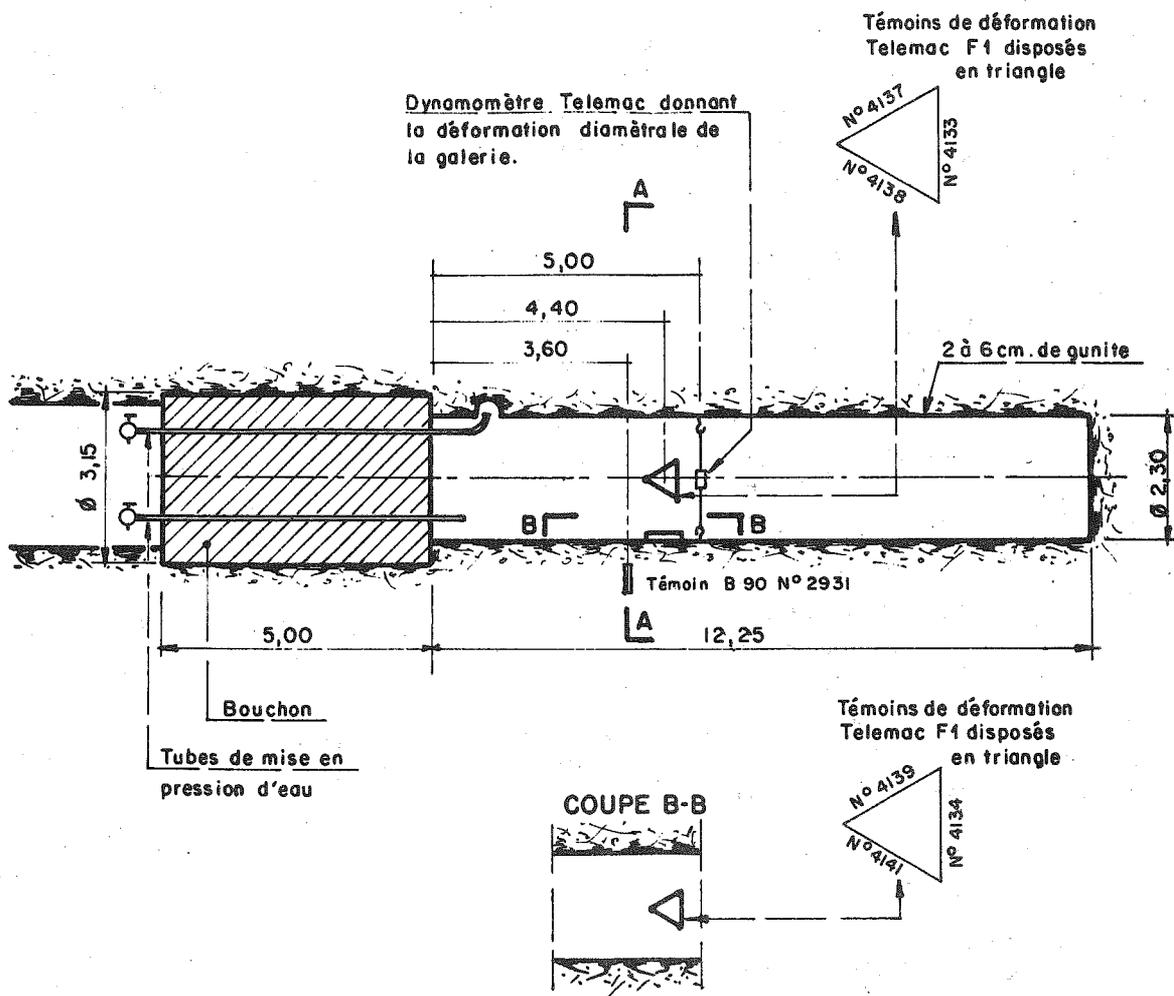
D'UN INTERBANC PLASTIQUE



Témoins Telemac donnant les déformations de peau du rocher.

BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD
ESSAIS DE MISE EN PRESSION
D'UNE PORTION CIRCULAIRE DE GALERIE

COUPE C - C



B 90 Témoins sonores de déformation Telemac scellés dans des trous de sondages verticaux.
B 141

des séries de trois témoins Télémac F 1 en triangle et un dispositif dynamométrique capable de mesurer les déformations diamétrales de la galerie (figure 138).

Les témoins ont été scellés dans le rocher en avril 1964. Le premier essai de mise en pression a eu lieu le 30 janvier 1965. L'essai définitif à plus haute pression le 17 février 1965.

L'essai permet :

- de connaître la grandeur des contraintes dans le rocher à l'état naturel,
- de connaître la décompression du rocher autour d'une excavation cylindrique,
- et, en plus, de mesurer le module de déformation d'une importante masse de rocher.

3.22. Résultats

3.221. Décompression.

Les courbes de la figure 139 donnent les enregistrements des déformations en fonction du temps après que les témoins aient été scellés dans le rocher et que le scellement ait fait prise. Ces courbes montrent que les déformations sont enregistrées au-delà d'une distance de 2 diamètres à partir de l'axe de la galerie, ce qui est couramment la limite admise au-delà de laquelle les déformations ne se font plus sentir. Notons toutefois que ces déformations sont de faible amplitude et que la déformation la plus importante est due au témoin le plus éloigné. Ceci prouve que les joints peuvent avoir une influence prépondérante par rapport à celle de la matrice proprement dite lors d'une décompression.

3.222. Grandeur de la contrainte.

Afin de connaître la grandeur de la contrainte in-situ avant percement de la galerie nous avons mis en charge, par une pression d'eau, l'intérieur du tronçon circulaire en surveillant les indications des témoins de déformation scellés dans le rocher. La pression où la déformation est revenue à l'état initial donne l'ordre de grandeur de la contrainte. Les courbes de la figure 140 montrent que les lectures des deux témoins les plus proches de la galerie reviennent à l'état initial pour une pression de 20 à 30 bars. Le témoin le plus extérieur montre une déformation aberrante due certainement au jeu particulier d'un joint. Bien que supérieures à la contrainte géostatique due aux 26 m de charge de terrain - 7 bars -, ces valeurs de 20 à 30 bars sont relativement faibles ; nous avons donc décidé, par la suite, de ne pas chercher à préciser leur orientation.

3.223. Modules de déformation

Les courbes des figures 140, 141 et 142 montrent les variations de lecture, soit des témoins scellés dans le rocher en profondeur, soit des témoins scellés en surface dans la galerie et les variations diamétrales de la galerie au cours d'essais de montée en pression jusqu'à 35 bars.

Dans l'hypothèse très simplificatrice d'un cylindre infiniment long creusé dans un milieu homogène, isotrope, élastique, le module élastique de déformation, calculé à partir des déformations diamétrales, est obtenu avec la formule suivante (TIMOSHENKO 1960 - page 217)

$$E = \frac{(1 + \nu) p}{\frac{\Delta D}{D}}$$

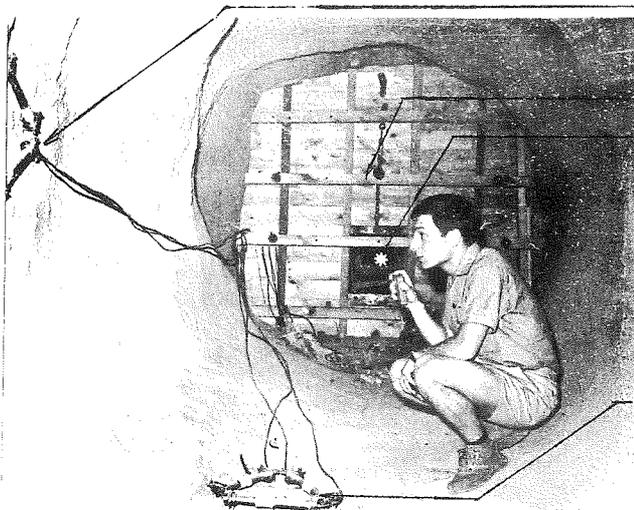
dans laquelle :

- ΔD est la déformation diamétrale
- D le diamètre de la galerie
- p la pression interne atteinte
- ν le coefficient de Poisson statique égal à 0,2

Lorsqu'un témoin est localisé dans le rocher à une distance d de l'axe de la galerie, la formule donnant le module de déformation élastique est :

$$E = \frac{1 + \nu}{4} p \frac{D^2}{d^2} \frac{1}{\frac{\Delta D}{D}}$$

dans laquelle $\frac{\Delta D}{D}$ est la déformation relative mesurée par le témoin.



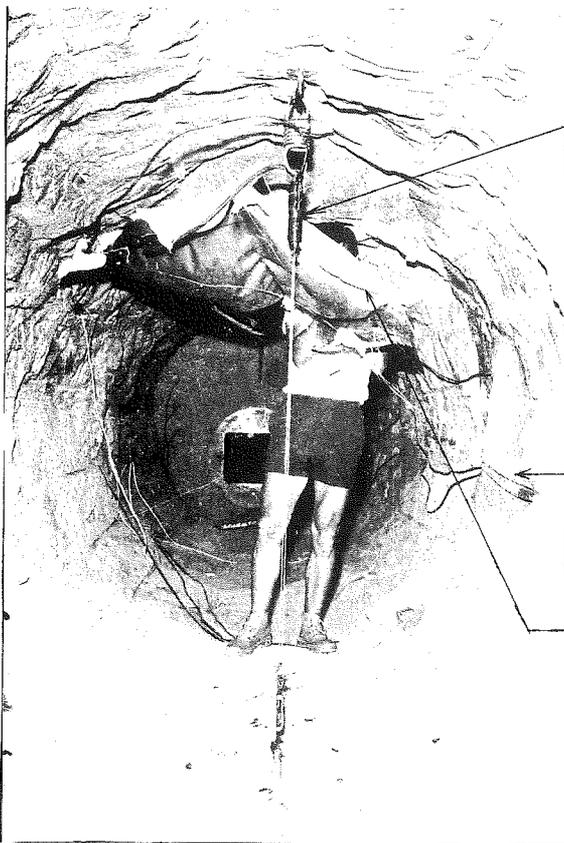
Témoins de déformation Telemac FI
disposés en triangle vertical.

Coffrage du bouchon.

Trou d'homme.

Témoins de déformation Telemac FI
disposés en triangle horizontal.

On remarquera la surface gunitée
de la galerie a section circulaire.



Ressort tare et dynamomètre.

Galerie a section circulaire.

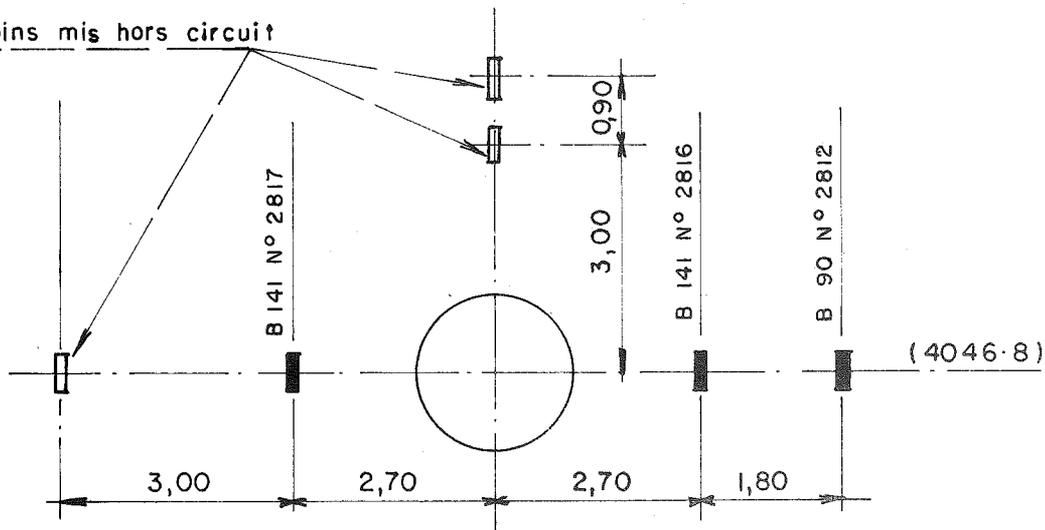
Sac gonflé d'air équilibrant automatiquement
la pression intérieure de l'appareil.

Photo prise lors d'un essai identique sur un
autre site.

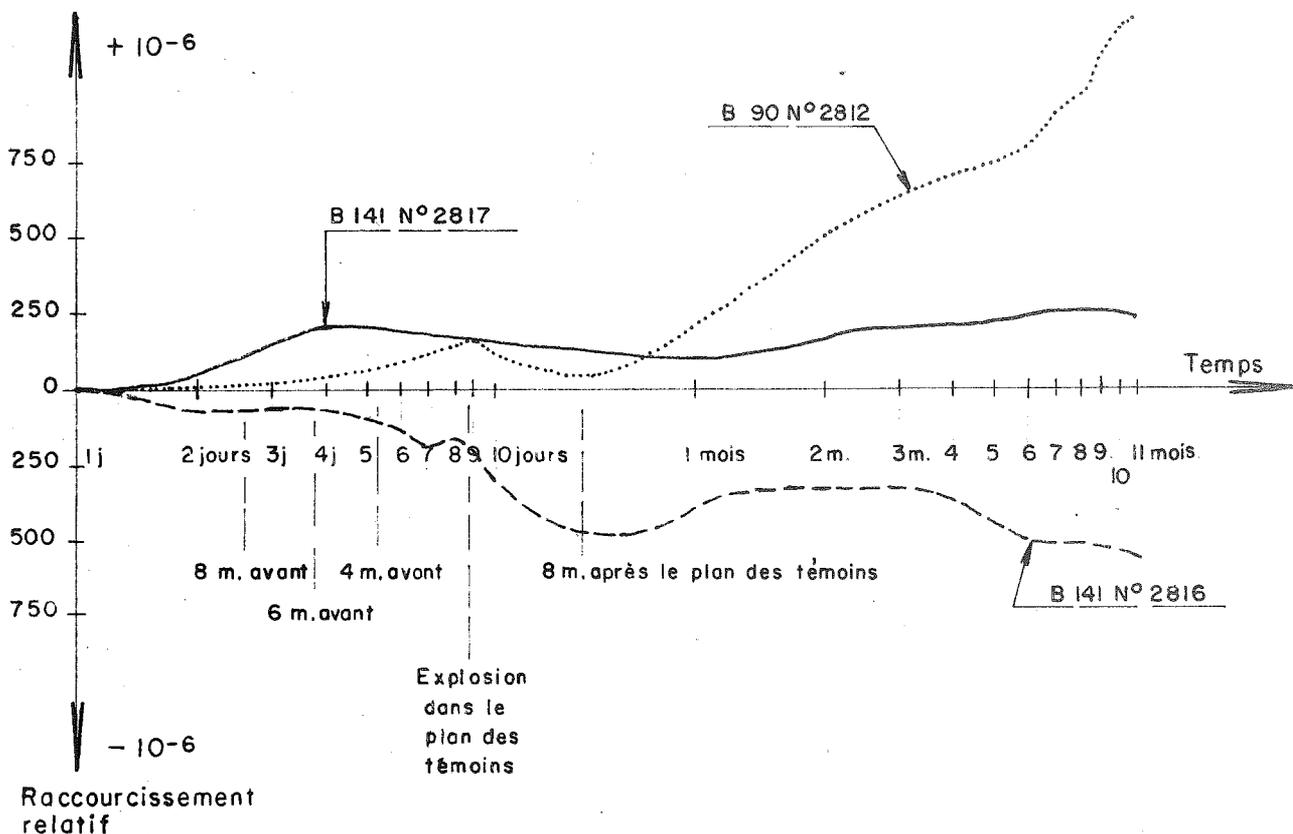
Le dynamomètre utilisé est le même; on
remarquera que la surface de la galerie
n'est pas revêtue ici, l'essai devant se
faire à moindre pression.

BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD
ESSAI DE MISE EN PRESSION
D'UNE PORTION DE GALERIE

Témoins mis hors circuit



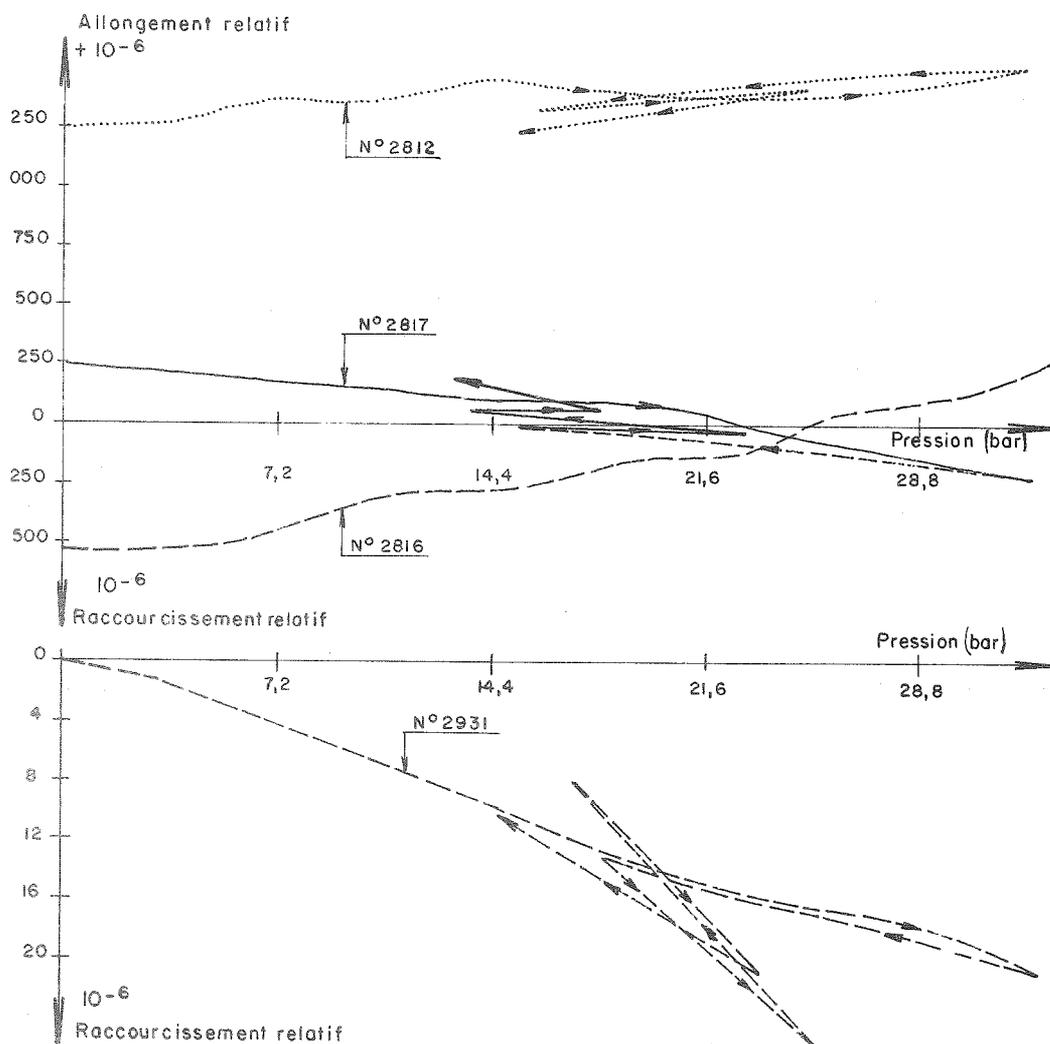
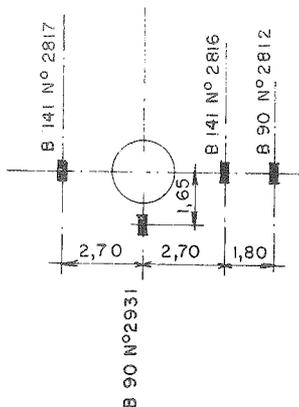
Allongement relatif



BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD

ESSAIS DE DÉCOMPRESSION
DU ROCHER EN FONCTION DU TEMPS

fig 139.



BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD

ESSAIS EN PRESSION
 D'UNE PORTION CIRCULAIRE DE GALERIE
 COURBES DE VARIATIONS DE LONGUEUR RELATIVE
 DES TEMOINS SCelles EN FONCTION DE LA PRESSION
 fig 140.

L'erreur commise sur E en prenant un coefficient de Poisson arbitraire est :

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta \nu}{\nu}, \text{ soit } 25\%$$

L'application de ces formules donne des valeurs de module de déformation élastique de 210.000 bars dans le cas des déformations diamétrales et 243.000 bars dans le cas des déformations mesurées à l'intérieur du rocher par le témoin n° 2931 (figure 140). Ces chiffres sont très semblables à ceux obtenus lors des essais au vérin, ce qui montre, dans ce cas, que le changement d'échelle de l'essai a peu d'effet sur le résultat obtenu.

Dans un milieu homogène et élastique percé d'un cylindre infiniment long, soumis à une pression intérieure uniforme, les déformations axiales (parallèles à une génératrice) de la surface du cylindre sont nulles et les déformations tangentielles (tangentes à une directrice) sont toutes égales.

Les résultats de la figure 141 montrent que les déformations principales mesurées sont différentes des déformations théoriques. Toutefois, on peut remarquer que les directions des déformations principales mesurées sont bonnes et que la déformation axiale est très petite ; ceci nous porte à penser que le massif présente une homogénéité convenable.

En comparant les déformations tangentielles verticales et horizontales de cet essai avec les déformations obtenues suivant les mêmes directions par les essais au vérin, on voit que les essais au vérin ne montrent pas l'anisotropie indiquée par l'essai de la galerie en charge. Il faut remarquer cependant que pour les premiers essais, nous avons considéré l'ensemble des résultats de la campagne de reconnaissances, alors que pour le second, nous n'avons que le résultat local d'un seul essai. On serait donc tenté de considérer le massif de dolérite comme homogène et isotrope en masse avec, localement, des variations dues aux joints.

Les mesures de dilatation volumétrique résumées sur la figure 142 montrent, qu'à partir de quelques bars, l'augmentation du volume du tronçon de galerie est proportionnelle à la pression. Il serait toutefois illusoire de calculer un module de déformation, car les volumes ont été mesurés par des moyens assez rudimentaires et nous n'avons pas eu la possibilité de connaître avec précision la part qui revient aux fuites à travers le terrain.

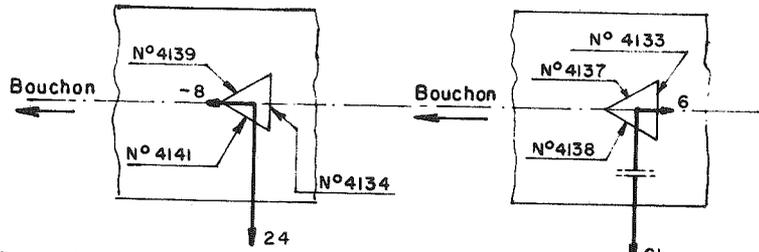
3.23. Conclusion

Au voisinage des futures fondations du barrage, les contraintes résiduelles dans la dolérite ne sont que de quelques dizaines de bars, ce qui est faible ; par contre, la relaxation de ces contraintes peut s'étendre à une distance assez grande (supérieure à deux fois le diamètre de la galerie d'essai). Le module de déformation élastique obtenu dans cet essai de grande dimension, est égal à celui obtenu pour des essais au vérin plus locaux.

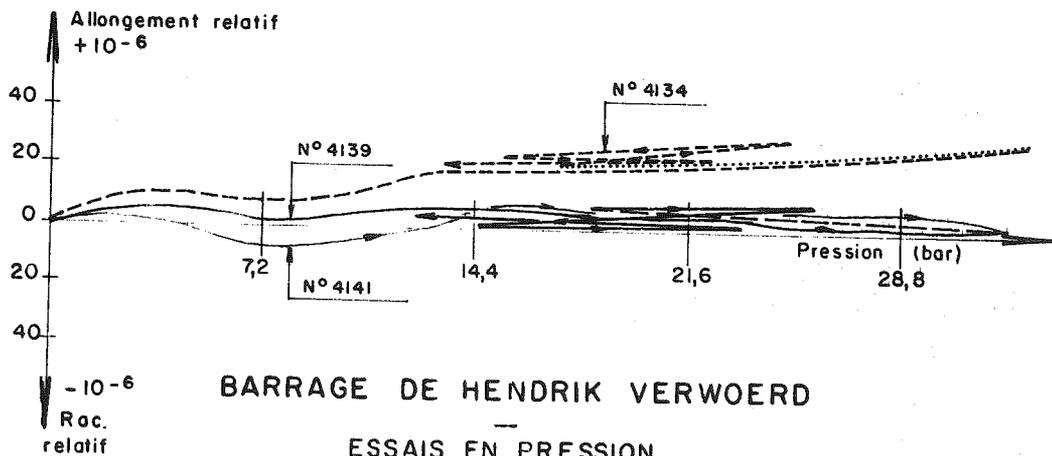
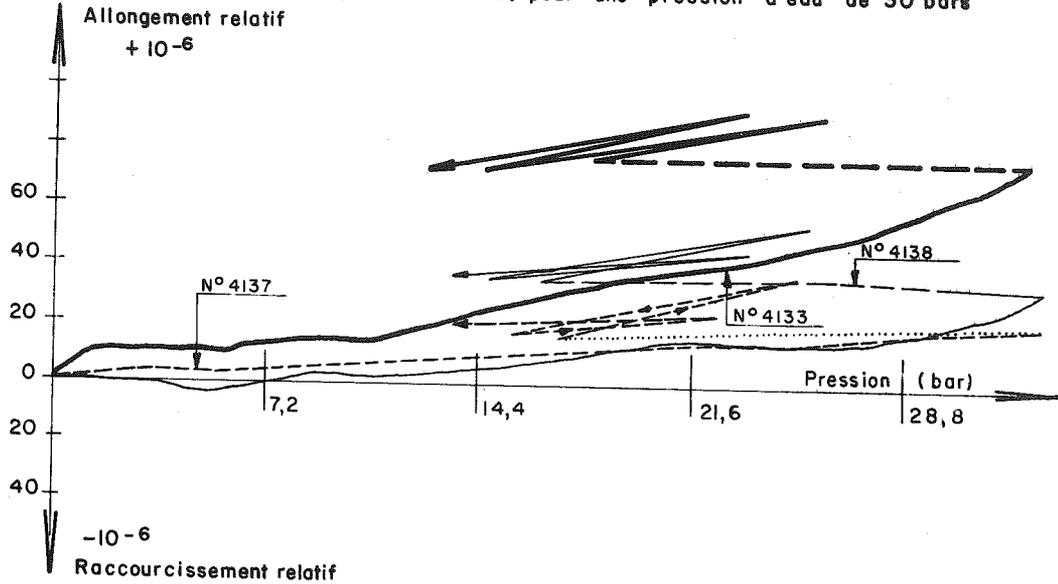
On peut en déduire que l'action des joints commence à petite échelle : celle de l'essai au vérin, c'est-à-dire le mètre. En l'absence de discontinuités à grande maille, les valeurs obtenues semblent bien représenter la valeur moyenne valable pour tout le massif.

Coupe B-B (horizontale)

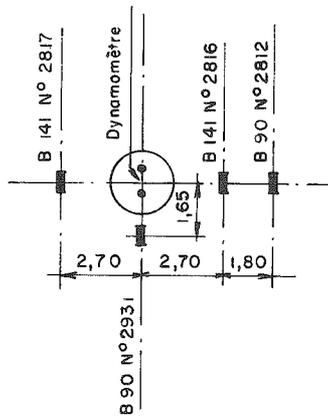
Coupe C-C (verticale)



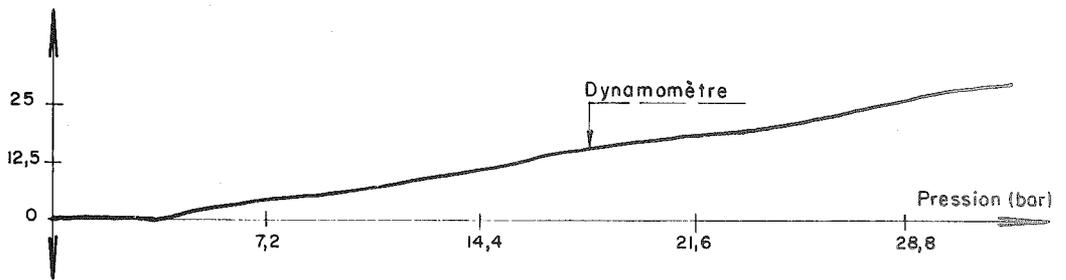
Déformations principales (microns) pour une pression d'eau de 30 bars



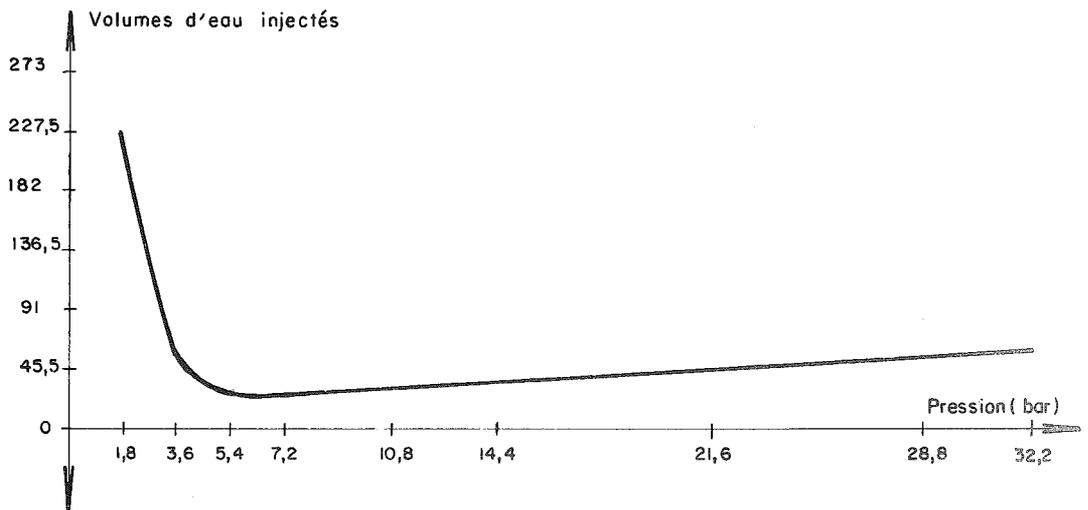
BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD
 —
 ESSAIS EN PRESSION
 D'UNE PORTION CYLINDRIQUE DE GALERIE
 —
 VARIATIONS RELATIVES DES LONGUEURS
 DES TEMOINS F1 SCelles EN TRIANGLES
 fig 141.



Dilatation diamétrale ($\frac{1}{100}$ mm)



Volumes d'eau injectés



BARRAGE DE HENDRIK VERWOERD

ESSAIS EN PRESSION D'UNE PORTION DE GALERIE
DILATATION DIAMÉTRALE ET ABSORPTION D'EAU
EN FONCTION DE LA PRESSION

fig 142.

IV. - TRAITS SPECIFIQUES DES ESSAIS GEOMECHANQUES EXECUTES.

1.

Nous venons de voir les possibilités d'un certain nombre de techniques de mesures des caractères physiques d'un volume rocheux. La validité de ces essais est définie par la maille des discontinuités mécaniques divisant le massif. En effet, dans tous les cas envisagés, le massif est formé de morceaux plus ou moins volumineux de roche dont les caractéristiques mécaniques sont déterminables et satisfaisantes, séparés par des surfaces de types différents. L'assemblage forme le massif dont les caractéristiques mécaniques sont largement plus faibles que celles des éléments constitutifs.

Par le classement des différents types de discontinuités selon leur maille et leur direction, le géologue peut approcher la connaissance de la structure du massif et apprécier la validité de différents types d'essais possibles.

2.

Parmi les moyens géomécaniques courants que nous avons utilisés pour étudier certains aspects d'une fondation, quelques uns ont fourni d'utiles résultats, d'autres se sont montrés nettement moins satisfaisants.

2.1. Les lames minces colorées.

A l'échelle d'une centaine de centimètres cubes, l'emploi des lames minces colorées semble prometteur. En effet, outre l'étude pétrographique classique qui est nécessaire à la description du massif, elles permettent d'estimer la microfissuration et ses conséquences : perméabilité et porosité. Il est hors de propos de vouloir donner aux chiffres obtenus par corrélation ou par formule, une signification rigoureuse, mais nous pensons qu'ils peuvent donner rapidement et à peu de frais un ordre de grandeur du phénomène décelé.

2.2. L'étude d'écrasements ou de déformations d'échantillons a montré que, même dans le cas le plus défavorable, les chiffres de résistance ou de modules obtenus après saturation étaient encore au-dessus de ce qu'il suffirait de trouver comme valeurs pour le site entier.

Les chutes de résistance avec l'imbibition caractérisent assez bien la nature pétrographique de la roche ; les dispersions de mesures sont fonction de la structure de l'échantillon.

2.3. Les essais au vérin.

A l'échelle du mètre cube, l'essai au vérin est employé couramment. C'est un essai relativement léger et peu coûteux dont l'intérêt croît avec le nombre d'essais.

Nous avons vu que les chiffres obtenus pour les modules de déformation étaient sujets à caution dans la plupart des cas, quand on tenait compte de la déformation du plateau et un peu plus représentatifs quand on envisageait la déformation du cratère au large. La validité de l'essai au vérin comme moyen d'obtention de modules de déformation, est liée à la maille de la fissuration et des joints ; mais même si la maille est telle que le module calculé ne peut être représentatif, nous pensons que l'exploitation des courbes de déformations peut être utile pour donner une idée de l'état de fracturation du rocher et de son desserrage de surface ; ce dernier point est en particulier précieux, puisque les premiers bétons du barrage reposent sur une zone plus ou moins épaisse qui présente les mêmes caractéristiques que celles mesurées par l'essai au vérin.

2.4. Les essais sismiques.

Etant donné leur volume d'investigation de quelques centaines de m³, ces essais sont intéressants pour l'étude d'une fondation de barrage là où les méthodes mécaniques (vérin par exemple) ont échoué.

Il faut toutefois distinguer deux voies à suivre dans l'étude d'un site par cette méthode :

a) - Recherche d'un module de déformation exploitable par le projeteur.

Dans ce cas, la connaissance de la vitesse de propagation de l'onde seule, même en admettant qu'on sache laquelle, semble insuffisante pour calculer ce module de déformation. Nous avons trouvé une corrélation entre essais sismiques et mécaniques, qui permet d'attribuer à la longueur d'onde une certaine importance. Toutefois,

cette corrélation a été établie à l'aide de résultats d'essais au vérin qui n'ont donné que le module d'un rocher de surface sans doute déjà desserré.

On obtient alors un ordre de grandeur par défaut alors que le module sismique brut donne un résultat largement par excès.

b) - Définition d'un "profil sismique" du site.

En mesurant systématiquement toutes les caractéristiques de l'onde, on peut dresser une "fiche" d'un massif ; puis, par comparaison, on peut arriver à trouver des similitudes dont on peut tirer des conclusions si l'un des sites est mieux connu que l'autre. Il faut noter que dans cette seconde utilisation de l'essai sismique, il s'agit essentiellement de comparaisons permettant à juste titre de faire apparaître un défaut ou d'appuyer la sécurité sur l'expérience acquise.

2.5. Les essais spéciaux.

Dans certains cas où un problème particulier se présentait, nous avons été obligés de projeter des essais de grande dimension pour mobiliser la plus grande masse de rocher en place possible. Ces essais, lourds et onéreux, sont peu nombreux ; en effet, nous nous sommes efforcés de ne pas faire de similitude de temps, ce qui a imposé des essais de longue durée.

Sur le site de Ta Chien, nous avons examiné les réactions d'un interbanc argileux, soit à la décompression, soit à la saturation par l'eau, soit à l'érosion. Les résultats ont été satisfaisants car les conditions de l'essai étaient très voisines des conditions réelles.

Sur le site de Hendrik Verwoerd, nous avons cherché à étudier les caractéristiques d'un volume de quelques centaines de m³ de dolérite par l'intermédiaire d'une galerie en charge. L'essai, théoriquement simple, est technologiquement très compliqué ; aussi pensons-nous que de tels essais, s'ils sont reconnus indispensables, ne doivent être entrepris dans le cadre d'une étude pratique de fondation que lorsqu'on dispose de temps pour l'essai, et que le responsable peut séjourner continuellement sur place, ce qui a été le cas pour les essais décrits.

3.

En résumé, les essais effectués ont systématiquement mis en lumière le rôle joué par la nature pétrographique et la structure de la roche dans les différents classements que nous avons tenté de faire. Nous avons donc retenu un certain nombre de mesures simples capables de fournir rapidement des données précieuses sur la pétrographie et la structure du massif rocheux.

L'examen des matrices à l'aide de lames minces colorées révèle les phénomènes liés à l'altération et à la microdivision de l'échantillon.

Les relevés statistiques des écartements et des orientations des discontinuités mécaniques fournissent le schéma structural du massif dont les données peuvent être parfois utilisées dans des calculs simplifiés, mais surtout permettent de classer le site dans une "échelle" expérimentalement établie.

Parmi les essais géotechniques étudiés, nous avons retenu la petite sismique. En exécutant la plus grande série possible de "profils sismiques", on constitue une fiche du site qui permet, à la rigueur, de déterminer un coefficient de déformation pour un volume de quelques centaines de m³, mais surtout de comparer le massif à d'autres mieux connus, en soulignant en particulier le rôle joué par les discontinuités.

CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail, résultat de sept années d'observations et de mesures, nous pouvons tirer quelques enseignements de portée générale.

Il existe de nombreuses façons d'aborder l'étude d'un massif ; selon les pays et les auteurs, telle méthode sera considérée comme fondamentale et quelquefois même comme suffisante à elle seule pour fournir la connaissance géomécanique d'un massif rocheux.

Nous avons montré que, loin de s'inscrire dans un cadre étroit, l'étude d'un site devait mettre en oeuvre un grand nombre de méthodes. En effet, tant que nous ne pouvons pas caractériser quantitativement les propriétés mécaniques des massifs rocheux à l'échelle de tout un appui de barrage - les seuls qui intéressent en définitive le constructeur - nous sommes contraints de mobiliser toutes les forces disponibles pour cerner au mieux les problèmes. La géologie, parce qu'elle est la seule à pouvoir donner une bonne classification de ces problèmes, doit donc avant tout être parfaitement connue.

Au cours de l'analyse particulière de certains problèmes, nous avons vu se dégager des propriétés singulières, à diverses échelles de dimensions, permettant de pallier l'insuffisance des mesures directement utilisables, par des classements comparatifs de sites. A cet effet, nous avons étudié la roche aussi bien hors de son gisement naturel avec l'échantillon, que dans ce gisement avec les essais en place intéressant des volumes de roche variables depuis la fraction de mètre cube jusqu'à plusieurs centaines de mètres cubes.

Dans le cas des essais sur échantillon, nous nous sommes limités à l'étude des effets de l'eau sur les propriétés mécaniques de la roche.

Nos expériences sur la variation de la résistance par imbibition demanderaient à être complétées dans des conditions de filtration plus sévères. Toutefois, ce domaine a été abordé d'une façon indirecte par deux autres procédés.

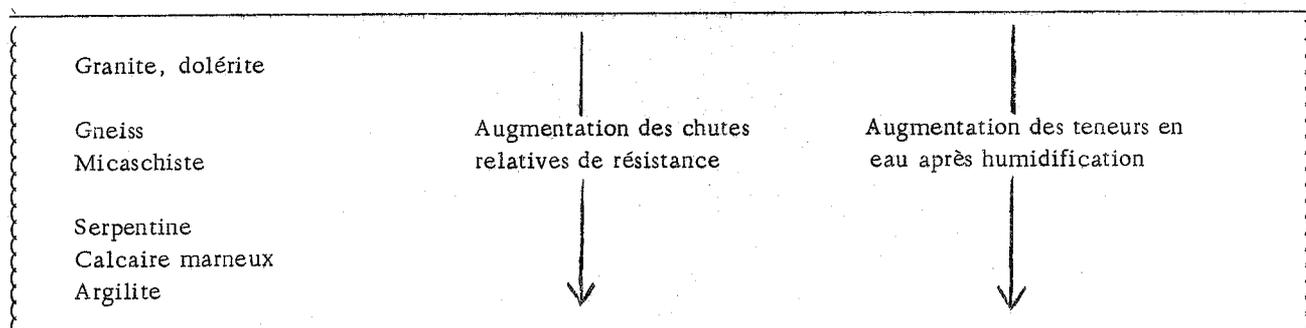
D'une part, J. BERNAIX (1966) a mesuré la résistance à la compression simple d'échantillons rocheux avant et après percolation sous très fort gradient. La résistance résiduelle n'était que modérément réduite.

D'autre part, des expériences de fatigue et de vieillissement par cycles d'humidification nous ont permis de déceler une forte augmentation des microdiscontinuités, qui cependant laisse l'échantillon entier.

Nous avons pu observer une bonne correspondance entre l'aspect optique des discontinuités et les résultats des mesures de perméabilité.

L'ensemble des résultats obtenus sur échantillons au cours de ce travail permet un classement, valable pour de petits volumes rocheux, fondé sur la composition minéralogique et sur la structure,

a) - Les chutes de résistance à la compression simple et à la traction brésilienne lors de l'humidification, ainsi que les absorptions d'eau correspondantes, permettent d'établir le tableau qualitatif suivant :



b) - Les dispersions des résultats d'écrasement, les perméabilités et leur variation avec les contraintes, traduisent la plus ou moins grande complexité de la microstructure. On peut évaluer cette complexité par le critère suivant : écartement moyen et épaisseur des microdiscontinuités observées statistiquement à l'aide de lames minces colorées.

Dans le cas des essais faits sur la roche en place, on aborde l'étude "d'échantillons" de grande dimension et dans des conditions voisines des conditions naturelles.

A l'échelle de quelques mètres cubes nous avons pu, par les essais au vérin, obtenir des indications précieuses sur la structure des roches, à condition d'analyser finement toutes les composantes des déformations. Le domaine des déformations irréversibles s'est montré particulièrement fécond. La comparaison des courbes obtenues met très clairement en évidence l'influence des discontinuités découpant le volume sollicité par l'essai, depuis la dimension des microdiscontinuités jusqu'aux joints éventuels. On peut distinguer la part de la division superficielle de celle de la division profonde. Les discontinuités de la surface se reflètent surtout dans les variations de la déformation globale en fonction de la pression appliquée, tandis que le desserrage des discontinuités de la profondeur se traduit par la valeur du rapport $\frac{E}{\Gamma}$ de la déformation élastique à la déformation globale.

De son côté le critère : $C_p \equiv \frac{\text{déformation résiduelle à contrainte nulle}}{\text{contrainte maximale atteinte}}$ traduisant la fraction non réversible des déformations, met bien en évidence les structures finement divisées où intervient l'interface des discontinuités (oxydation ou altération argileuse).

Comme dans l'échantillon de laboratoire, l'influence prépondérante de la structure de la roche se dégage donc, mais à une échelle plus grande.

Pour atteindre l'ordre de grandeur du massif d'appui, il fallait recourir à d'autres méthodes. C'est ce qui nous a conduit à utiliser la petite sismique, mais en la complétant car la mesure des seules vitesses de propagation est insuffisante pour traduire les propriétés mécaniques d'un massif.

C'est la combinaison, mise en lumière par des corrélations expérimentales, des vitesses, fréquences, pertes d'énergie et timbres qui est significative. En particulier, les deux vitesses, longitudinale et transversale, et la fréquence fournissent des indications sur la déformabilité réversible du massif ; la nature de la matrice rocheuse et sa structure sont plus particulièrement sensibles à la fréquence ; la fracturation à grande maille se traduit par de fortes variations des pertes d'énergie.

La structure de volumes rocheux de plusieurs centaines de mètres cubes, structure qui est à l'origine des différentes réactions sismiques observées sur de nombreux exemples, est ainsi mise en relief par des essais nouveaux.

La stabilité de volumes encore plus grands a pu être étudiée à partir d'essais spéciaux faits, cette fois, sur les éléments singuliers de la structure : matériaux de remplissage de faille, bancs particuliers.

De l'ensemble des essais sur la roche en place que nous avons effectués, nous avons dégagé un certain nombre de critères dont les plus significatifs sont regroupés dans le tableau ci-après. Ces critères ont été définis dans le texte.

On peut faire sur ce tableau une constatation importante : plus que la nature pétrographique de la roche, ce sont le type et le nombre des discontinuités, à toutes les échelles de la structure, qui commandent les valeurs numériques des critères proposés. A ce titre, ils peuvent contribuer à la connaissance mécanique du massif. C'est ainsi qu'une grande valeur :

- de $\lambda/2$ correspond à des roches très divisées à petite échelle, ou très altérées.
- des pertes d'énergie correspond à de nombreux joints, à l'échelle métrique, souvent ouverts.
- de C_p correspond à des remplissages plastiques ou plus généralement à la possibilité de déformations irréversibles importantes.
- de $\frac{E}{\Gamma}$ correspond à une structure ouverte.

Lors de l'étude des échantillons, nous avons vu l'importance de la nature minéralogique de la roche, quant à l'action de l'eau d'imbibition. Lors de l'étude de la roche en place, c'est la structure de l'ensemble du massif qui joue le rôle prépondérant. Pour l'étude d'éléments de structure, nous avons proposé un certain nombre de méthodes géomécaniques, en recourant, comme il est de règle dans un domaine aussi neuf, à des comparaisons aussi larges que possible.

Types de roche Altération Structure essentielle	Demi-longueur de l'onde transversale (mètre) $\frac{\lambda}{2}$	Pertes d'énergie (unité de gain potentiométrique par mètre)	Coefficient de dé- formation perma- nente dans l'essai au vérin (1/100 mm par/bar) Cp	Module de défor- mation élastique <hr/> Module de défor- mation globale $\frac{E}{\gamma}$
Dolérite très saine ; division mé- trique sans aucun remplissage ; roche compacte.	3	7	0,2	2
Schiste cristallin sain mais très divisé, sans remplissage ; roche parfois ouverte ; écartement moyen décimétrique.	3.3	23	0.8	1 à 30
Granite très divisé (dm) avec une importante oxydation des interfaces, roche parfois ouverte.	4	---	1 à 5	5 à 11
Quartzite plus ou moins schisteux ; nombreux joints sans remplissage ; écartement moyen de l'ordre du mètre.	4.2	---	0,01 à 1	2
Gneiss moyennement altéré ; division importante mais sans grands remplis- sages ; roche parfois desserrée.	4.6	13	1	1 à 15
Gneiss altéré ; structure très com- plexe ; division du mm à la centaine de mètres avec de nombreux remplis- sages (films argileux, mylonite, brèche) laissant toutefois la roche compacte.	5	10	1 à 10	2

Cette voie purement expérimentale devra être complétée par des recherches théoriques, de façon à expliquer physiquement les propriétés et les corrélations établies. Nous n'avons, dans le présent travail, que cherché à donner à l'ingénieur quelques éléments nouveaux pour guider ses choix et ses décisions dans l'établissement d'un projet, ayant constaté qu'il était extrêmement démuné pour la prévision du comportement des massifs à l'échelle d'un grand barrage.

Quoi qu'il en soit, c'est la définition de la structure qui reste le premier objectif du géologue.

Pour mieux la caractériser, nous avons proposé, outre les graphiques polaires bien connus, d'une part une répartition de toutes les discontinuités mécaniques du massif en catégories définies essentiellement par les dimensions, la plus ou moins grande régularité d'orientation et les remplissages des divers constituants, d'autre part une représen-

tation graphique de chaque catégorie, fonction du caractère plus ou moins systématique de la répartition des éléments constitutifs.

Nous pensons que cela constitue une bonne approche du problème de l'étude de la stabilité d'un massif car :

- on peut immédiatement juger de la validité des reconnaissances possibles,
- on peut apprécier le problème prédominant : cisaillements localisés, déformation d'ensemble, sous-pressions d'eau, etc... en comparant l'importance relative des catégories étudiées.

Voilà résumés quelques moyens que nous considérons comme essentiellement destinés à être utilisés par le géologue dans le cadre de sa mission de description du site et d'appréciation de ses capacités à constituer une fondation de qualité pour un ouvrage déterminé.

Aucune des méthodes envisagées n'est capable de rendre, à elle seule, compte des phénomènes complexes que met en jeu la stabilité d'un massif rocheux, mais chacune d'elles permet, par le recours à des comparaisons justifiées, d'avancer d'un pas vers une meilleure connaissance du problème.

Le recours constant à la comparaison, qui a été notre règle tout au long de ce travail, peut se faire a posteriori sur des ouvrages construits et surveillés, fonctionnant normalement et fournissant ainsi un exemple précieux.

Nous pensons que cette manière d'approcher le problème, nécessitant en outre un géologue responsable, pourvu de moyens étendus dès le début de son enquête, est une des meilleures en attendant que les progrès futurs puissent nous assurer une solution mécanique complète du problème de stabilité des massifs rocheux de fondation des grands ouvrages.

BIBLIOGRAPHIE

- BARBIER R., GIGNOUX M. (1955) - Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques. Paris, Masson. 344 p., 176 fig., 28 pl.
- BELLIER J., SCHNEIDER B. (1963) - Microcracking in concrete. Journ. Of. Am. Concrete Inst. Discussion 60/31.
- BERNAIX J. (1966) - Contribution à l'étude de la stabilité des barrages-voûtes. Thèse Doc. ès Sc. Appl. Paris.
- BERTON M. (1965) - Applications scientifiques des explosions nucléaires. 1ère partie : excavations, 88p, 2ème partie : géologie, 158 p. Série Bibliographies, C.E.A.
- BJERRUM P., BREKKE, MOON, SELHER-OLSEN (1963) - Some Norwegian studies and experiences with swelling materials in rock gouges, Rock Mechanics and Engineering Geology. Vol. 1, n° 1.
- BUCHHEIM W. (1961) - Zur Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit in der Theorie des Mechanischen Verhaltens von Gesteinsmassen. Geologie und Bauwesen. Vol. 2, n° 1.
- BORDET P. (1951) - Etude géologique et pétrographique de l'Estérel. Mémoire pour la carte géologique. 207 p. 81 fig.
- CAMBEFORT M. (1964) - Injection des sols, tome 1. Paris. Eyrolles. 400 p., 104 fig.
- CAPDECOMME, FARRAN, ORLIAC (1951) - Sur l'emploi de techniques minéralogiques dans l'essai des matériaux de barrages. 4ème Congrès des Grands Barrages, C4.
- CAQUOT A., KERISEL J. (1966) - Traité de mécanique des sols, Paris. Gauthier-Villars. 560 p., 150 fig.
- CLAR E. (1963) - La structure et le comportement des corps rocheux au point de vue géologique. Rock Mechanics and Engineering Geology. Vol. 1, n° 1 (traduction COYNE et BELLIER)
- (1939) - Les crevasses dans les affleurements rocheux. Geologie und Bauwesen. Vol. 2 (traduction C. et B.)
- COLBACK B., WILD L. (1964) - Influence of moisture content on the compressive strength of rocks. Document intérieur du N.M.E.R, Inst. Afrique du Sud, 22 p., 9 fig.
- COMMISSION D'ENQUETE DU BARRAGE DE MALPASSET (1960) - Rapport définitif. Ministère de l'Agriculture, 4 tomes.
- COMMISSION D'ENQUETE DU BARRAGE DE MALPASSET (1962) - Rapport d'expertise sur la rupture du barrage.
- COMMISSION D'ENQUETE DU BARRAGE DE MALPASSET (1964) - Rapport de contre-expertise sur la rupture du barrage de Malpasset. Texte, 3 annexes.
- COMPTE-RENDU DU 8ème CONGRES INTERNATIONAL DES GRANDS BARRAGES (1964) - Question 28. Paris. Gauthier-Villars. 1131 p.
- CRANDELL F.J. (1955) - Determination of Incipient Roof Failures in Rock Tunnels by Micro-Seismic Detection. Boston Soc. of Civ. Eng. pp. 89-109.
- DERRE D.U. (1966) - Discussion thème 1. 1er Congrès International de Mécanique des Roches, Tome 3. Lisbonne. Laboratorio Nacional de Engenharia Civil.
- DREUX G. (1965) - Contribution à l'étude du comportement des éprouvettes de béton. Ann. I.T.B.T.P. n° 206. pp.297-313, 12 fig., 4 tab.
- DUFFAUT P., LAKSHMANAN J. (1965) - Les mesures de déformabilité à la paroi du massif rocheux. Travaux Nov. pp. 609-616, 15 fig.
- DUTOIT A.L. (1954) - Geology of South Africa, Edinburg. Oliver and Boyd. 600 p., 86 fig.
- FOX P., MEYER A., TALOBRE J. (1964) - Foundation of Palavi dam. 8ème Congrès des Grands Barrages. Q 28, R 1, 21 p., 10 fig.
- GOODMAN R., BLAKE J. (1964) - Investigation of rock noise in landslides and cut slopes, 15ème Congrès Mécanique des Roches, Salzburg.

- GROUPE DE TRAVAIL FRANCAIS (1964) - Les effets chimico-physiques de l'eau dans les appuis de barrages. 8ème Congrès des Grands Barrages, Q 28, R 17, 20 p., 3 fig.
- GROUPE DE TRAVAIL FRANCAIS (1964) - Déformabilité des massifs rocheux, analyse et comparaison des résultats. 8ème Congrès des Grands Barrages, Q 28, R 15, 25 p., 24 fig.
- HABIB P., BERNEDE J., CARPENTIER L. (1965) - Résultats des mesures de contraintes effectuées dans divers souterrains en France. Annales I.T.B.T.P. n° 210, pp. 824-834, 12 fig.
- HALL J., RICHARD F. (1963) - Dissipation of elastic waves energy in granular soils. ASCE Soil Mec. Nov.
- HAMROL R. (1961) - A quantitative classification of the weathering and weatherability of rocks. 5ème Congrès de Mécanique des Sols, 7/3.
- HAST N., NILSSON T. (1964) - Recent rock pressure measurements and their implications for dam buildings. 8ème Congrès des Grands Barrages, Q 28, R 32, 9 p., 2 fig.
- HOUPERT R. (1966) - Variation de la résistance à la compression simple des roches grenues en fonction de la vitesse de mise en charge. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 262, pp. 1423-1425, 1 fig.
- (1966) - Influence de la granulométrie sur le comportement à la rupture des roches. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 263, pp. 308-311, 1 fig.
- (1966) - Relation entre la résistance à la rupture des roches et la dimension de leurs minéraux. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 263, pp. 516-519, 1 fig.
- HOUPEURT A. (1951) - Mesure des perméabilités, Revue I.F.P. Juin.
- I.O.R.C.C. (1965) - Final geological report on Hendrik Verwoerd and Van Der Kloof dam sites. Johannesburg. (Private).
- JAEGER CH. (1965) - Tendances actuelles et difficultés en mécanique des roches. Schweizerische Bauzeitung, Oct. pp. 789-793, 12 fig.
- (1964) - Rock mechanics for dam foundation. Civ. Eng. I.C.O.L.D. Suppl. May. pp. 3-19, 17 fig.
- JUNG J. (1958) - Précis de pétrographie. Paris. Masson. 314 p., 160 fig., 20 pl.
- KESSLER C., CHANG T. (1962) - Review of sonic methods for the determination of mechanical properties of solid materials. Univ. Illinois. Report 54 (Mécanique appliquée).
- KESSLER C., HIGUCHI Y. (1953) - Determination of strength of concrete by using its sonic properties. Proc. Am. Soc. of testing materials, n° 3.
- LANCASTER-JONES P.F. (1966) - Bibliography of rock mechanics. Croydon. The cementation Company. 89p.
- LANGER M. (1964) - Theorie, Methode und Anwendungsmöglichkeit dynamischer Messungen im Felsbohlbau. 15ème Congrès de Mécanique des roches, Salbourg, 25 p., 8 fig.
- (1965) - Kennzeichnung des Druck-Deformations Verhaltens von Gebirgskörpern. Document intérieur, Bundesanstalt für Bodenforschung. 37 p. (Traduction COYNE et BELLIER)
- LEGGET R.F. (1962) - Geology and Engineering. N.Y. Mc Graw-Hill Book Co. 884 p., 118 fig.
- LEXIQUE STRATIGRAPHIQUE INTERNATIONAL (1956) - Taiwan Vol. 3, fasc. 4. 143 p., 1 carte.
- LINK H. (1964) - Evaluation of elasticity moduli of dam foundation rock determined seismically in comparison to those arrived at statically. 8ème Congrès des Grands Barrages, Q 28, R 45. 25 p., 10 fig.
- LONDE P. (1965) - Une méthode d'analyse à trois dimensions de la stabilité d'une rive rocheuse. Annales des p. et c. Jan-Fev.
- LONDE P., SABARLY F. (1966) - La distribution des perméabilités dans la fondation d'un barrage-voûte en fonction du champ de contrainte. Com. 1er Congrès International de Mécanique des Roches. Lisbonne.

- LUGEON M. (1933) - Barrages et géologie. Paris. Dunod. 136 p., 41 fig.
- MAZENOT P. (1965) - Interprétation de nombreuses mesures de déformation exécutées sur massifs rocheux par E.D.F. Annales I.T.B.T.P. Fev. pp. 235-245, 15 fig.
- MIELENZ R. (1959) - Petrographic and engineering properties of igneous rocks. U.S.B.R. Tech. inf. Branch.
- MILLOT G. (1964) - Géologie des argiles. Paris. Masson. 499 p., 75 fig., 12 pl., 15 tab.
- MULLER L. (1963) - Stabilité des talus rocheux, un problème spécifique de géomécanique. Rock mechanics and Engineering geology. Vol. 1, n° 1. (Traduction COYNE et BELLIER).
- (1963) - Der Felsbau. Vol. 1. Stuttgart. 624 p., 307 fig., 22 tab.
- (1964) - Design of rock slopes (from state of stress in the earth's crust). Am. Elsevier Pub. Co. Inc.
- NOSE M. (1964) - Rock tests in situ, conventional tests on rock properties and design of Kurobegawa n° 4 dam based thereon. 8ème Congrès des Grands Barrages. Q 28, R.12. 33p., 40 fig.
- ONODEKA T.F. (1963) - Dynamic investigation of foundation rocks in situ. Proc. of 5th symposium on rock mechanics. Un. Minnesota. Pergamon Press. pp. 517-533, 6 fig.
- PELTIER R. (1954) - Etude théorique de l'essai brésilien, Bulletin R.I.L.E.M. Oct.
- PETTIJOHN F. (1957) - Sedimentary rock, 2nd edition. New-York. Harper and Brothers, 526 p.
- RICKER N. (1963) - The form and nature of seismic waves and the structure of seismograms. Geophysics. Vol. 5. pp. 348-357.
- RITTMANN L. (1963) - Les volcans et leur activité. Paris. Masson. 301 p., 113 fig.
- SANDER B. (1948) - Introduction à la science des structures des massifs. Vienne Springer.
- (1926) - Zur Petrographisch-Tektonischen Analyse. Vienne. Bul. d. Geol. Bundesanstalt.
- SCHEIBLAUER L. (1963) - Modellversuche zur Klärung des Spannungszustandes in steilen Böschungen. Rock Mechanics and Engineering Geology. Vol. 1, n° 1.
- SCHMIDT W. (1925) - Gefügestatistik. Tschermaks min. und petrog. Mitt.
- SELIG T., VEY E. (1965) - Shock induced stress waves propagation in sand. A.S.C.E. soil mec. May.
- SERAFIM J.L. (1964) - Etude des fondations rocheuses de barrages en béton. Annales I.T.B.T.P. Mai.
- SOCIETE INTERNATIONALE DE MECANIQUE DES ROCHES (1966) - Comptes-rendus du 1er Congrès. Lisbonne. Laboratorio Nacional de Engenharia Civil. T.1, 795 p., 650 fig. T. 2, 679 p., 350 fig.
- SOCIETE INTERNATIONALE DE MECANIQUE DES ROCHES (1966) - Enquête sur la recherche dans le domaine de la mécanique des roches. Lisbonne. 66 p.
- STINI J. (1942) - Talzuschub und Bauwesen. Die Bautechnik.
- SUSSTRUNK (1957) - La détermination des modules d'élasticité des roches à l'aide de mesures sismiques. Note non publiée. Zurich. Septembre. 15 p.
- SZENDREI M. (1960) - The frequency content and attenuation of seismic wavelets along surface of different types of soils. Geoph. pur. appl. 46. pp. 47-65, 10 fig.
- TALOBRE J. (1957) - La mécanique des roches. Paris. Dunod. 444 p., 161 fig.
- (1961) - La détermination expérimentale de la résistance des roches d'appui de barrages et de parois de souterrains. 7ème Congrès des Grands Barrages. Q 25. 25 p., 18 fig.
- TEIICHI KOBAYASHI (1954) - On the tectonic history of Taiwan. Jour. of Sc. univ. Tokyo. Vol. 9, part. II, sect. II.

- TELEMAC (1965) - References - Auscultation permanente ou provisoire de tous les ouvrages d'art. Paris. Promotion vente.
- THENOZ B., FARRAN J. (1965) - L'altération des roches, ses facteurs, sa prévision. Annales I.T.B.T.P. Nov. pp. 1534-1548, 5 fig.
- TERZAGHI K. (1961) - Engineering geology on the job and the class room. Jour. Boston Soc. Civil Eng. 48. pp. 335-347.
- TERZAGHI R. (1965) - Sources of error in joint survey. Geotechnique. Sept. pp. 287-304, 12 fig.
- TIMOSHENKO (1960) - Résistance des matériaux. Vol. 2. Paris. Béranger. 544 p., 270 fig.
- U.S.B.R. (1959) - Strength, petrographic and elastic properties of rock cores from Sly Park Dam site. U.S.B.R. Tec. Inf. Branch. 19 p., 5 fig.
- VIALON P. (1966) - Etude géologique du massif cristallin Dora-Maira (Italie). Grenoble. Thèse Doc. d'Etat.
- WALSH J.B. (1965) - The effect of cracks on the Uniaxial Elastic Compression of Rocks. Journ. of Geoph. Research, January 15. Vol. 70, n° 2. pp. 399-411, 11 fig.

