

Pier Paolo Rossi

Les fondations du barrage de Ridracoli (Italie)

(mémoire présenté aux Journées d'Etudes
Grand Travaux et Géologie, Paris, 11-12 octobre 1983)



LES FONDATIONS DU BARRAGE DE RIDRACOLI (ITALIE)

Pier Paolo Rossi *

1. INTRODUCTION

Le barrage de Ridracoli constitue l'ouvrage principal du vaste projet du réseau de distribution d'eau potable à un ensemble de 25 communes en Romagne (Italie) (Fig. 1).

Le commettant de l'ouvrage est le Consortium des Eaux des Provinces de Forlì et de Ravenne qui a confié le projet à la Société Alpina de Milan.

Le barrage est situé dans les Apennins Centraux entre les régions de Toscane et de Romagne, à 50 Km de la ville de Forlì, et barre la vallée du fleuve Bidente à 460 m d'altitude, constituant un réservoir d'environ 30 millions de m³ (Fig. 2).

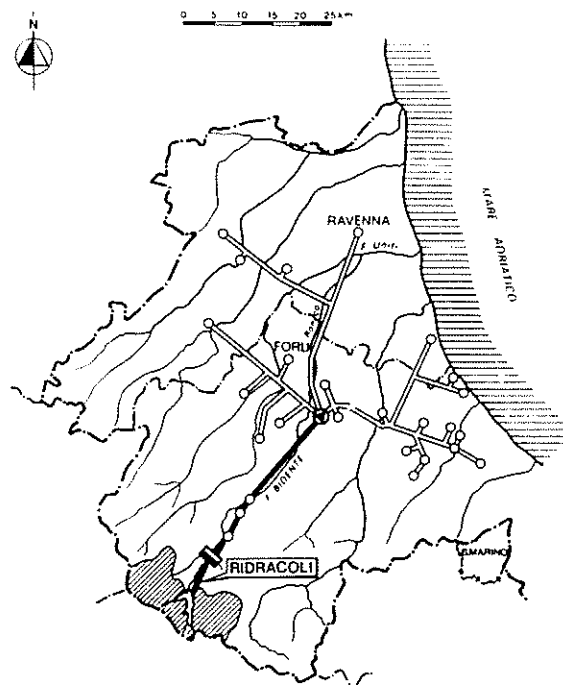


Fig. 1
Schéma général de l'installation

- Eau non potable
- Eau potable
- ☐ Usine hydroélectrique
- ⊙ Station de traitement des eaux

* Division géomécanique ISMES S.p.a. - Bergamo, Italie

Le barrage du genre poids-voûte s'appuie sur un "pulvino" de fondation et présente une hauteur maximum de 103 m, le développement du couronnement étant de 432 m avec un volume total de béton de 59.000 m³.

La figure 3 montre le barrage pendant la construction.



Fig. 2
Planimétrie

2. CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES ET STRUCTURALES DE LA FORMATION ROCHEUSE DE FONDATION

Dans la surface du réservoir et dans la section d'appui du barrage affleure presque partout une formation de marnes et de grès du Miocène.

Cette formation, ayant une épaisseur de plus de 5000 m, est constituée par une alternance rythmique de grès (44%), de siltites et des marnes (56%).

Chaque séquence marne-grès a des épaisseurs variables allant de quelques décimètres jusqu'à plus de 7 m et présentant une grande continuité selon le plan de stratification. Les couches ont parfois des intercalations de quelques centimètres de marne laminée et feuilletée et des voiles de calcite secondaire fortement striée dans le sens d'immersion des couches.

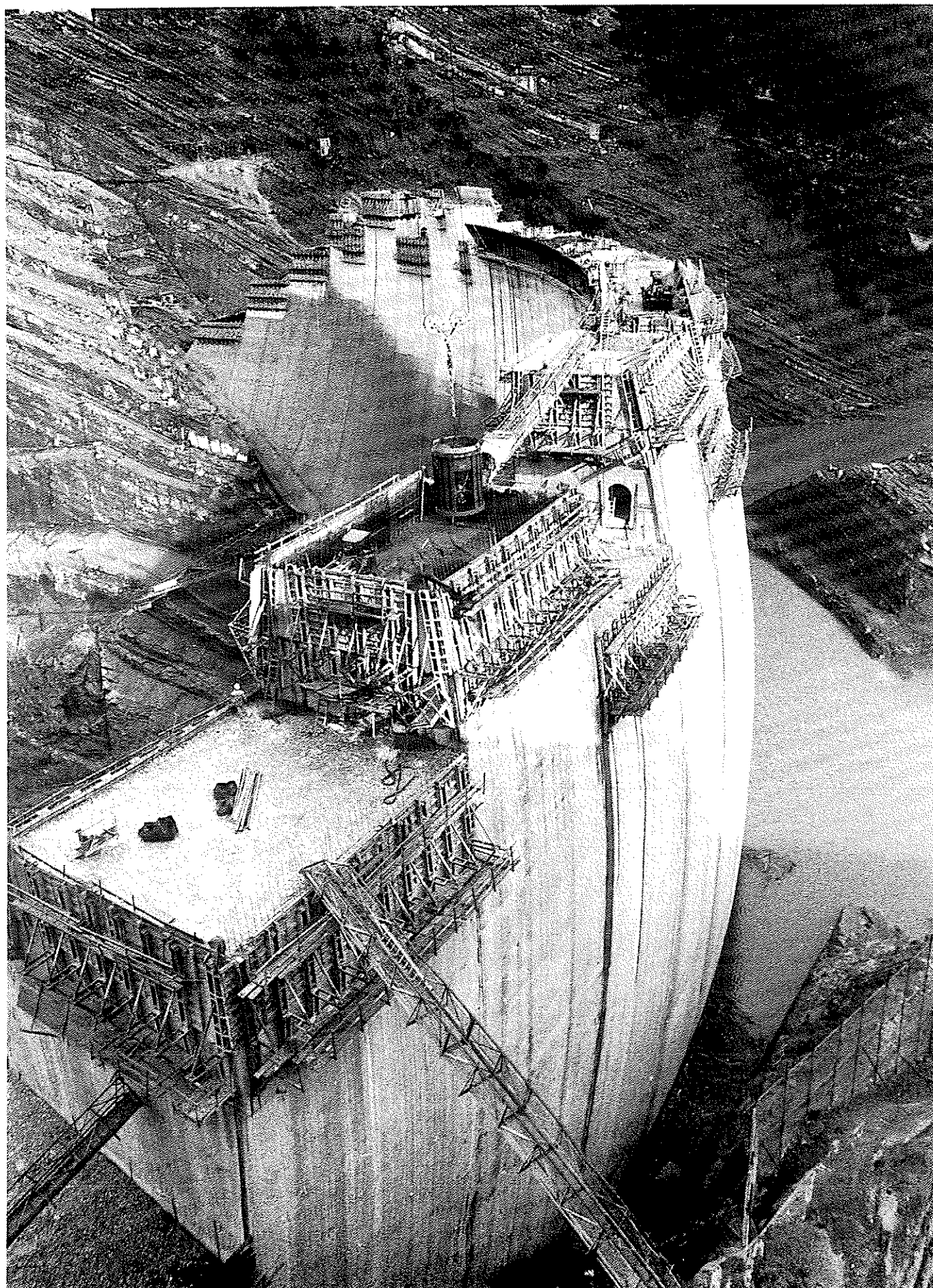


Fig. 3 Vue du barrage en construction

En correspondance de la section du barrage, la succession présente une immersion vers le sud-ouest avec une allure régulière monoclinale.

La fig. 4 montre une coupe géologique relevée le long de la vallée du fleuve Bidente. On peut y observer que dans la zone d'appui du barrage la formation marne-grès présente une stratification très régulière. En amont et en aval du barrage sont clairement visibles deux chevauchements ayant dérangé profondément la formation et ayant donné lieu à de nombreuses failles.

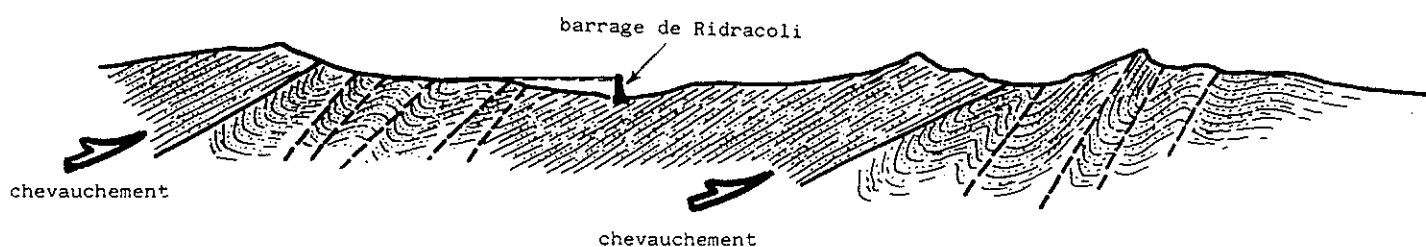


Fig. 4 Section géologique le long de l'axe de la vallée

Le schéma structural du massif rocheux d'appui du barrage a été déterminé par un relèvement stratigraphique de surface détaillé concernant 660 couches et aussi par 20 sondages poussés jusqu'à une profondeur d'environ 80 m. Les principales caractéristiques structurales du massif rocheux illustrées dans le diagramme polaire de la fig. 5 sont les suivantes:

- un système de joints de stratification S_t avec immersion vers l'amont selon l'axe du barrage de 218° , avec un angle d'inclinaison de 27°
- quatre systèmes de fractures sousverticales, concernant surtout le grès, dont deux (KKI) ayant presque la même direction que l'axe de la vallée et les deux autres (KKD) à peu près perpendiculaires aux précédentes. Ces fractures présentent des ouvertures de 1 à 3 mm remplies de calcite et parfois de matière terreuse mais seulement dans les zones les plus décomprimées et superficielles.

Les principaux systèmes de discontinuité présents dans le massif rocheux sont indiqués dans le schéma structural simplifié de la fig. 6.

Fig. 5
Schéma des caractéristiques
structurales du
massif rocheux d'appui
du barrage

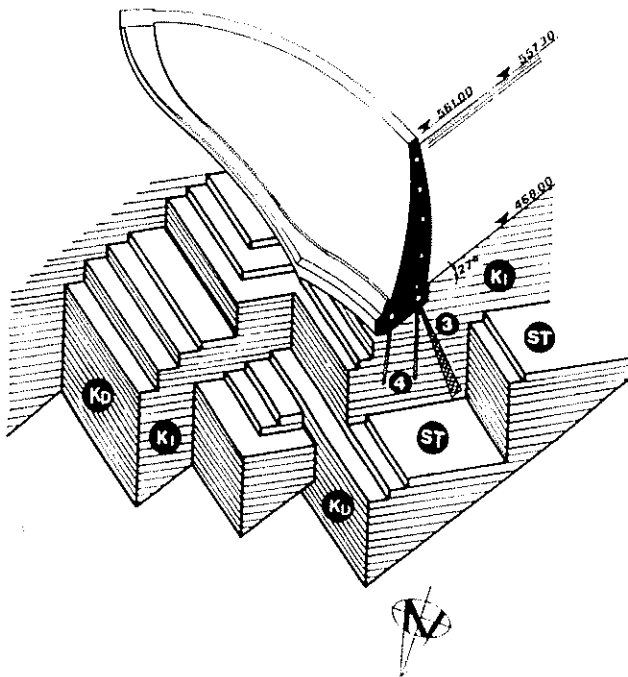
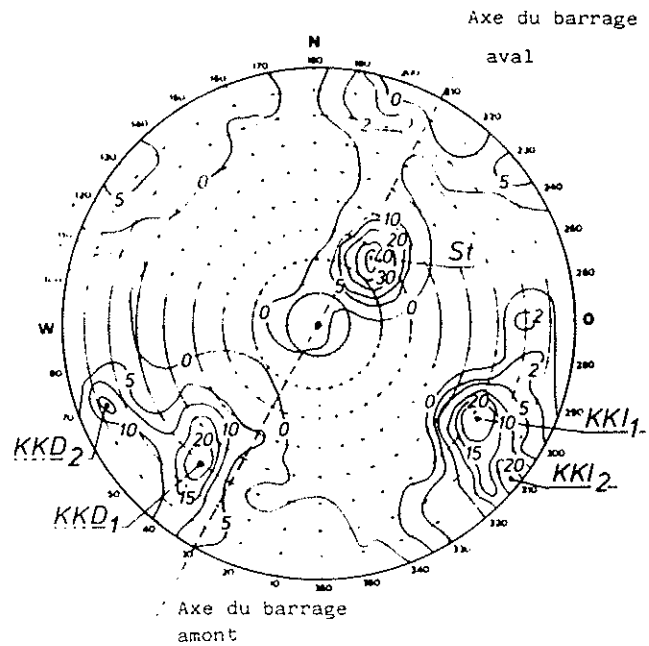


Fig. 6
Représentation schématis-
que des principaux sys-
tèmes de joints

L'étude des surfaces de stratification a été effectuée avec une attention particulière, avec un relèvement photogrammétrique détaillé réalisé dans la zone d'appui du barrage, après avoir mis à nu le substrat rocheux.

On a observé la présence de 3 joints de stratification caractérisés par des intercalations de marne laminée. Le long de ces joints, la résistance au glissement s'abaisse jusqu'à des valeurs très petites.

Dans la section de la fig. 7 est illustrée la série stratigraphique concernant la fondation du barrage avec indication de la position des 3 joints de stratification caractérisés par la présence de la marne laminée, ainsi que le pourcentage de marne et de grès présent dans les différentes couches du massif rocheux.

Dans la fig. 8 on voit une vaste partie de la roche d'appui du barrage auprès de la rive droite.

Fig. 7
Relief stratigraphique
de la fondation du bar-
rage

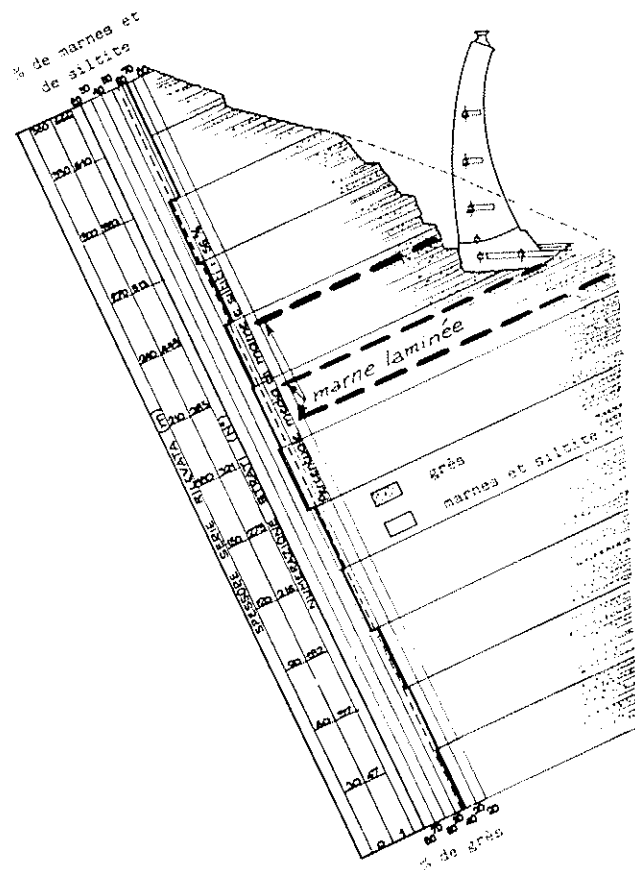




Fig. 8 Vue générale de la rive droite avec l'indication de la zone d'appui du barrage

3. CARACTERISATION MECANIQUE DE LA FORMATION ROCHEUSE DE FONDATION

Une vaste série d'essais "in situ" et au laboratoire a été effectuée par ISMES pour déterminer les caractéristiques mécaniques du massif rocheux et des différents types de roche composants.

3.1 ESSAIS DE LABORATOIRE

Des essais de laboratoire effectués sur des échantillons cylindriques ayant un diamètre $\Phi = 80$ mm et une hauteur $h = 160$ mm, prélevés avec un triple carottier, ont donné, pour les

deux types de roche, les valeurs moyennes suivantes:

	grès	marne et siltite
Poids volumique (g/cm ³)	2,70	2,65
Résistance à la compression monoaxiale (MPa)	de 75 à 145	de 45 à 74
Module d'élasticité (MPa)	de 18.000 à 26.000	de 8.000 à 18.000

Sur le lithotype marneux ont été effectués de nombreux essais de compression monoaxiale et triaxiale pour l'étude des caractéristiques mécaniques de déformabilité et de résistance en fonction de l'orientation entre le plan de sédimentation et la direction des contraintes. Les échantillons ont été prélevés avec trois angles d'inclinaison (α) différents par rapport à la surface de stratification:

$$\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$$

Les résultats des essais, effectués avec les valeurs de la pression de confinement suivantes

$$0 - 2,5 - 5,0 - 10 - 15 \text{ (MPa)}$$

sont résumés dans le diagramme de la fig. 9 dans laquelle sont indiquées les valeurs moyennes de la résistance à la compression

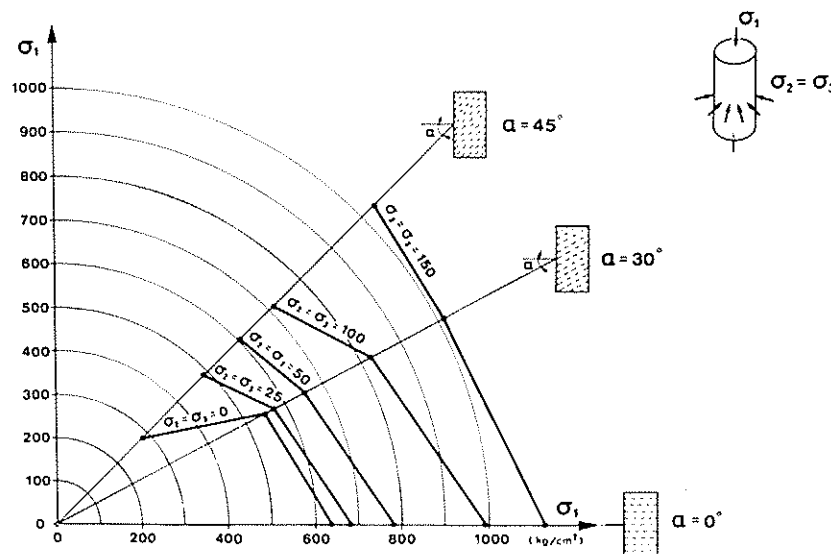


Fig. 9 Essais triaxiaux de laboratoire sur échantillons de marne.
Etats de contrainte de rupture en fonction de l'angle
entre l'axe de l'échantillon et le plan de stratification

en fonction du confinement latéral ($\sigma_2 = \sigma_3$) et de l'angle (α) entre la direction de la contrainte axiale (σ_1) et le plan de stratification.

On observe une sensible diminution de la résistance lorsqu'on passe des essais avec $\alpha = 0^\circ$ à ceux avec $\alpha = 45^\circ$. Cette diminution de résistance apparaît de moins en moins accentuée à mesure que la pression de confinement augmente.

3.2 ESSAIS "IN SITU"

En tenant compte des caractéristiques structurales particulières de la formation rocheuse de fondation du barrage, les essais effectués sur place se sont démontrés beaucoup plus intéressants et plus significatifs que les essais au laboratoire, car ils ont permis de déterminer les caractéristiques mécaniques d'échantillons de grand volume certainement très représentatifs du massif rocheux.

A l'intérieur des galeries de reconnaissance creusées dans la zone d'appui du barrage, les caractéristiques mécaniques du massif rocheux ont été déterminées au moyen des essais suivants:

- Essais de déformabilité $\left\{ \begin{array}{l} \text{charge sur plaque} \\ \text{chambre hydraulique} \\ \text{vérin plat} \end{array} \right.$
- Essais de charge à longue durée avec vérin plat pour la détermination des caractéristiques de fluage
- Essais de cisaillement le long des joints de stratification

3.2.1 E s s a i s d e d é f o r m a b i l i t é

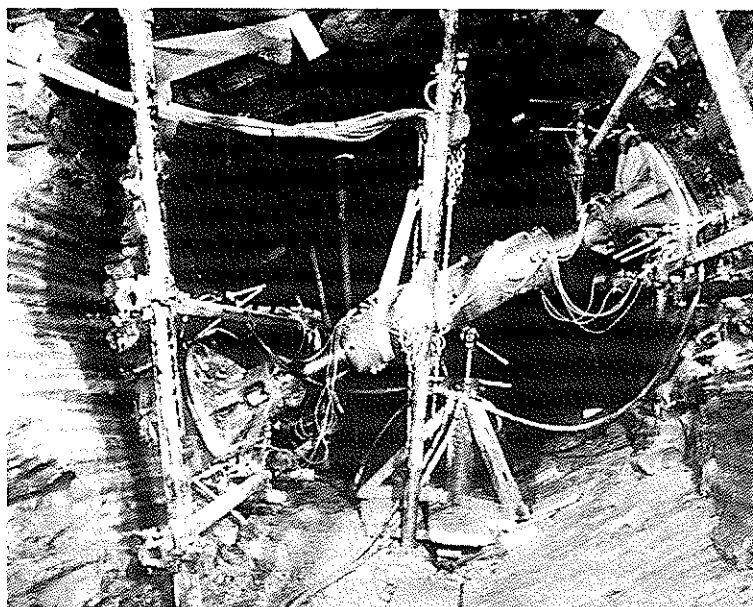
a) Essais de charge sur plaque

De nombreux essais de charge sur plaque ont été effectués dans quelques sections des galeries de reconnaissance.

Ces essais ont été faits, soit dans la direction perpendiculaire soit dans la direction parallèle par rapport à la stratification, en utilisant des vérins plats circulaires ayant un diamètre $\phi = 60$ cm et une pression uniformément distribuée jusqu'à une valeur maximum de 6 MPa (Fig. 10).

L'emploi de vérins plats appliqués directement à la surface rocheuse, qui doit être aplanie auparavant, permet d'obtenir une distribution uniforme des contraintes, ce qui donne ainsi, avec une bonne approximation, le schéma théorique de plaque parfaitement flexible.

Fig. 10
Essai de charge sur
plaque en direction
parallèle au plan de
stratification



Les déterminations des déformations dérivant de l'application de la charge ont été effectuées avec des extensomètres multibase spéciaux à l'intérieur de trous de sondage ayant un diamètre $\Phi = 75$ mm perforés au centre de la surface de charge.

Dans la fig. 11 sont représentés les diagrammes des déformations obtenues pour une section-type de la galerie de reconnaissance dans laquelle ont été effectués deux essais de charge (un en direction perpendiculaire et l'autre en direction parallèle à la stratification). Ces déformations ont été représentées dans le diagramme en fonction de leur profondeur et de trois valeurs différentes de la contrainte appliquée (2, 4, 6 MPa).

Les valeurs moyennes des modules de déformabilité pour chacune des trois valeurs de la charge à plusieurs profondeurs de la surface sont indiquées dans les tableaux ci-après:

Modules de déformabilité E_d (MPa)/ 10^2 dans la direction perpendiculaire à la stratification			
profondeur (cm) $\Delta \sigma$ (MPa)	0	25	50
2	98	138	152
4	77	117	139
6	78	118	139

Modules de déformabilité E_d (MPa) / 10^2 dans la direction parallèle à la stratification			
$\Delta\sigma$ (MPa) \backslash profondeur (cm)	0	25	50
2	190	275	250
4	155	210	200
6	145	200	213

La technique de mesure adoptée permet d'évaluer le module de déformabilité du massif rocheux non dérangé au-dessous de la couche de roche superficielle altérée qui se trouve autour de la galerie de reconnaissance.

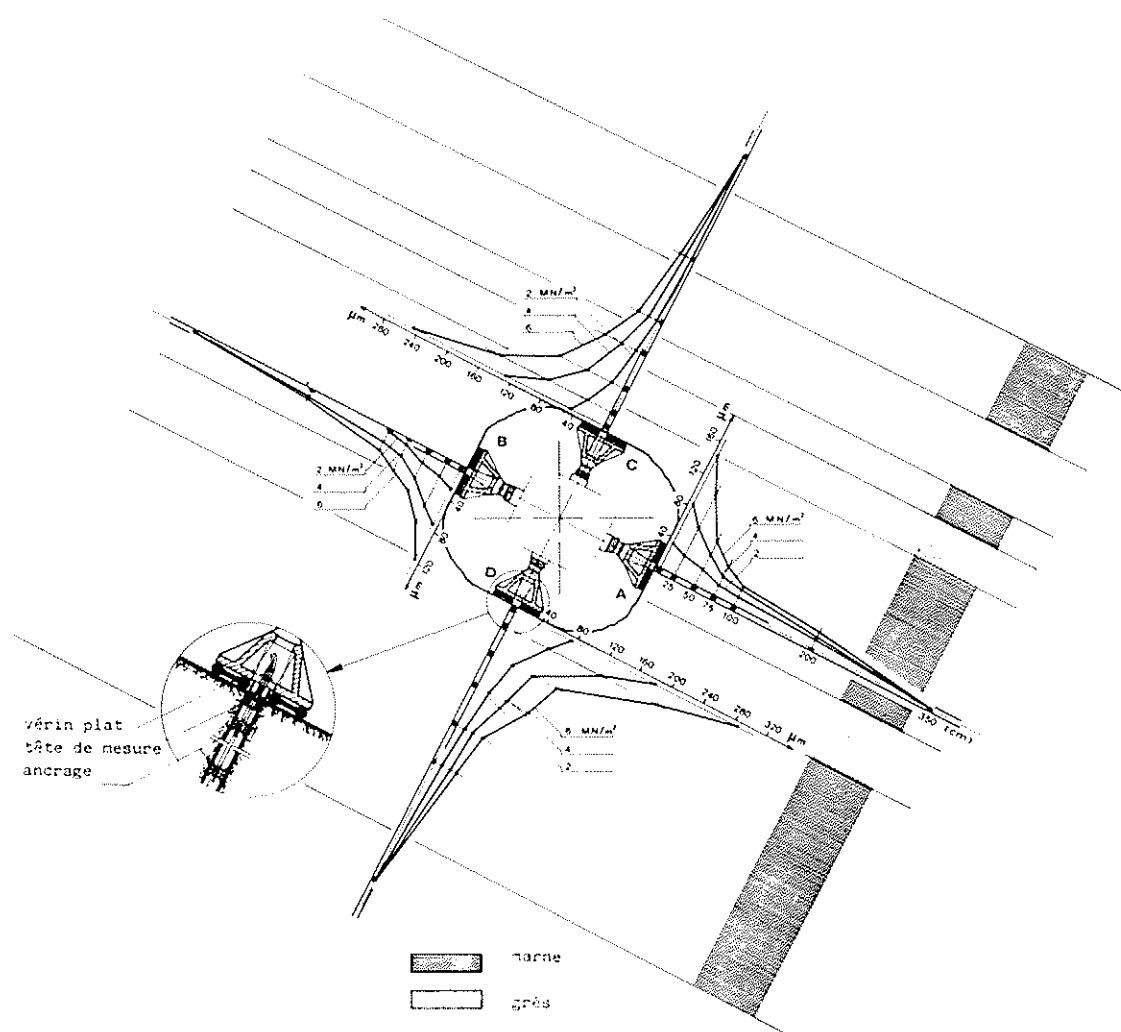


Fig. 11 Essais de charge sur plaque en direction perpendiculaire et parallèle à la stratification. Diagrammes des déformations en fonction de la profondeur de la surface de charge

L'épaisseur de cette couche altérée était de 50 cm environ dans la direction perpendiculaire aux couches, comme on a pu démontrer au moyen d'essais de vitesse sonique et de carottage sonique effectués à l'intérieur des trous perforés au centre des surfaces de charge.

Les mesures de vitesse sonique (V) effectuées à l'intérieur des trous ont été comparées avec les valeurs des modules de déformabilité E_d fournis par les essais de charge sur plaque. Dans la fig. 12 est indiquée la corrélation entre E_d et V^2 trouvée dans une section d'essai de la rive droite.

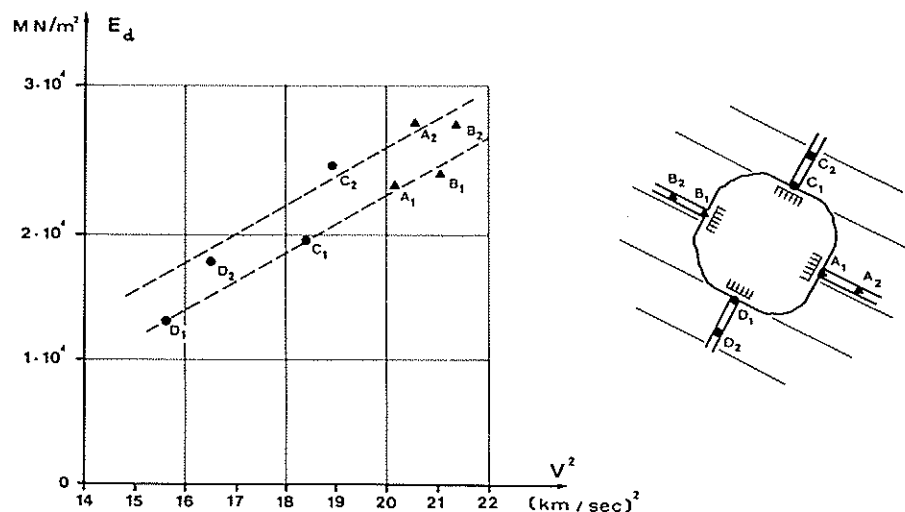


Fig. 12 Essais de charge sur plaque. Corrélation entre le module de déformabilité (E_d) et la vitesse de propagation des ondes élastiques longitudinales (V) à deux profondeurs différentes de la surface de charge (7 cm et 50 cm)

b) Essais avec chambre hydraulique

La présence de couches à grande épaisseur (jusqu'à 2.00 m) a conseillé de recourir à des techniques d'essais capables de déterminer le comportement déformatif du massif rocheux sur volumes de considérable dimension.

Dans ce but, on a utilisé la technique d'essai avec chambre hydraulique, en appliquant sur la paroi de la galerie de reconnaissance, ayant un diamètre $D = 3$ m, une pression hydrostatique uniforme jusqu'à une valeur maximum de 4,0 MPa sur une longueur

de 8 m. L'essai a été effectué soit pour la rive droite que pour la rive gauche d'après le schéma représenté dans la fig. 13. Cette technique, mise au point par ISMES, a été récemment perfectionnée au moyen d'essentielles améliorations du système d'application de la charge et de mesure.

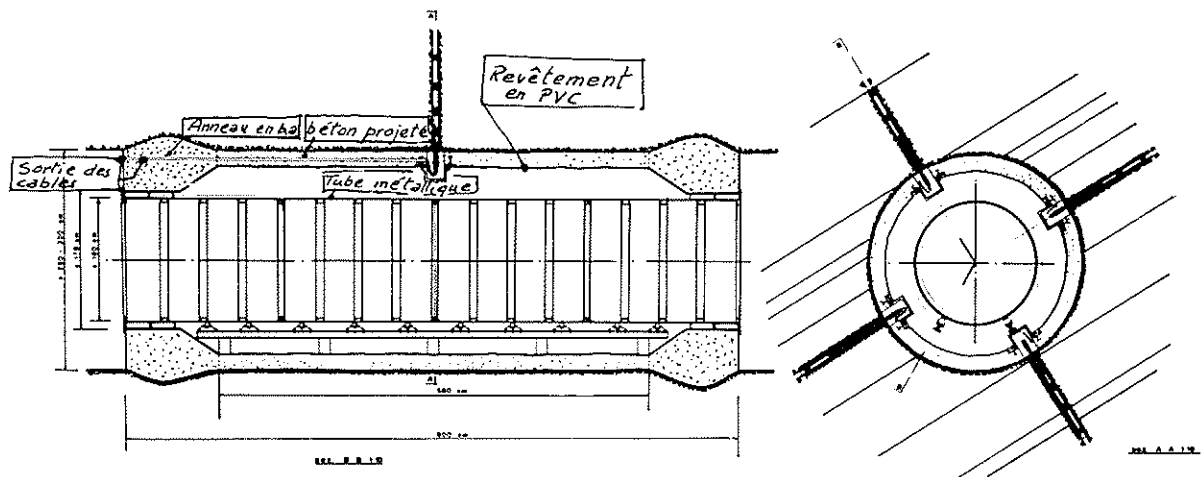
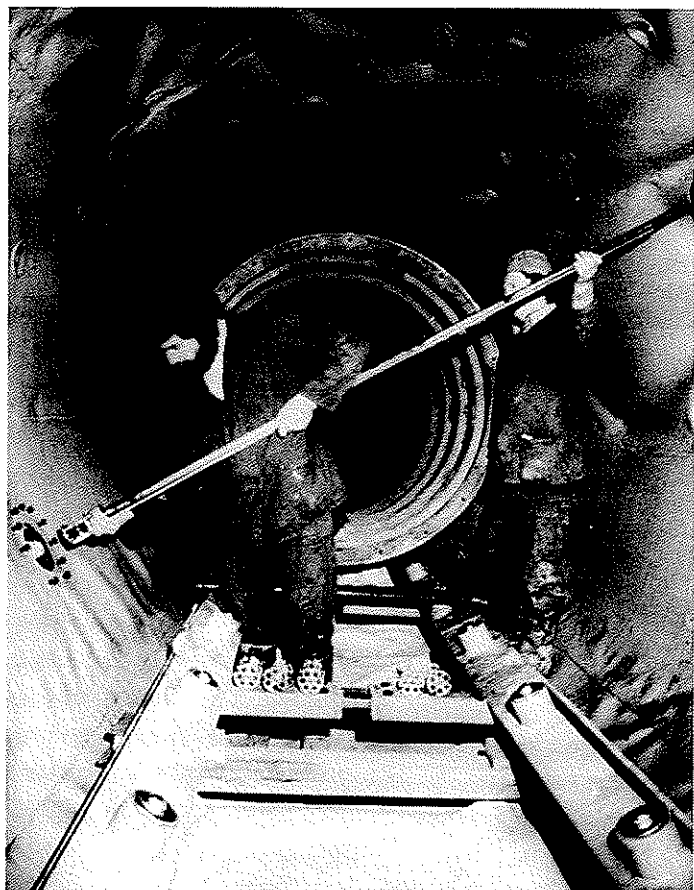


Fig. 13 Schéma de l'essai avec chambre hydraulique

Fig. 14
Vue de l'intérieur de
la chambre pendant le
montage des extensomè-
tres radiaux



Les déformations résultant de l'application de la charge ont été mesurées dans la section centrale de la chambre au moyen d'extensomètres multibase installés à l'intérieur de trous radiaux perforés dans la direction perpendiculaire et dans celle parallèle aux surfaces de stratification.

Dans la fig. 14 on peut voir l'intérieur de la chambre pendant l'installation des extensomètres.

Les déformations observées au cours de l'essai dans la rive gauche sont représentées dans les diagrammes de la fig. 15, en fonction de la profondeur, pour plusieurs valeurs de la pression appliquée à la surface de la galerie.

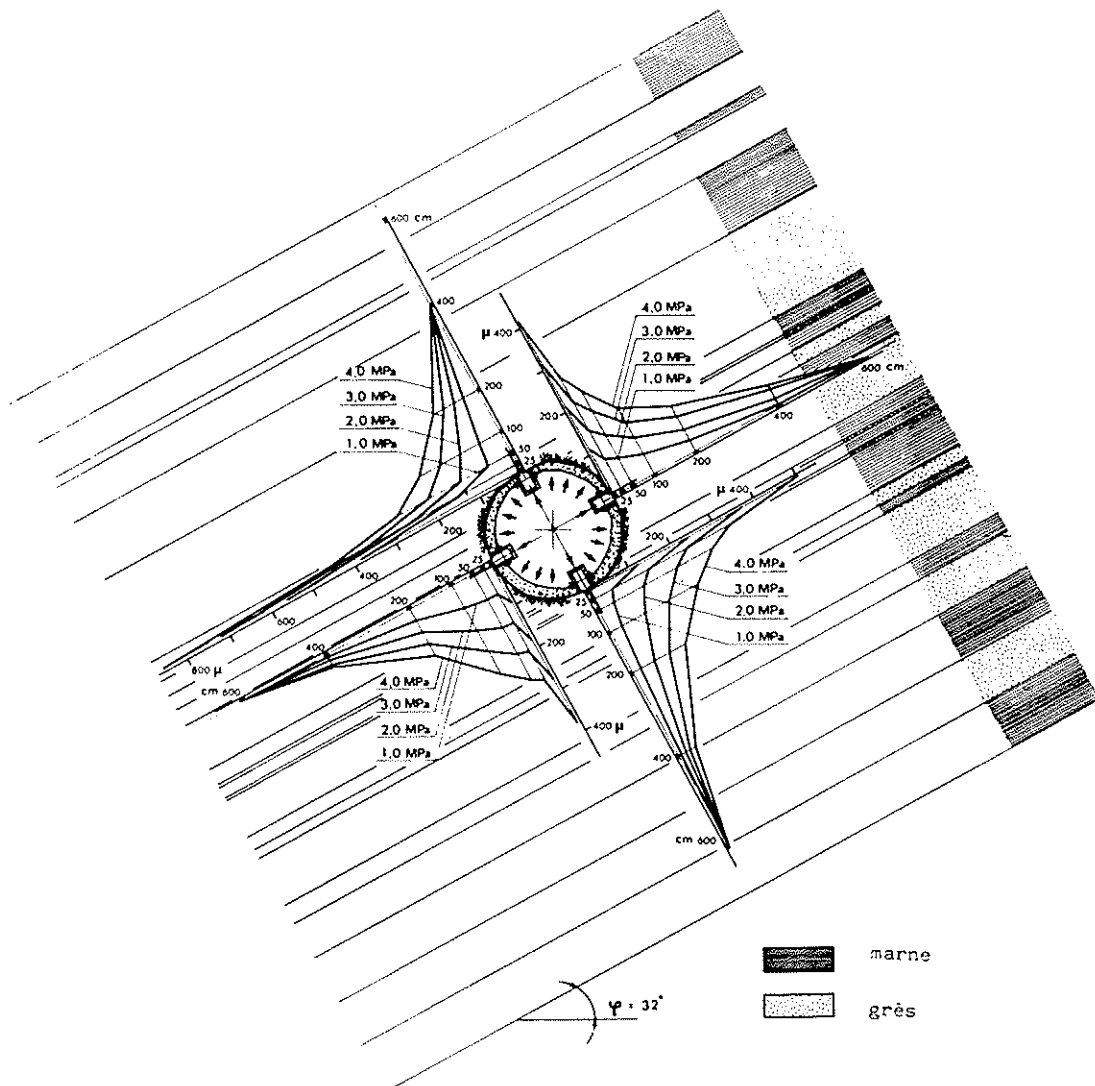
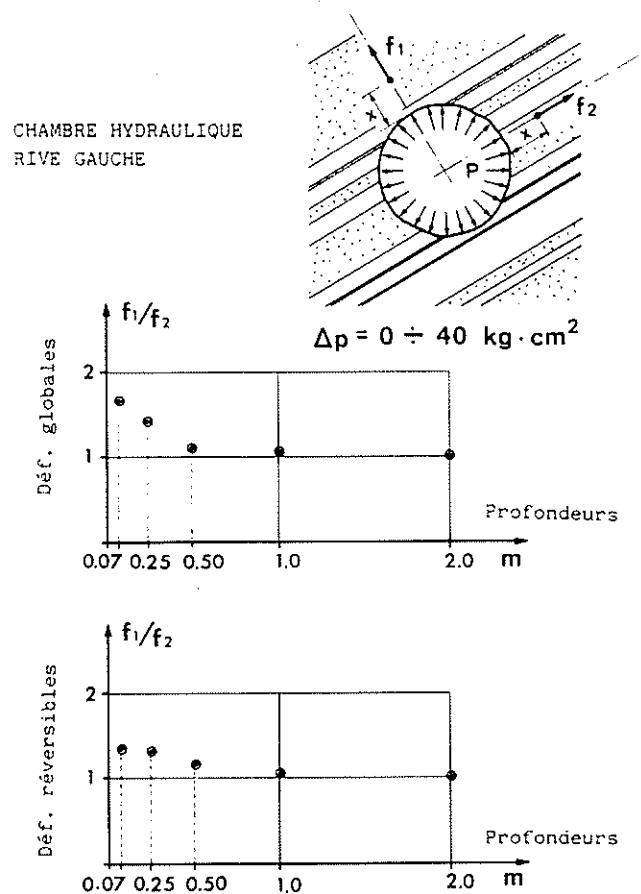


Fig. 15 Essai avec chambre hydraulique dans la rive gauche.
Diagrammes des déformations en fonction de la profondeur

Dans les diagrammes de la fig. 16 sont représentées les valeurs du rapport f_1/f_2 entre les déformations observées dans la direction perpendiculaire et dans la direction parallèle aux stratifications, en fonction de la profondeur. On peut remarquer que en-dessous d'une couche corticale d'environ 50 cm d'épaisseur, où l'on observe un fort relâchement des couches rocheuses, le rapport f_1/f_2 présente des valeurs très basses, comprises entre 1,1 et 1,2. Ces valeurs sont nettement inférieures à celles observées au cours des essais de charge sur plaque, où le rapport entre les déformations dans la direction perpendiculaire et celle parallèle à la stratification est, en moyenne, compris entre 1,3 et 1,5.

Fig. 16
Valeurs du rapport f_1/f_2 entre les déformations en direction perpendiculaire et parallèle à la stratification en fonction de la profondeur



3.2.2 Essais avec vérin plat pour la détermination des caractéristiques rhéologiques des marnes

De nombreux essais avec vérin plat ont été effectués sur des couches de marne à grande épaisseur (> 1 m) soit dans la rive gauche soit dans la rive droite.

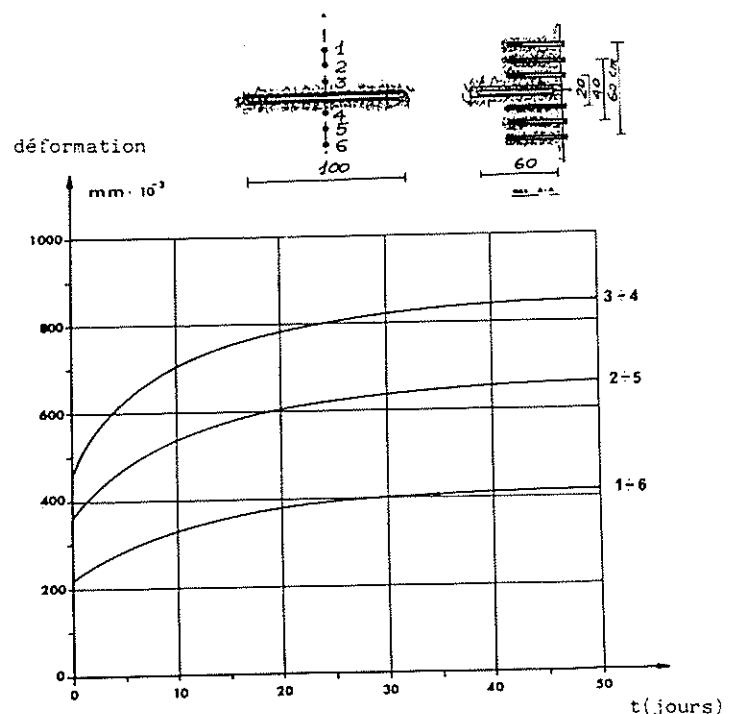
Par ces essais on a voulu déterminer "in situ", en premier lieu, les caractéristiques de la déformabilité du lithotype marneux dans la direction perpendiculaire aux surfaces de stratification et l'état naturel de contrainte présent aux points d'essai.

Par la suite les essais avec vérin plat ont été utilisés avec succès pour la détermination des caractéristiques rhéologiques du lithotype marneux, au moyen d'essais de charge à longue durée (50 jours environ).

Dans chaque vérin plat a été appliquée une pression de 10 MPa laquelle a été maintenue constante pendant toute la durée des essais au moyen d'accumulateurs hydropneumatiques. Les mesures de déformation ont été relevées au moyen de transducteurs de déplacement connectés à des enregistreurs automatiques.

A titre d'exemple, dans la fig. 17 sont illustrés les diagrammes des déformations obtenues en fonction du temps sur trois bases de mesure à cheval du vérin. Au temps $t = 0$ les valeurs indiquées sont celles des déformations instantanées observées au moment de l'application de la charge.

Fig. 17
Essai à longue durée
avec vérin plat. Dia-
grammes des déforma-
tions en fonction du
temps



Les déformations de plus grandes proportions se trouvent, naturellement, dans la base de mesure la plus proche du vérin plat (base 3 - 4). Les deux autres bases dénoncent des déformations de plus en plus décroissantes, étant donné que les contraintes diminuent à mesure que l'on s'éloigne du vérin plat.

Ces essais, compte tenu du dérangement restreint causé à l'échantillon et des grandes dimensions de celui-ci, ont donné des résultats beaucoup plus significatifs que les essais de compression à longue durée qui ont été effectués au laboratoire sur des échantillons de marne prélevés "in situ" par carottage.

3.2.3 Essais de cisaillement

Une attention particulière a été consacrée à la détermination des caractéristiques de résistance le long des surfaces de stratification.

De nombreux essais de cisaillement ont été effectués en galerie pour déterminer les paramètres de résistance le long des joints de stratification.

Ces paramètres, compte tenu de la structure particulière du massif rocheux, revêtent une importance déterminante pour les contrôles de stabilité.

On a observé une variabilité remarquable, selon le genre de contact examiné, qui va d'un angle de frottement $\varphi = 13^\circ$ du contact entre le grès et la marne laminée jusqu'à des angles $\varphi = 30^\circ$ pour les contacts grès-marne.

D'autres essais ont été réalisés, dans la rive droite, dans un affleurement d'une couche laminée, ayant pour but d'approfondir la connaissance du comportement des joints laminés qui représentent l'élément le plus faible de la formation rocheuse. Ces essais ont confirmé la valeur $\varphi = 13^\circ$ et une cohésion de l'ordre de 0,2 MPa.

Les déformations nécessaires pour faire intervenir la résistance au cisaillement maximum se sont révélées très faibles, de l'ordre de 1 à 2 mm.

Le joint présente un comportement du genre élasto-plastique.

4. STABILISATION DU MASSIF ROCHEUX PENDANT LES CREUSEMENTS

Les caractéristiques structurales particulières du massif rocheux et la faible résistance observée dans les couches laminées ont exigé la solution de problèmes de stabilité pendant la phase

d'exécution des creusements d'appui surtout auprès de la rive droite où les creusements entraînaient l'interruption des couches, ce qui compromettait l'équilibre du front aval des creusements.

Les dimensions principales des creusements d'appui du barrage sont les suivantes:

- largeur variable entre 10 m au couronnement et 38 m au pied;
- hauteur moyenne du profil du terrain naturel au fond du creusement: environ 15 m.

Après avoir examiné plusieurs possibilités de creusement et pour des motifs techniques et économiques, on est arrivé à la décision d'appliquer une solution articulée dans les phases suivantes:

- 1° Creusement selon les couches de la formation rocheuse en suivant les systèmes de discontinuité (plans de stratification S_t et joints KI);
- 2° Mise en oeuvre de tirants d'ancrage placés sur la surface aval creusée selon les couches;
- 3° Creusement final à pleine section (dans la zone d'appui) après l'installation des tirants en partant du niveau de couronnement vers le pied.

Le dimensionnement des tirants d'ancrage (intensité et direction) a été établi après une analyse de stabilité des volumes rocheux en aval du creusement d'appui.

L'analyse effectuée est du type tridimensionnel dans l'hypothèse de glissements éventuels le long de la ligne d'intersection des deux systèmes S_t et KKI.

Dans la fig. 19 la méthode d'analyse tridimensionnelle est représentée graphiquement sur le diagramme polaire de Schmidt. Dans ce diagramme on indique la courbe limite d'équilibre qui délimite la zone de stabilité à l'intérieur de laquelle doit se trouver la résultante des forces extérieures appliquées au massif rocheux afin que ces derniers soient en conditions d'équilibre stable.

On peut observer que, uniquement par effect des forces dues à leur poids ($\vec{W}$), le massif rocheux est instable, étant donné que le point W se trouve en dehors du domaine de stabilité.

On a donc déterminé la résultante et la direction de la force ($\vec{A}$) à appliquer au moyen des tirants, de façon à ce que la résultante de toutes les forces $\vec{R} = \vec{W} + \vec{A}$ se trouve à l'intérieur du domaine de stabilité où le coefficient de sécurité F résulte être > 1 .

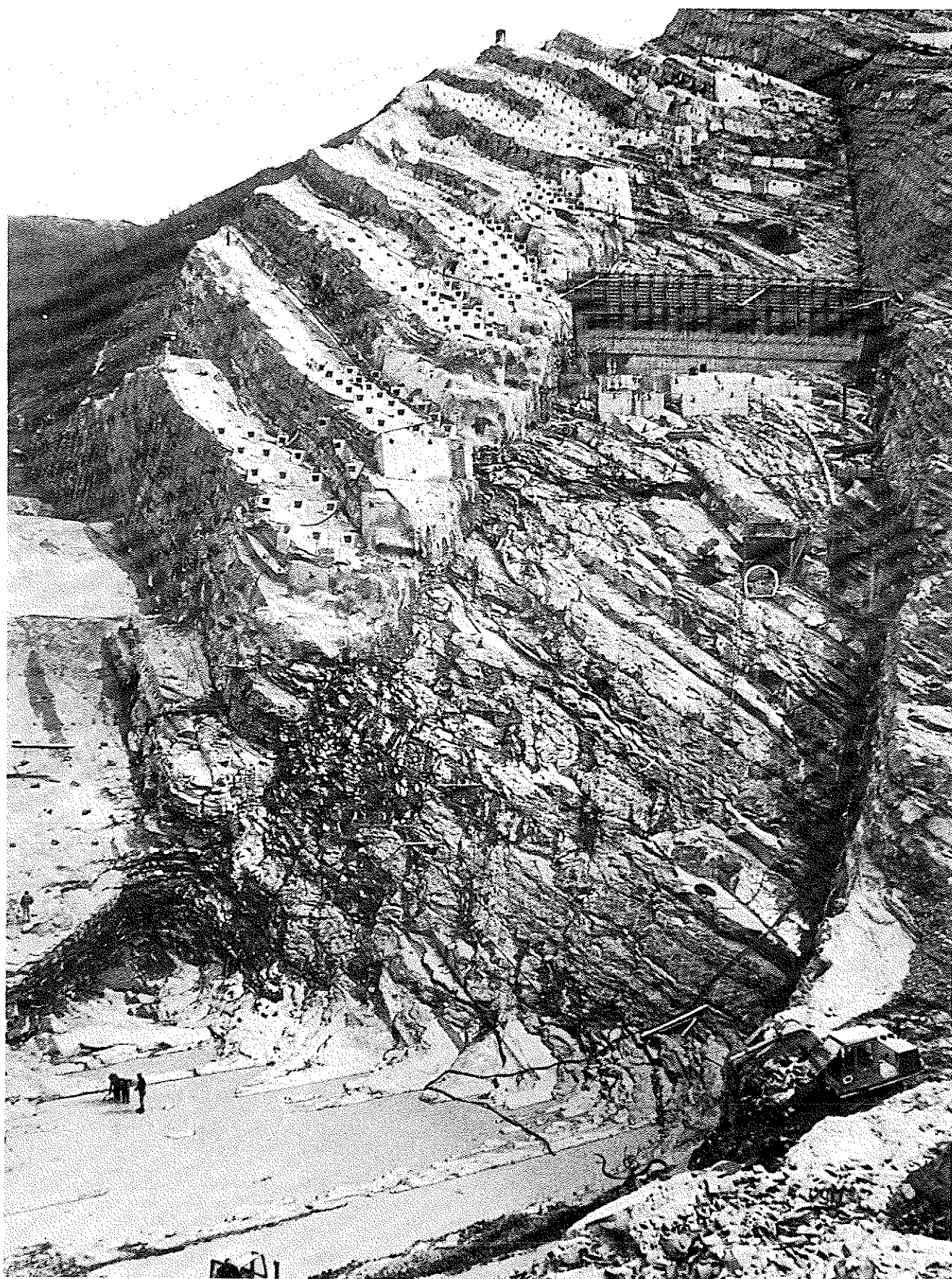


Fig. 18 Vue générale de l'excavation de fondation dans la rive droite. Le système de tirants mis en oeuvre pour la stabilisation de masses rocheuses en aval de l'excavation y est visible

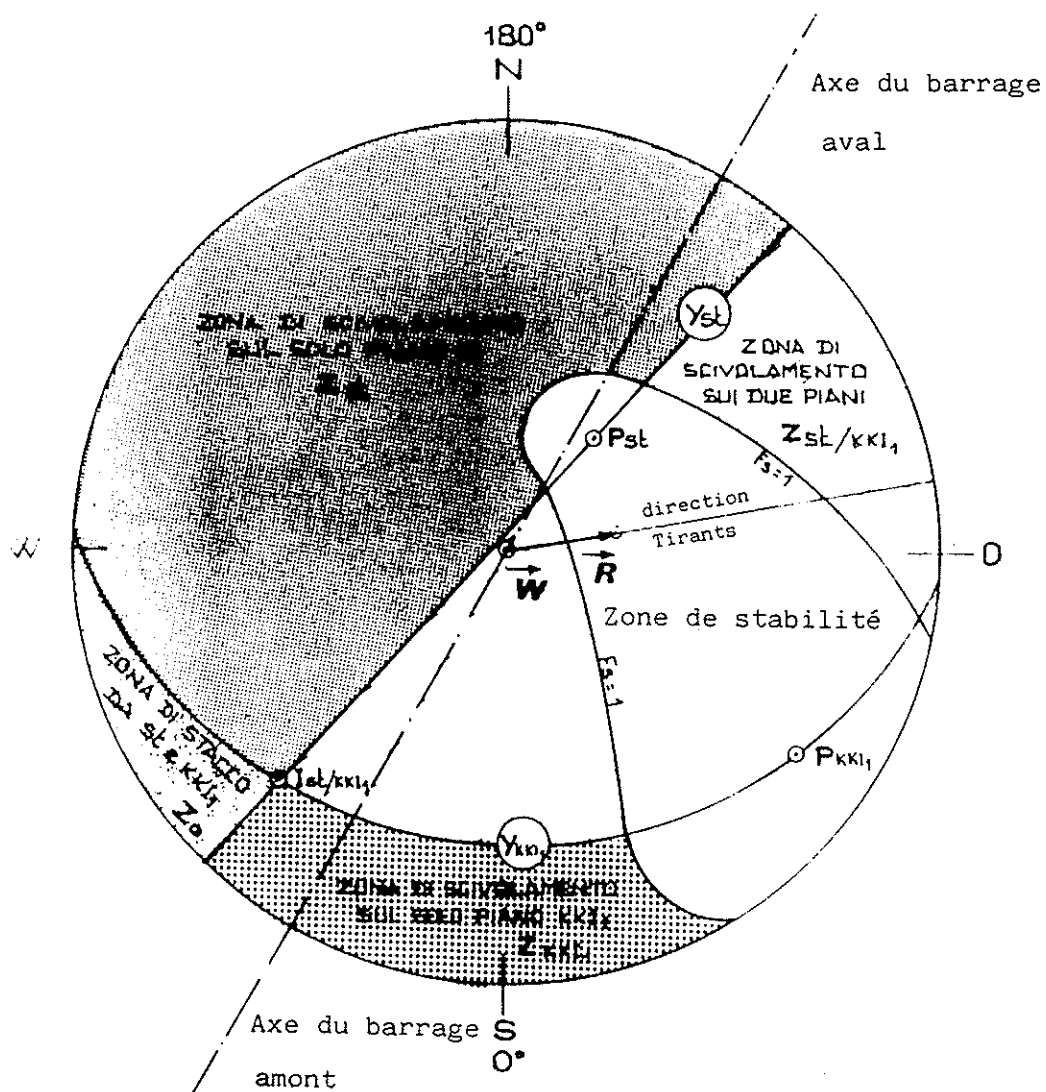


Fig. 19 Représentation graphique de la méthode tridimensionnelle d'analyse de stabilité pour le dimensionnement du système de tirants

Pour le problème en question on a adopté une valeur du coefficient de sécurité $F = 1,2$.

Dans la rive droite, pour la stabilisation d'un massif rocheux d'environ 111.000 m^3 , on a employé les tirants suivants:

573 tirants de 180 t et 37 m de longueur

40 tirants de 150 t et 29 m de longueur

14 tirants de 60 t et 29 m de longueur

La fig. 20 montre la planimétrie des creusements d'appui dans la rive droite avec l'emplacement des tirants. Pour le contrôle des déformations au cours des creusements ont été installés des extensomètres multibase ayant une longueur de 35 m.

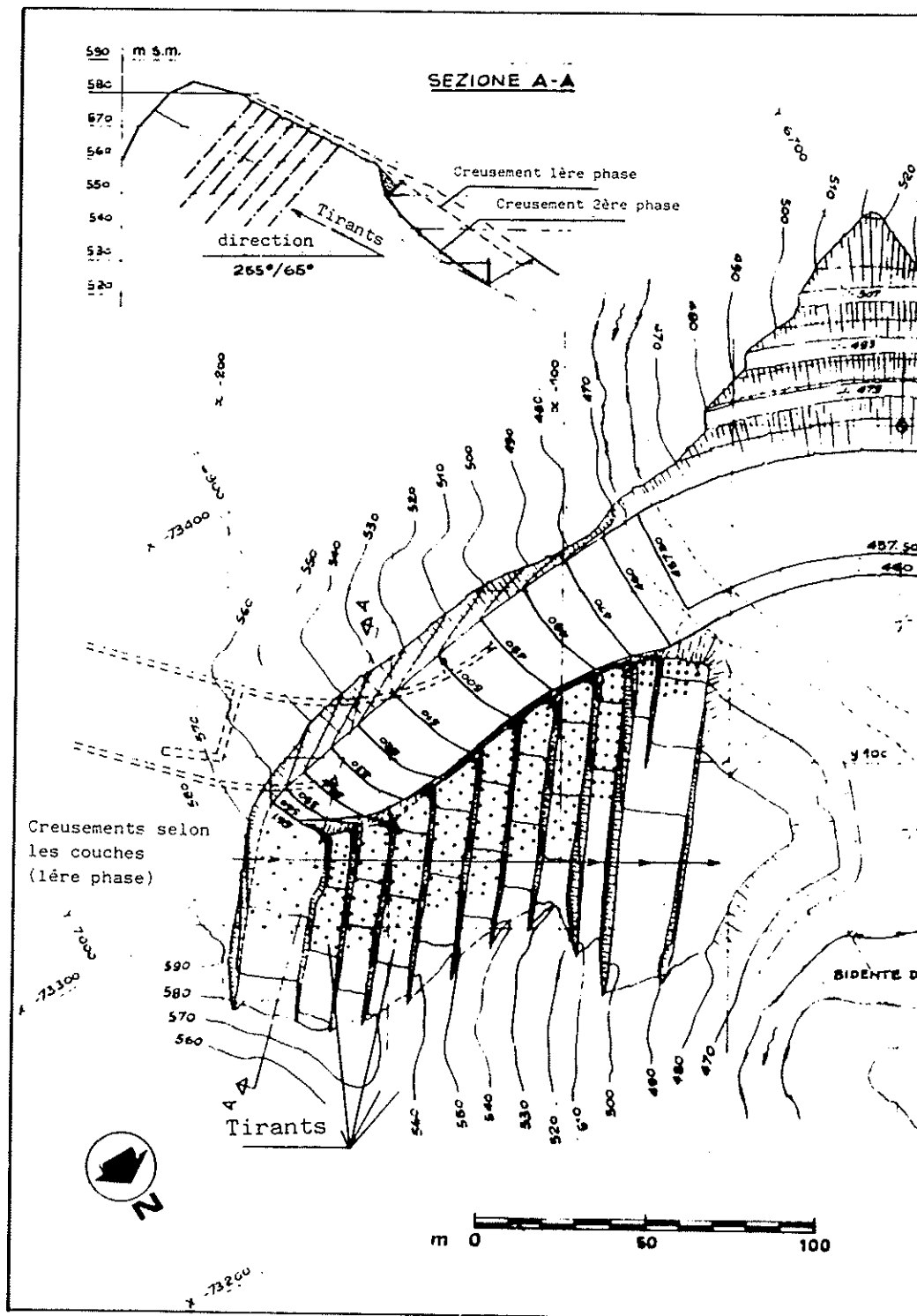


Fig. 20 Planimétrie des excavations d'appui dans la rive droite

Le système de tirants en rive droite à la fin de la construction du barrage est visible dans la fig. 21.

La rive gauche a présenté moins de problèmes de stabilité à cause d'une inclinaison des couches plus favorable. Dans cette zone, un nombre réduit de tirants a été utilisé pour la stabilisation de quelques massifs rocheux superficiels à volume très modeste.

5. INSTRUMENTATION DE CONTROLE DU COMPORTEMENT DE LA ROCHE DE FONDATION

L'ensemble des instruments installés dans le barrage comprend aussi une série d'appareils de contrôle du comportement déformatif de la roche de fondation.

A cet effet, ont été installés 19 extensomètres multibase d'environ 40 m de longueur le long de la zone d'appui du barrage.

Dans la section centrale du barrage et dans deux sections latérales voisines, les extensomètres ont été installés d'après le schéma représenté dans la fig. 22 en partant des galeries creusées dans le "pulvino".

Ces extensomètres, dont chacun est muni de trois bases de mesure placées respectivement à des profondeurs de 8, 20 et 40 mètres, ont une orientation différente par rapport aux plans de stratification.

Les extensomètres ont été installés dès le commencement des travaux de bétonnage dans le but précis d'enregistrer les déformations de la roche dues à l'application de la charge du poids propre de la structure, aux opérations d'injection et de consolidation et, en dernier lieu, à l'action de la charge hydrostatique.

Dans le but de suivre et de contrôler les déformations de la masse rocheuse soumise à l'action des charges mentionnées ci-dessus, on a préparé un modèle mathématique de la formation en utilisant les paramètres de déformabilité obtenus par les essais "in situ".

La fondation a été considérée un milieu élastique orthotrope dont les directions principales sont celle parallèle et celle perpendiculaire aux plans de stratification.

La comparaison entre les résultats fournis par ce modèle et les observations du comportement déformatif de la structure pendant les phases de la construction et de l'exploitation de l'ouvrage permettront d'évaluer l'exactitude des paramètres de déformabilité du massif rocheux fournis par les essais "in situ" et qui ont été adoptés pour les calculs de projet.

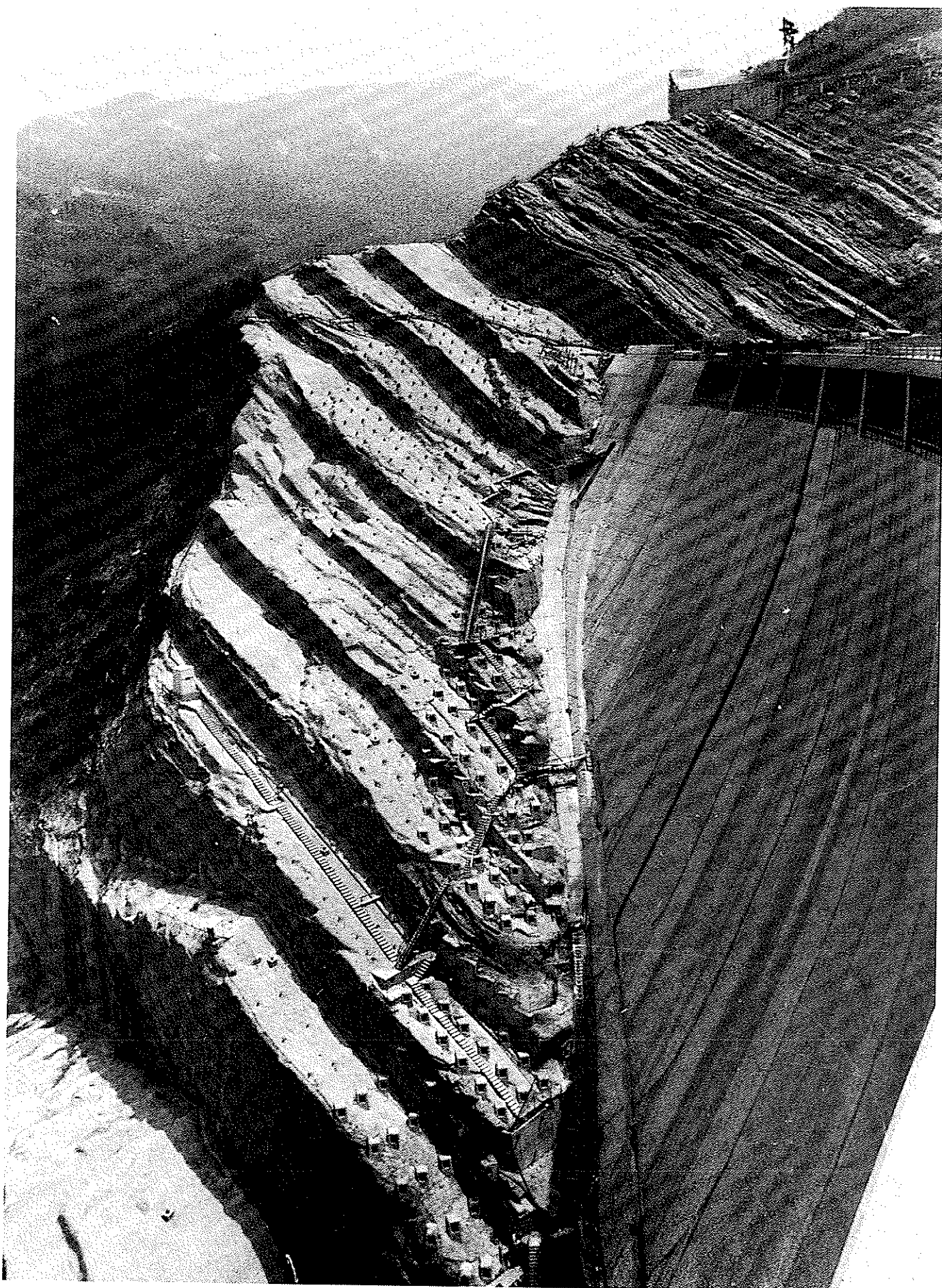
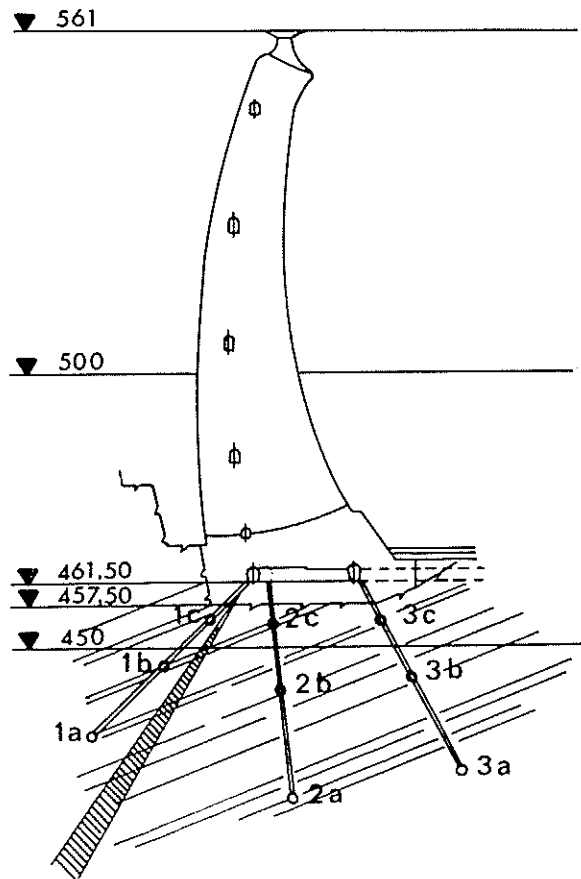


Fig. 21 Vue générale de la rive droite à la fin de la construction du barrage

Fig. 22
Section centrale du barrage avec la position
des extensomètres multi-
base pour le contrôle
des déformations de la
fondation



Pendant la construction du barrage une comparaison entre le comportement de la structure réelle et le modèle de prévision n'a pas été possible à cause de l'exécution simultanée de travaux d'imperméabilisation et de consolidation de la fondation qui ont influencé sensiblement les déformations mesurées par les extensomètres.

Cette comparaison entre la structure réelle et le modèle de calcul deviendra très significative pendant les phases d'application de la charge hydrostatique.

Les premiers cycles de remplissage du bassin sont actuellement en cours. On remarque que, au cours du premier remplissage expérimental jusqu'au niveau de 520 m qui vient d'être terminé, le comportement déformatif des fondations s'est démontré en bonne concordance avec les données fournies par le modèle mathématique.

6. BIBLIOGRAFIE

- Borsetto M., Goffi L., Rossi P.P., (1981)
Studio di ammassi rocciosi stratificati riferito a prove di deformabilità in cunicolo. ISMES Bull.no.151
- Goffi L., Rossi P.P., Borsetto M., (1978)
Interpretazione di tecniche sperimentali per la misura dei parametri di deformabilità di ammassi rocciosi. Atti dell'Istituto di Tecnica delle Costruzioni del Politecnico di Torino, no. 112 ISMES Bull. no. 113
- Oberti G., Carabelli E., Goffi L., Rossi P.P. (1979)
Study of an orthotropic rock mass: experimental techniques, comparative analysis of results. Proceedings IV International Congress of ISRM, Montreux
- Rossi P.P. (1980)
Analisi del comportamento deformativo di ammassi rocciosi stratificati mediante prove con camera idraulica. Atti del XIV Convegno di Geotecnica, Firenze
- Rebaudi A. (1980)
Cenni informativi circa le indagini e le prove esperite per la ricerca delle proprietà fisiche e meccaniche della roccia di fondazione della diga di Ridracoli. Atti del XIV Convegno di Geotecnica, Firenze
- Bavestrello F. (1983)
Stabilizzazione temporanea degli scavi di imposta della diga di Ridracoli. Atti del XV Convegno di Geotecnica, Spoleto