

PIH

1er Congrès International
de Géologie de l'Ingénieur
PARIS 1970

FRANCE

J. LAKSHMANAN

Proposition pour une méthodologie d'étude géologique
et géotechnique des fondations de barrage
de moyenne importance en terrain rocheux.
(Exemple du barrage de Calacuccia en Corse).

RESUME

L'augmentation du nombre de barrages de moyenne importance à l'étude en particulier pour l'alimentation en eau, rend souhaitable l'adoption d'une méthodologie pour les études géologiques et géotechniques, tant pour des raisons d'efficacité que d'économie. Celle proposée distingue les études d'avant projet sommaire, d'avant projet détaillé, et les études pendant et après les travaux. Elle va des études rapides, qualitatives, aux essais plus lourds, apportant des chiffres de plus en plus utilisables par l'ingénieur.

A titre d'illustration, sont détaillées les études réalisées au barrage de Calacuccia (Corse) auxquelles participa l'auteur : géologie, sismique réfraction, mesures en sondages, essais au vérin à plaque de charge, essais de cisaillement in situ.

SUMMARY

Due to the great number of average sized dams now being studied, particularly for water supply, a geological and geotechnical check-list is useful both for greater efficiency and for lesser cost. The check list proposed includes feasibility and detailed studies, as well as measurements during and after construction. It begins with light, qualitative studies and goes on towards quantitative studies to be used directly by the engineer.

The theme is illustrated by the example of the Calacuccia dam in Corsica where the author participated in different phases of the studies : geology, seismic refraction, tests in drill holes, hydraulic jack tests, in situ shear tests.

I - INTRODUCTION

Les études géologiques des fondations de barrage furent en premier lieu développées par les grands géologues tels LUGEON ou GIGNOUX, créateurs d'une tradition que l'on peut appeler "naturaliste" ou "intuitive" (1), (2).

On a ainsi abouti progressivement à associer à chaque étape administrative d'avancement du projet un cortège d'études géologiques diverses, parfois réduites à de simples avis qualitatifs : "le terrain est bon". Dans le cas des grands barrages hydroélectriques, ces études s'échelonnent sur 5 ou 10 ans, sinon plus.

La multiplication actuelle de projets de barrage de moindre importance dans les pays hautement industrialisés, destinés à l'alimentation en eau potable ou à la régulation des débits, jointe à l'importance des considérations économiques, fait qu'il est maintenant nécessaire d'introduire des notions de rentabilité, non seulement pour l'ouvrage lui-même, mais aussi pour l'étude proprement dite.

En effet, les ouvrages de ce type actuellement projetés en France ont généralement une vingtaine de mètres de hauteur, et leur coût est très grossièrement de l'ordre de 10 millions de francs. Même en limitant le coût des études géologiques et géotechniques à quelques pour cent du coût total, ce qui est élevé par rapport aux travaux publics en général (0,5/1000 pour les autoroutes), on voit que les sommes disponibles sont faibles. Il est bien évident que chaque cas géologique est un cas d'espèce ; cependant, il paraît logique de prévoir dès l'abord une série d'études dont la nécessité, la position chronologique, la consistance et le coût peuvent être prévus à l'aide de la statistique.

La ligne générale que nous proposons a été établie en tenant compte de plusieurs centaines d'études à diverses étapes desquelles a participé la Compagnie de Prospection Géophysique Française.

Nous nous sommes également inspirés des récentes recommandations du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées concernant les études autoroutières, ainsi que des méthodes de travail d'Electricité de France (4), (5), (6), (7), (8).

II - ETAPES PRINCIPALES DES ETUDES

On peut distinguer les interventions géologiques et géotechniques aux stades suivants :

* Les études proprement dites :

- . L'étude géologique d'avant projet sommaire ou de faisabilité
- . L'étude géotechnique permettant de définir l'avant projet détaillé

* Le contrôle géotechnique des travaux

- * Le contrôle pendant la mise en eau des fondations de l'étanchéité et de la stabilité des berges de la retenue, contrôle devant se poursuivre pendant l'exploitation de l'ouvrage.

III - ETUDES D'AVANT PROJET SOMMAIRE

Dans le cas d'ouvrages importants, sur le plan géologique, ces études se traduisent en premier lieu par la visite d'un ou de plusieurs experts ("consultants") et par l'exécution de levés géologiques sommaires au 1/10 000ème ou au 1/25 000ème, suivi par des levés détaillés au 1/1000ème.

Dans le cas d'un ouvrage plus modeste, on doit souvent se limiter à une seule étude par un géologue spécialiste. Le lever géologique et géomorphologique de détail nécessite plusieurs jours de travail sur le terrain en utilisant comme fond topographique soit un agrandissement au 1/5000 ème d'une carte photogrammétrique au 1/25 000 ème, soit, de préférence, un fond au 1/1000 ème. La restitution, outre l'analyse des levés, comprend également l'étude des documents existants et des photographies aériennes, ou terrestres.

À la suite d'un travail de ce type, le géologue doit pouvoir émettre des opinions ou pronostics sur les points suivants :

- faisabilité du projet,
- définition du type d'ouvrage,
- profondeur des fondations,
- étanchéité et souspressions,
- gisements de matériaux,
- définition du programme d'études géotechniques devant s'insérer dans l'avant projet sommaire.

Afin de préciser ces pronostics, il est généralement nécessaire de compléter l'étude par des travaux de reconnaissance légers. Pour ceux-ci, il convient de distinguer les projets sur terrain rocheux plus ou moins altéré et ceux sur des sols meubles.

En milieu rocheux, la reconnaissance comprend généralement :

- * Poursuite de l'étude géologique visuelle par puits, grattages ou tranchées
- * Prospection géophysique par sismique réfraction : celle-ci devra préciser l'épaisseur des terrains meubles de couverture, et l'état de fissuration du rocher sousjacent. Par corrélation avec des études antérieures sur d'autres sites semblables, l'analyse des vitesses de propagation permet de préciser le pronostic géologique sur les qualités mécaniques et hydrauliques du rocher.

Les résultats sismiques sont ensuite valorisés par étalonnage sur les sondages mécaniques. De nombreuses corrélations ont ainsi été établies entre vitesses et perméabilités exprimées en unités LUGEON (U.L.). Celles-ci sont du type $V = a \log^b (U.L.)$ (voir fig. 1).

Pour un ouvrage moyen, les prospections sismiques comprennent généralement un à trois profils perpendiculaires à la vallée, et deux à cinq profils parallèles à la vallée. Une méthode nouvelle, celle du bloc sismique" est parfois utilisée, mettant en oeuvre un maillage régulier de sismographes. Il est souhaitable d'utiliser des enregistreurs multivoies (12 ou 24 généralement). Les dispositifs sismiques comprennent alors 12 ou 24 sismographes espacés de 5 ou 10 m. L'énergie est fournie par des détonateurs ou des faibles charges explosives, de préférence aux impacts mécanique, afin d'obtenir des documents indiscutables.

* Les caractéristiques de résistance du rocher, ou plutôt de ses joints (angle de frottement interne φ et cohésion c). Les limites du domaine élastique peuvent être décelées par les essais in situ cités précédemment, du moins lorsqu'elles ne sont pas trop élevées. En cas de doute, et lorsque l'ouvrage exerce des contraintes de plus de 10 bar, il devient nécessaire de réaliser des essais de cisaillement in situ, afin de connaître les valeurs les plus faibles de c et de φ .

Enfin, des études spécifiques peuvent être nécessaires, tels les essais d'altérabilité.

V - CONTROLE GEOTECHNIQUE EN COURS DE TRAVAUX

Il est indispensable que le rôle du géologue ne s'arrête pas à l'étude, mais qu'il se poursuive pendant les travaux. Les différentes étapes d'ouverture des fouilles au rocher sont conclues par des "réceptions de fouilles" comprenant :

- un lever géologique au 1/200 ème
- et, si nécessaire, des mesures microsismiques en fond de fouille pour permettre de chiffrer l'appréciation visuelle.

VI - CONTROLE PENDANT LA MISE EN EAU ET PENDANT L'EXPLOITATION

Nous ne citerons cette phase que pour mémoire, le vaste domaine de l'auscultation des fondations appartenant plutôt à la mécanique des roches.

Rappelons enfin l'importance que peuvent prendre les problèmes de glissement des berges de la retenue, présents à tous les esprits depuis la catastrophe de Vajont.

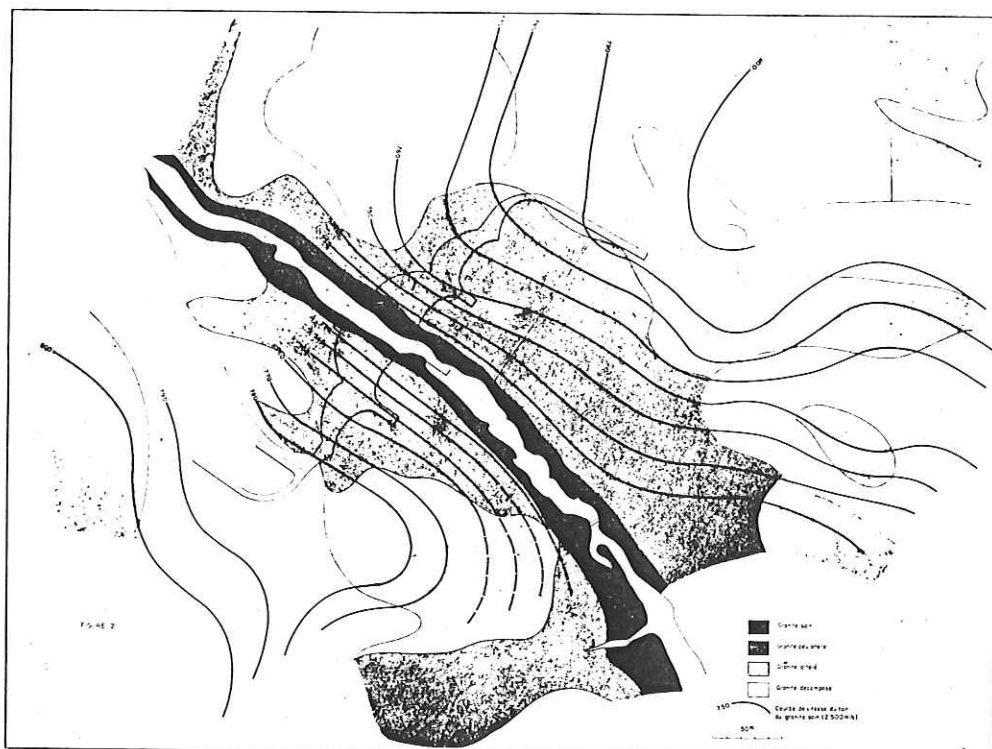
VII - EXEMPLE DU BARRAGE DE CALACUCCIA

Sans que la mise en oeuvre d'une méthodologie ait été, à l'époque, délibérée, nous avons choisi l'exemple du barrage de Calacuccia comme illustration, car nous avons dans ce cas particulier participé à de nombreuses phases des études géologiques, géophysiques et géotechniques, au titre de contrats passés par Electricité de France, Région d'Equipement Alpes - Sud, Marseille (conseillé par son Service Géologique et Géotechnique) à la Compagnie de Prospection Géophysique Française.

Le barrage de Calacuccia sur le Golo (Corse) a été terminé en 1968. Il s'agit d'un barrage à voutes multiples de 72 m de hauteur, fondé sur du granite. Au départ du projet (1961), le choix du type d'ouvrage n'avait pas été fait entre un barrage en béton (voûte ou voûtes multiples) et au barrage en enrochements. Une description détaillée de l'ouvrage et des études réalisées figurent dans un article de J. ASTRUC (9).

Ces levers géologiques ont montré (voir fig. 2)

- un granite sain au fond de la gorge,
- une importante altération sur les replats dominant les deux appuis,
- la présence de nombreux filons de microgabbro (l'ensemble des études a montré que ces filons ne présentaient pas de singularité mécanique ou hydraulique).



La prospection sismique de surface comprenant 15 profils de 24 géophones a précisé l'épaisseur des divers types d'altération, et a permis de choisir l'emplacement le plus favorable pour l'ouvrage dans la partie amont du verrou. En outre, les problèmes de fuites par les ensellements rive droite et rive gauche purent être étudiés par sismique.

Après la réalisation de nombreux sondages avec essais LUGEON (Entreprise S.I.F.-BACHY) les équivalences suivantes ont été établies entre les descriptions géologiques, les vitesses sismiques et les perméabilités exprimées en unités LUGEON.

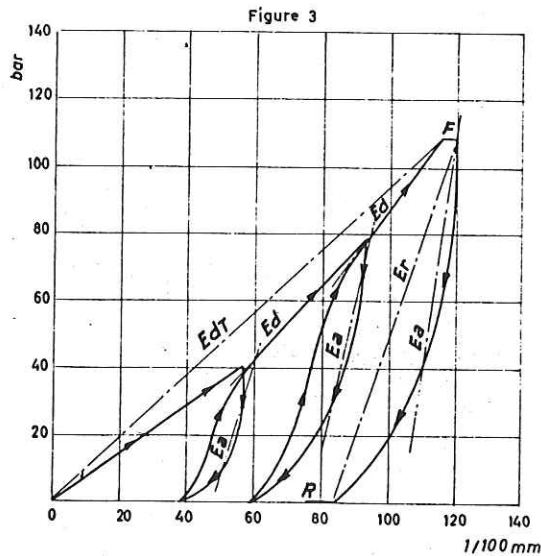
G_0	: granite profondément altéré, sans cohésion, réduit à l'état de sol	$300 < V < 600 \text{ m/s}$	$> 10 \text{ U.L.}$
G_1	: granite altéré, cohésion moyenne à faible	$1000 < V < 1500 \text{ m/s}$	de 5 à 10 U.L.

G_2	: granite fissuré, légèrement décomprimé, traces de circulation	$2500 < V < 3500 \text{ m/s}$	de 2 à 5 U.L.
G_3	: granite compact	$4500 < V < 6000 \text{ m/s}$	< 1 U.L.

Un pronostic sur la qualité mécanique du rocher de fondation a été établi en comparant la vitesse sismique au niveau de fondation avec les vitesses mesurées sur d'autres sites granitiques ou gneissiques, à la même profondeur :

- Calacuccia	: barrage à contreforts	72 m	3 550 m/s
- Tolla (Corse)	: barrage voûte	70 m	4 000 m/s
- Gage (Ardèche)	: barrage voûte	50 m	3 700 m/s
- Malpasset (Var)	: (gneiss)		2 300 m/s
- Dorlay (Loire)	: voûte 50 m (en projet)		3 900 m/s
- St-Agnan (Nièvre)	: barrage en terre (sous parafouille)	20 m	3 550 m/s

Au stade de l'avant projet détaillé, les études ont été orientées dans l'optique d'un barrage à voûtes multiples : la connaissance précise du rocher au droit de chacun des contreforts était alors nécessaire.

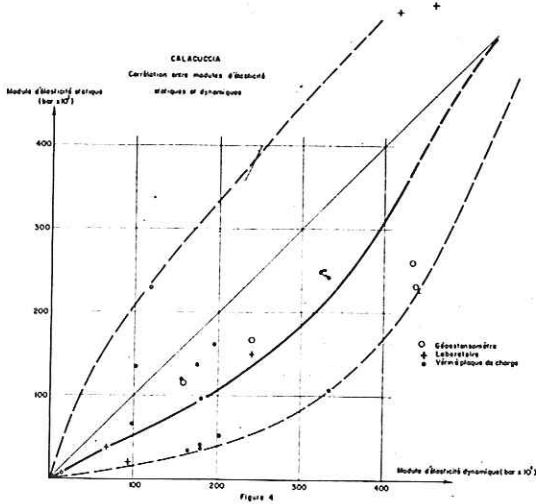


Deux galeries ont été perforées à mi-hauteur de chaque appui, permettant l'observation précise du granite à la cote projetée de fondation sous les contreforts latéraux.

Dans ces galeries ont été réalisés onze essais au vérin à plaque de charge (voir fig. 3) et des mesures microsismiques continues.

Dans deux sondages, des mesures dilatométriques (réalisées par le CEBTP-Paris) et des carottages sismiques permirent de compléter la corrélation entre modules dynamiques et statiques (voir fig. 4).

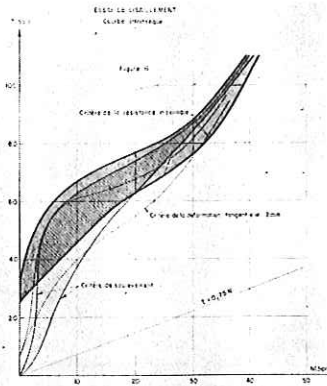
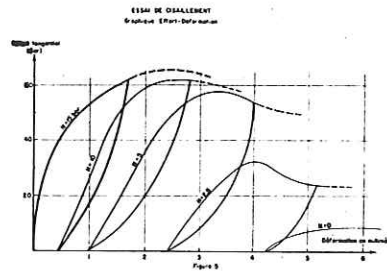
On pouvait alors connaître le module d'élasticité statique (mesuré ou corrélé) au niveau de la fondation, et le comparer avec ceux d'autres sites. Ce module d'élasticité apparent (défini par la figure 1 : E_a) moyen pour Calacuccia s'insère favorablement dans le tableau suivant concernant divers grands barrages français :



• Besserve	49 000 bar
• Calacuccia	100 000 bar
• Candès	76 000 bar
• Gage	61 000 bar
• Gréoux	187 000 bar
• Malpasset	10 000 bar
• St-Cassien	90 000 bar

Enfin, les caractères mécaniques le long de la surface de glissement éventuelle constituée par la semelle des contreforts furent étudiés par sept essais de cisaillement in situ. Ces essais, réalisés en galerie, nécessitent le découpage d'une surface de 0,50m x 0,60 m simulant à l'échelle 1/20^{ème} le fond de fouille, sur lequel fut coulé un bloc de béton de 0,58 cm³.

Des contraintes normales N et tangentielles T furent appliquées à l'aide de vérins plats. Pour chacune des valeurs successives de N égales à 15, 10, 5, 2,5 et 0 bar des cycles de charge et de décharge tangentiels furent réalisés (fig.5).



On en tira, à l'aide de critères classiques en mécanique des roches, les valeurs limites de T pour chaque valeur de N. Les résultats des sept essais conduisirent à la figure 6, où la droite de Coulomb théorique est remplacée par un faisceau pour lequel la cohésion théorique serait comprise entre 0 et 40 bar, et l'angle de frottement interne entre 30 et 70°. La comparaison de ce faisceau avec la droite :

$$T = 0,75 N$$

correspondant aux règlements en vigueur, permit de calculer un coefficient de sécurité vis à vis du glissement. Aux contraintes N de service, et pour la courbe la plus défavorable, le coefficient reste supérieur à 3.

Nous voyons que dans cet exemple de Calacuccia comment l'opinion qualitative du géologue s'est progressivement quantifiée à l'aide d'essais de plus en plus élaborés. Nous pensons que son rôle devra s'accroître lors de l'application ultérieure des lois de la géostatistique aux essais de mécanique des roches, application qui devrait conduire à remplacer la notion de coefficient de sécurité par celle de probabilité de ruine.

Bien entendu, le barrage de Calacuccia a une importance beaucoup plus grande que les barrages moyens, d'une vingtaine de mètres de hauteur, qui sont l'objet de notre proposition de méthodologie. De ce fait, les reconnaissances ont été beaucoup plus poussées, tant en nombre de méthodes, qu'en quantités d'essais.

.. ..

Nous tenons à remercier Electricité de France, Région d'Équipement Hydraulique Alpes Sud, ainsi que le Service Géologie et Géotechnique pour avoir bien voulu nous autoriser à mentionner les études réalisées à Calacuccia.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) M. LUGEON, "Barrages et Géologie", Dunod, Paris 1933
- (2) M. GIGNOUX et R. BARBIER, "Géologie des Barrages et des Aménagements Hydrauliques", Masson, Paris 1955
- (3) Ministère de l'Équipement, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, "Recommandations pour la reconnaissance Géologique et Géotechnique des tracés d'autoroutes", L.C.P.C., Paris, Février 1967
- (4) J. CROSNIER LECOMTE, "Note sur l'organisation des reconnaissances géologiques à l'Electricité de France" - Congrès et Colloques de l'Université de Liège, volume 14, 1959
- (5) C. BORDET, "La Mécanique des Roches à l'Electricité de France", Revue de l'Industrie Minérale, numéro spécial du 15.12.1968
- (6) M. MARY, P. DUFFAUT, G. COMES, "Connaissance Mécanique du rocher par sondages et saignées", Congrès International des Grands Barrages, Istamboul 1967
- (7) P. DUFFAUT, "Possibilités et limitations des procédés géophysiques appliqués au Génie Civil", Bulletin Technique de la Suisse Romande, Lausanne, 1967
- (8) J. TALOBRE, "La Mécanique des Roches", Dunod, Paris, 1967
- (9) J. ASTRUC, "Aménagement du Golo, le Barrage de Calacuccia", - Revue Travaux, Paris, Septembre 1967.