

le projet du barrage de Grand'Maison

conception et présentation de quelques calculs de déformations

D. CLERDOUET, G. POST

Ingénieur en chef et directeur technique au bureau d'ingénieurs Coyne et Bellier, à Paris

1. INTRODUCTION

Le barrage de Grand'Maison, haut de 160 m et constitué par 12 millions de mètres cubes de remblais, est en cours d'achèvement à 1 600 m d'altitude, 30 km à vol d'oiseau à l'est de Grenoble sur le torrent de l'Eau-d'Olle, affluent rive-droite de la Romanche (fig. 1).

La retenue correspondante de 140 millions de mètres cube dont 105 obtenus annuellement par le ruissellement, constituera le réservoir haut d'une station de transfert d'énergie par pompage de 1 200 MW sur 950 m de chute, doublée d'une usine de pointe de 600 MW équipée de roues Pelton (voir pour plus de détails la référence 1).

C'est un groupement d'entreprises françaises (appelé B.G.M.) qui construit depuis l'été 1980, par cinq campagnes saisonnières de 5 mois, le barrage de Grand'Maison, Electricité de France par sa région d'équipement Alpes-Lyon étant maître d'ouvrage et maître d'œuvre de l'ensemble de la chute.

Les études du barrage dont la conception va être exposée ci-après ont été réalisées par le service études de Chambéry de la région d'équipement Alpes-Lyon et Coyne et Bellier.

Il s'agit d'un barrage en remblais compactés comportant un noyau central en terres épaulé par des

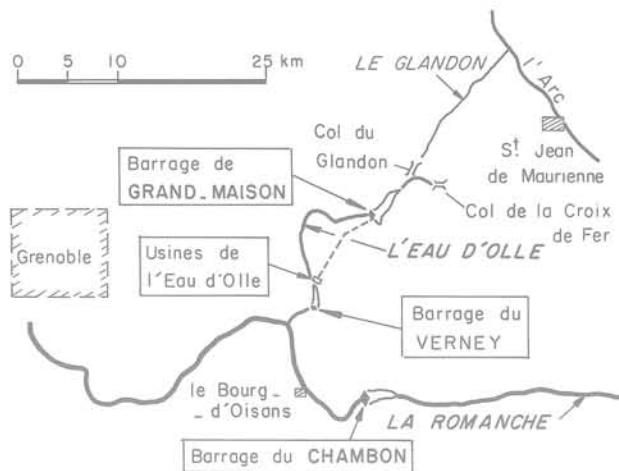


Fig. 1. — Croquis de localisation

recharges en terres et en enrochements. Ce qui singularise ce barrage est que les terres employées, tant dans les recharges que dans le noyau même, ont une granularité étendue et comportent une fraction caillouteuse importante: précisément, près de la moitié d'éléments supérieurs à 5 mm pour les terres du noyau et entre la moitié et les deux tiers pour les terres des recharges. Cette particularité a joué sur le projet et sur sa réalisation.

C'est pourquoi il convient d'examiner d'abord les matériaux disponibles pour construire le barrage avant de présenter le site lui-même.

Enfin, seront présentés quelques résultats des calculs de déformations qui sont développés parallèlement à l'édification du barrage.

2. LES MATÉRIAUX DISPONIBLES POUR ÉDIFIER LE BARRAGE

A Grand'Maison, les matériaux disponibles à proximité du site dans cette vallée de montagne à près de 1 600 m d'altitude sont à première vue des enrochements et des éboulis de pente couvrant généreusement les bas des versants. Si bien que l'ouverture de carrières dans les rives, à moins d'en élever le carreau au point de perdre toute commodité d'accès, n'y est pas si aisée. Exception faite du versant rive-gauche de la retenue et de la vallée du petit affluent rive-gauche, la Cochette, constitués de schistes marno-calcaires liasiques, ce sont des roches cristallines qui règnent en rive droite de la retenue et dans la vallée au droit et sur les deux rives en aval du site.

3. LES ENROCHEMENTS

On ne s'étendra pas sur les enrochements qui sont extraits d'une carrière ouverte à l'aval immédiat du barrage et employés dans le barrage (5,5 millions de mètres cube dont un million servant à fabriquer par concassage, criblage et lavage des filtres, drains et transitions): il s'agit de diverses sortes de gneiss, à schistosité marquée générant des blocs ayant quelques tendances vers les formes de dalles et de prismes, et de résistances variées, mais constituant cependant des enrochements très convenables pour une recharge de barrage en remblais. La proportion de petits éléments, assez variable d'un tir à l'autre, reste limitée à moins de 5 % d'éléments inférieurs à 1,6 mm. Il s'agit là plus d'un constat d'observations que d'un résultat de mesures de blocométrie, lesquelles en raison de leur lourdeur (l'échantillon traité doit être de l'ordre de 10 tonnes pour être représentatif) ne sont pratiquées qu'assez rarement (quelques-unes par campagne).

4. LES TERRES CAILLOUTEUSES CONSTITUANT LE NOYAU

4.1. Localisation

Ces terres sont extraites à moins de 1 500 m du barrage, juste au-dessus de la future retenue, en rive droite du torrent de la Cochette qui rejoint l'Eau-d'Olle juste en amont du site.

4.2. Nature graveleuse Présence de fines non plastiques

Il s'agit d'éboulis de pente provenant du relief dominant constitué d'un schiste marno-calcaire du lias, roche autrefois exploitée plus bas dans la vallée comme ardoisière, ce qui décrit la forme des éléments grossiers que l'on va trouver dans les éboulis de pente: des dalles pour les rares gros éléments et des plaquettes pour les moyens et petits.

Heureusement, pour l'emploi en noyau, ces éboulis de pente à granularité étendue contiennent une proportion suffisante d'éléments très fins (20 à 40 % d'inférieurs à 0,1 mm) ce qui a permis d'en escompter une étanchéité adaptée au projet (fig. 2).

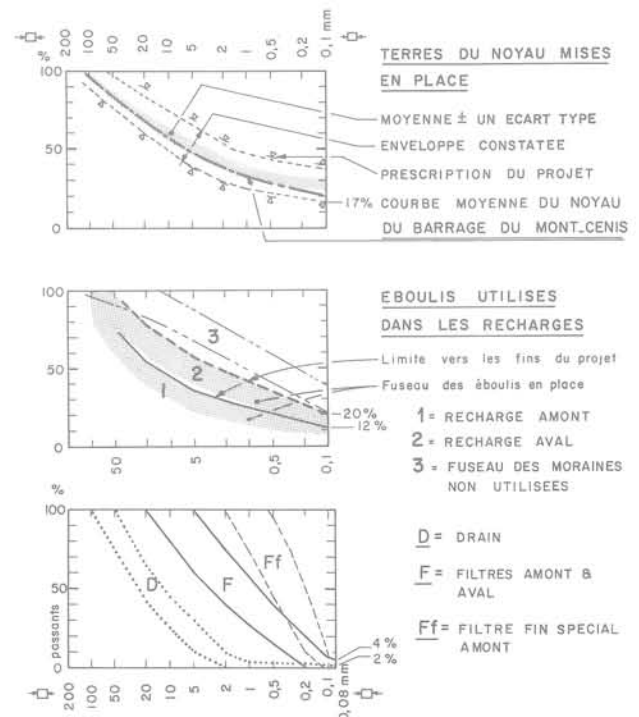


Fig. 2. — Fuseaux des matériaux

Ces éléments fins, produits d'altération des schistes marno-calcaires, sont très peu argileux. Ils le sont certes un peu plus que les éléments fins des autres éboulis mis en place dans les recharges qui ne sont véritablement que des farines de roches cristallines. Mais il est quasiment impossible d'en tirer une limite de plasticité, sauf dans les terres superficielles plus altérées, mais qui ne sont pas représentatives de la masse de l'éboulis. Et les indices de plasticité des terres prélevées dans les premiers mètres étaient plutôt en dessous de 15.

4.3. Le souci d'une imperméabilité suffisante

L'emploi d'un tel matériau pour constituer un noyau d'étanchéité d'un grand barrage en remblais exige donc des précautions particulières.

4.3.1. Le précédent du Mont-Cenis

La foi dans l'obtention d'une étanchéité suffisante pour ce barrage de retenue hydroélectrique avec ces terres caillouteuses régaliées et compactées a reposé au départ sur le précédent du barrage du Mont-Cenis dont le débit de fuite à travers le noyau n'est que de quelques litres par seconde. Bien que la nature des matériaux du noyau du Mont-Cenis soit différente des matériaux du gîte de la Cochette, avec en particulier une origine morainique, leurs fuseaux granulométriques sont assez semblables. En entrant dans le détail, les matériaux de la Cochette ont davantage d'éléments inférieurs à 0,1 mm, mais un peu moins d'éléments compris entre 0,1 et 2 mm, que ceux du Mont-Cenis (fig. 2 et réf. 2).

Certes, ont été construits, de par le monde, nombre de barrages en remblais possédant un noyau constitué de matériau à granularité étendue, mais il s'agit pour la plupart de matériaux morainiques à courbe granulométrique moins concave et ayant un pourcentage d'éléments fins généralement plus élevé qu'au Mont-Cenis ou à Grand'Maison.

4.3.2. Les essais en laboratoire

Aussi, les études ont cherché à s'assurer de l'imperméabilité prêtée au matériau du gîte de la Cochette. Pour ces matériaux ayant 10 à 20 % d'éléments supérieurs à 63 mm, les essais en laboratoire n'apportent pas la même qualité de réponse que pour l'étude des sols fins: ou bien l'échantillon amputé d'une trop grande fraction de ses éléments grossiers n'est plus représentatif, ou bien le nombre limité d'essais dans un appareillage accueillant la granularité quasi complète reste peu convaincant.

4.3.3. Les essais in situ

C'est donc par des essais de percolation à travers des matériaux mis en place comme ils le sont dans le noyau d'un barrage qu'a été appréhendée leur perméabilité. Ce fut précisément la perméabilité horizontale par la mesure des faibles débits recueillis au pied d'un talus recoupant plusieurs levées de terres compactées alimentées sur l'autre bord par une tranchée maintenue remplie d'eau (débits de l'ordre d'un litre par heure, fig. 3).

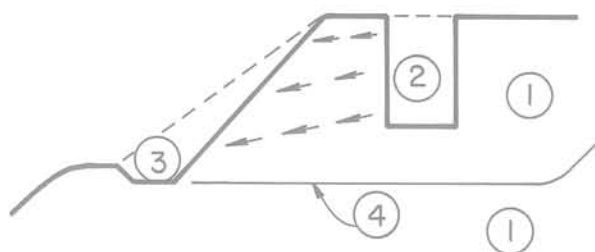
Les autres tentatives de mesures de perméabilité in situ sur les mêmes remblais n'ont pu avoir la même force probatoire du fait de la dispersion des résultats d'essais trop ponctuels pour ces terres caillouteuses (mesure de niveau piézométrique dans des trous verticaux et écoulement vertical à travers un merlon de terre compactée isolé par une cloche métallique selon l'idée de Francis SABARLY).

Par contre, plusieurs remblais d'essais ont pu être soumis à la percolation horizontale vers leur talus à partir de tranchées remplies d'eau, longues de 10 mètres, c'est-à-dire sur une longueur englobant largement les petites hétérogénéités liées à la présence d'éléments grossiers.

4.3.4. La perméabilité escomptée

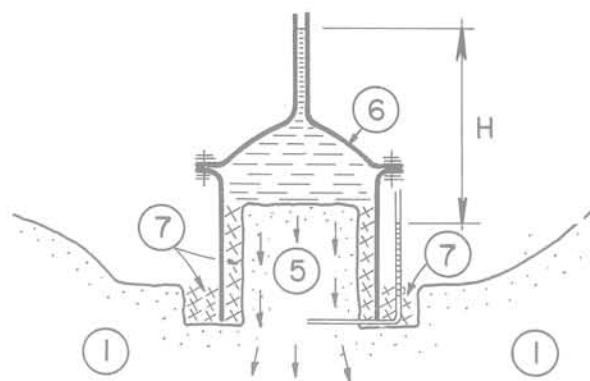
D'où l'acquis que ces terres caillouteuses pouvaient être employées à la constitution d'un noyau central. Pour autant que ce noyau ne soit pas trop mince, l'espoir tiré des essais d'une perméabilité horizontale inférieure à 10^{-7} m/s conduisait, avec la géométrie du site, à un débit de fuite par percolation à travers le

Mesure de K_h in situ



- 1 - Remblai d'essai
- 2 - Tranchée remplie d'eau
- 3 - Talus retailleur avec caniveau de collecte
- 4 - Feuille plastique

Mesure de K_v in situ



- 5 - Merlon dégagé
- 6 - Cloche avec couvercle étanche
- 7 - Blocages étanches

Fig. 3. — Essais de perméabilité in situ (croquis)

noyau acceptable, puisqu'inférieur à 10 l/s. A noter que la perméabilité d'un tel matériau compacté décroît lorsque sa teneur en eau dépasse celle de l'Optimum Proctor Standard. Si seule la perméabilité horizontale est évoquée, c'est que le précédent du barrage du Mont-Cenis autorise à compter sur une perméabilité verticale 3 à 4 fois moindre que la perméabilité horizontale (réf. 3).

Il reste que l'obtention du faible débit de fuite cité ci-dessus suppose un noyau bien homogène exempt de cheminements privilégiés. Or, la manipulation de matériaux à granularité étendue comporte un risque de ségrégation, qui peut aboutir dans un noyau à des cheminements privilégiés par relais de plages ségrégées, notamment le long des appuis rocheux.

Dans ce cas particulier du contact des terres caillouteuses du noyau avec le rocher, une bande épaisse de 0,50 à 1 m de silt argileux exempt de gros éléments, appelé terre fine, a été insérée en interface.

4.4. L'impératif de non-ségrégation

Ce risque de ségrégation a donc fait l'objet, lors des remblais d'essais réalisés pendant la phase d'étude, d'une attention particulière.

4.4.1. Etude des déversements

Comme ce risque s'accroît avec la hauteur de chute des matériaux, notamment lors du déversement par l'arrière des bennes, on a écarté, pour les essais de 1978, les dumpers Volvo B.M. au gabarit routier employés en 1977, et requis l'usage d'un gros camion plus en rapport avec ceux qui pourraient être utilisés pour la construction. Ce fut un camion Caterpillar 969 alors que le chantier utilise une flotte d'une quarantaine de CAT 773 de 50 tonnes de charge utile. Mais la hauteur de déversement n'est pas très différente.

Les observations faites aux diverses opérations de chargement, déversement et réglage ont conduit à renoncer à prescrire l'usage du motor-scraper (par ailleurs, mal adapté au transport en dénivelée à réaliser) et à admettre l'emploi de gros camions associés à un régalaue au bouteur.

A noter que, à granularité donnée, le risque de ségrégation lors des manipulations d'un matériau varie en fonction inverse de la teneur en eau, pour des valeurs de celle-ci encadrant de 1 à 3 points l'Optimum Proctor Standard.

4.4.2. Le risque de ségrégation lors d'un criblage

L'expérience du Mont-Cenis avait aussi montré qu'avec un matériau à granularité très étendue, la ségrégation pouvait apparaître aussi lors de la manipulation sur une chaîne de criblage, par exemple lors de l'écrêtement des très gros éléments jugés inacceptables dans le noyau.

Devant la faible proportion dans le gîte de la Cochette de très gros éléments inadmissibles dans le noyau (précisément les éléments qui seraient rejetés par une maille carrée de 200 mm), on a préféré en 1979, pour

ne pas encourir un risque de ségrégation, ne pas prescrire le criblage du matériau (à 200 ou 150 mm) en admettant l'enlèvement des dalles supérieures à 200 mm sur la levée même par de petits engins spécialisés.

4.4.3. Le convoyeur à bande et sa trémie

L'entrepreneur ayant choisi un transport par convoyeur à bande, l'écrêtement à 150 mm par crible en tête, qui protège la bande contre le risque de déchirure, ne rejette finalement que de l'ordre de 2 à 3 % du matériau. Mais c'est au déversement des terres du convoyeur dans la trémie d'extrémité et également au remplissage de la benne du camion par soutirage que se situaient alors les risques de ségrégation. Cette trémie ayant été spécialement étudiée pour prévenir ce risque, aucune ségrégation n'est effectivement constatée lors du fonctionnement à trémie pleine recommandé par son concepteur.

4.5. Le souci d'une teneur en eau trop forte

Un autre souci de projet pour ces terres de la Cochette était, en raison de l'altitude et de la mauvaise exposition du gîte, de trouver à chaque début de saison des terres trop humides. C'est-à-dire des terres à une teneur en eau très supérieure à celle de l'Optimum Proctor et requérant des opérations spéciales pour leur faire perdre cet excédent d'eau. Face à cette éventualité, la perspective d'une mise en place des terres du noyau à une teneur en eau dépassant de deux points en moyenne celle de l'Optimum Proctor avait été explorée, avec ses conséquences, notamment sur le développement des surpressions interstitielles de construction.

L'expérience des trois saisons de mise en place, avec notamment l'exploitation intensive des deux dernières saisons 1982 et 1983, bénéficiaires il est vrai de conditions météorologiques particulièrement favorables, a montré que les terres du gîte ne présentaient pas dans leur masse, au début réel de la saison des remblais, une teneur en eau excessive du fait de l'enneigement hivernal. Seules des successions de journées pluvieuses sembleraient capables de donner aux terres un excès de teneur en eau.

A noter que ces terres caillouteuses, grâce à leur squelette, supportent assez bien, avec leur teneur en eau voisine de l'Optimum, la circulation diffuse des gros camions CAT 773. Avec une teneur en eau plus élevée de quelques points, il n'en serait plus de même et l'on peut avancer que ce sont les conditions de praticabilité mêmes qui limitent la mise en place à une teneur en eau dépassant de deux à trois points la teneur en eau maximum prescrite pour la moyenne de trois couches (qui est optimum plus deux points).

4.6. Les surpressions interstitielles de construction

Les surpressions interstitielles élevées qu'engendrerait une mise en place à forte teneur en eau des seules terres à noyau n'affecteraient guère la stabilité en fin

de construction, du fait de la position centrale du noyau et des forts angles de frottement de tous les matériaux. De plus, avec ces matériaux granulaires peu compressibles dont la perméabilité est supérieure à celle des sols argileux fins, les surpressions interstitielles acquises pendant l'été sous la charge des remblais se dissipent pour une grande part pendant l'arrêt hivernal, comme le révèle les lectures des cellules de pressions interstitielles. Actuellement, avec une mise en place à une teneur en eau très proche de l'optimum, les surpressions interstitielles, lorsqu'elles se développent, atteignent une hauteur piézométrique égale et parfois supérieure à la hauteur des remblais sus-jacents, ce qui correspond à 43 % seulement du poids de la colonne de terre. Mais avec ce noyau en terres caillouteuses, il était à prévoir que les réponses des cellules aux surpressions de construction seraient disparates, certaines cellules ne donnant qu'une faible surpression du fait sans doute d'une petite hétérogénéité locale autour de la cellule.

4.7. Les consignes de mise en place adoptées

Compte tenu de la teneur en eau des terres dans le gîte, et dans le souci de bénéficier d'un noyau homogène, c'est-à-dire exempt de ségrégation, et le moins perméable possible, c'est une fourchette de teneur en eau centrée sur le côté humide de l'Optimum Proctor Standard qui a été prescrite, précisément de $-1/2$ à $+2$ pour la moyenne de trois couches.

En fait, la mise en place des terres du noyau a été réalisée en moyenne jusqu'ici à une valeur ne dépassant que d'un demi-point celle de l'Optimum (laquelle est en moyenne de 9 % avec un écart-type de 0,9 %). Et le compactage par six passes de rouleau vibrant lourd des couches épaisses de 0,50 m a permis d'obtenir sans difficultés la densité correspondant à l'Optimum Proctor Standard (de 21,5 KN/m³ en densité sèche moyenne).

4.8. Point de l'exploitation

Il reste encore 300 000 m³ à extraire de ce gîte qui en a déjà fourni près de 1,6 million pour achever le barrage au cours de la campagne d'été 1984.

5. LES TERRES CAILLOUTEUSES POUR LES RECHARGES

5.1. Des éboulis de pente divers (fig. 2)

Il s'agit encore principalement d'éboulis de pente, issus cette fois du relief cristallin dominant qui forme le versant rive-droite de la cuvette sur 3 km en amont du site. On trouve aussi, surtout dans la moitié aval de la cuvette, des restes de moraines d'origine cristalline formant des croupes entre les cônes d'éboulis. Une partie de ces matériaux morainiques ont été remaniés et se trouvent mélangés aux éboulis de pente.

En schématisant, une coupe verticale type du versant présenterait de la surface vers le rocher :

- des éboulis très graveleux à courbe granulométrique très creuse ;
- des éboulis mélangés de matériaux morainiques, à courbe granulométrique moins cambrée et présentant davantage d'éléments fins ;
- des moraines à courbe granulométrique quasi rectiligne et à fort pourcentage d'éléments fins (25 à 40 % d'inférieurs à 0,1 mm).

En fait, les parts de ces matériaux varient du haut en bas du versant et surtout d'amont, où s'enchevêtrent de grands cônes d'éboulis graveleux, vers l'aval, où prédominent des lambeaux de moraines sous forme de croupes.

5.2. Qualités des matériaux Abandon des moraines

Tous ces sols caillouteux constituent de très bons matériaux de remblais, à fort angle de frottement interne et à faible compressibilité, mais ils présentent une perméabilité variable dépendant de leur proportion d'éléments fins.

Pour un emploi en recharge aval protégée par le système de drainage interne du remblai et des rives, une relative imperméabilité est indifférente. Les moraines auraient pu convenir si l'on n'avait craint qu'une trop forte teneur en eau, à attendre de la fonte des neiges au début de saison, n'en rende très difficile la mise en place par un orniérage excessif. Ce qui a pu être vérifié lors des remblais d'essais de la phase étude de 1978 par des mises en place avec ajout d'eau.

5.3. Présence de nappes dans les versants

L'expérience ultérieure de l'exploitation des éboulis et celle de la création de pistes dans les moraines de l'extrémité aval du gîte ont confirmé l'opportunité de renoncer aux moraines : bien après la fonte des neiges sur le versant, le rocher sous-jacent alimente, par des eaux provenant des reliefs dominants, diverses nappes dans les matériaux de couverture. Plus en amont dans le gîte, la plus grande perméabilité des éboulis graveleux qui prédominent permet l'essorage, aidé à l'occasion lors de l'exploitation par quelques fossés de drainage.

5.4. Répartition des divers éboulis (fig. 2)

En laissant de côté les moraines, pourtant proches du site, le versant rive-droite de la retenue offre donc une gamme d'éboulis graveleux allant des éboulis très ouverts et perméables (à moins de 10 % d'éléments inférieurs à 0,1 mm) à des matériaux à courbe granulométrique nettement moins creuse et présentant 15 à 20 % d'éléments inférieurs à 0,1 mm (et de ce fait, moins perméables). Ces derniers matériaux, dénommés sur le chantier éboulis mélangés (de matériaux morainiques) ont été voués à l'emploi dans la partie interne de la recharge aval.

Parmi les éboulis ayant moins de 15 % d'éléments inférieurs à 0,1 mm, le projet a voulu réserver les plus perméables à l'emploi dans la partie interne de la recharge amont. Le seuil initial de 10 % a été recalé à 12 % au cours de la construction en vérifiant que cette recharge interne même non drainante permettait de conserver une stabilité satisfaisante grâce à l'importante recharge amont constituée d'enrochements drainants. En fait, au cours de la présente saison 1983, les éboulis mis en place dans la recharge amont ont eu en moyenne 10 % d'inférieurs à 0,1 mm. Quant à ceux mis en place dans la recharge aval, en distinguant la zone interne et la zone externe, les moyennes de leurs passants à 0,1 mm ne sont respectivement que de 15 et 13 %.

5.5. Mise en place aisée Pas d'orniérage

Avec certes les très bonnes conditions météorologiques des étés 1982 et 1983, ces divers éboulis ont été d'une mise en place aisée à leur teneur en eau naturelle, d'ailleurs très voisine de la teneur en eau de l'optimum (5 à 6 %). Seules, des pluies répétées pourraient, en accroissant les teneurs en eau, gêner les reprises de mise en place par un orniérage excessif. Le compactage des levées épaisses d'un mètre réalisé par six passes de rouleau vibrant lourd donne des densités sèches élevées de l'ordre de 22,8 kN/m³ dépassant de 2 % la densité Optimum Proctor Standard.

5.6. Pas de surpressions interstitielles de construction

Quant au développement de surpressions interstitielles de fin de construction sous le poids des remblais sus-jacents, il est pratiquement inexistant globalement avec de tels matériaux. Les quelques cellules de mesures de pressions interstitielles mises en place dans les éboulis de la recharge amont, en vue de suivre l'évolution des pressions au remplissage et à la vidange n'ont, à l'évidence, intercepté aucune mise en pression. Il s'agissait certes des éboulis les plus ouverts, mais il en est vraisemblablement de même dans les éboulis plus chargés en fins de la recharge aval, bien qu'aucune cellule n'y ait été placée. La stabilité en fin de construction se trouve donc largement assurée. La répartition des matériaux les plus perméables vers l'extérieur renforce encore cette stabilité.

Sur ces remblais en éboulis, ce n'est donc que très occasionnellement que l'on peut observer au passage d'un gros camion le phénomène de matelassage, c'est-à-dire de formation d'un bourrelet et d'une large dépression s'atténuant après le passage de la charge.

5.7. Bilan d'exploitation

En définitive, puisque l'exploitation en grand s'en achèvera au début de la campagne 1984 (les 40 derniers mètres de la digue appelant davantage d'enrochements), ce gîte de la rive droite aura fourni près de 6 millions de mètres cube d'éboulis et éboulis mélangés sur une estimation initiale de l'ordre de 8 millions en place (moraines non comptées).

6. LE SITE

6.1. La géométrie du site

Le site est constitué d'un verrou glaciaire, c'est-à-dire un seuil rocheux caché sous les alluvions, associé à un rétrécissement singulier de la vallée par deux éperons formant une chicane (fig. 4).

Au niveau 1 700 de la crête du barrage, et au droit de son axe, qui coïncide avec celui de l'éperon rive-gauche, la largeur de la vallée est de 500 m, alors qu'elle n'est que de 65 m à hauteur de l'ancien lit de la rivière. Mais 150 m en aval de cet axe, le fond de vallée s'élargit nettement et atteint 160 m. En amont, passé l'éperon rive-droite, la vallée s'ouvre sur la plaine qui accueille la retenue. (Le profil en travers de la vallée sur l'axe du barrage est donné sur la figure 10 présentant plus loin des résultats de calcul).

Le barrage en construction, long d'amont en aval de 600 m, déborde donc du rétrécissement de la vallée. C'est grâce à son raidissement par l'emploi d'enrochements que son talus amont n'envoie pas totalement l'éperon rive-droite, plus petit, et ne s'étale pas dans l'élargissement amont de la vallée.

6.2. La géologie et les conditions d'assise du barrage

Le site est placé au droit du contact subvertical entre le compartiment cristallin du massif de Belledonne et un compartiment marno-calcaire du lias dans lequel se développe la retenue. Ce contact, très serré et fermé, prend en écharpe en léger biais l'éperon rive-gauche dont l'amont et la crête sont en marno-calcaire et le flanc aval en cristallin. Quant à l'éperon rive-droite en amont, il est aussi en marno-calcaire alors que toute la rive droite avec ses reliefs montagneux dominants est cristalline.

A l'aval de l'éperon amont, le rocher cristallin de la rive droite était recouvert presque jusqu'au niveau de la crête du barrage d'un épais manteau d'éboulis de pente.

En fond de vallée, l'épaisseur d'alluvions couvrant le seuil rocheux n'était que de l'ordre de 20 m. Mais de part et d'autre de ce seuil, soit à plus de 300 m en amont et à plus de 100 m en aval de l'axe du barrage, le rocher plonge rapidement.

Le remplissage quaternaire du fond de vallée est composite. Des moraines en remplissent le fond de part et d'autre du seuil glaciaire tandis que règnent près des rives les pieds des éboulis de pente particulièrement abondants sur la rive droite. Sous les alluvions plus grossières de surface, les reconnaissances ont intercepté, dans d'anciens dépôts lacustres plus fins, deux niveaux de lentilles de silts vasards et même de tourbe. Si l'on a pu prendre la mesure au laboratoire de leur forte compressibilité sur certains échantillons, la carte de leur extension et de leurs épaisseurs n'a pu être bien précisée malgré diverses investigations (pénétrromètre statique et dynamique, forages destructifs avec enregistrement des paramètres).

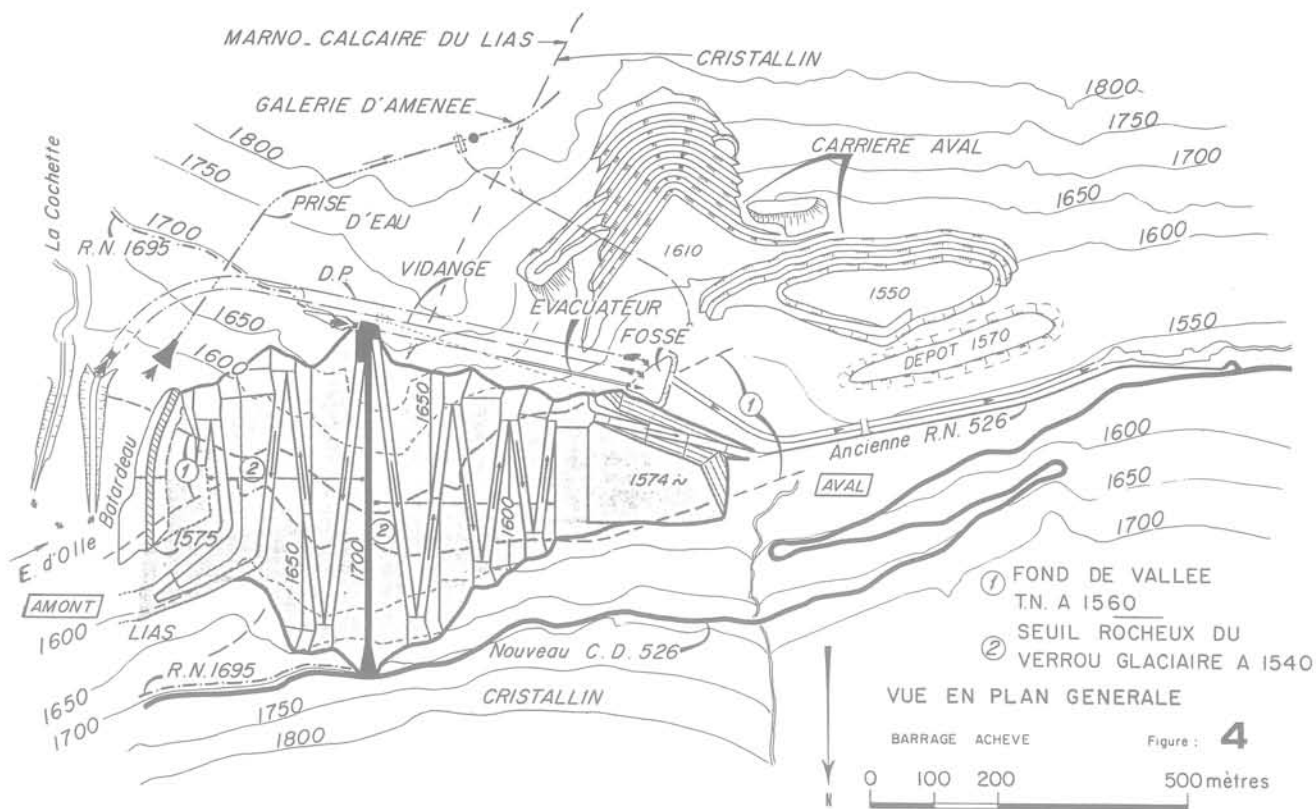


Fig. 4. — Vue en plan avec barrage achevé: le site

Du moins, les reconnaissances ont permis de bien préciser au centre du site la proximité du seuil rocheux et son extension vers l'amont. D'où le parti de découvrir le rocher sur la totalité de sa remontée formant seuil pour y fonder, en plus du noyau, toute la partie centrale de la digue et la recharge amont raidie par l'emploi d'enrochements.

De ce fait, le remplissage quaternaire avec ses lentilles compressibles n'a été conservé sur toute sa hauteur que sous le tiers aval de la recharge aval, lequel pourra s'accommoder des tassements de sa fondation. Actuellement, ces tassements sont de l'ordre de 0,70 m et ne devraient guère s'accroître car les remblais en cours et à venir en 1984 ne surchargeront pas la risberme aval.

6.3. Les divers types de barrages envisagés

Les divers types de barrages envisagés par l'Avant Projet Sommaire étaient les suivants:

— barrage en remblais, avec noyau central en terres caillouteuses de la Cochette et recharges amont et aval en éboulis supposés extraits des deux versants de la retenue;

— barrage en remblais, identique à celui ci-dessus quant au noyau et à la recharge aval, mais présentant une recharge amont à talus raidi par l'emploi d'enrochements et pouvant être entièrement fondée au rocher;

— barrage voûte, tirant parti de la forme favorable du verrou rocheux (élancement L/H inférieur à 4).

Le barrage voûte, qui était assurément la meilleure des solutions de barrage en béton, a été écarté à la suite d'estimations comparées qui l'ont montré 15 à 30 % plus cher que les solutions en remblais, alors que sa forme et son volume (de l'ordre de 1,8 millions de mètres cube) avaient été assez bien précisés par les premiers calculs de contraintes avec des hypothèses raisonnables quant aux profondeurs de fouilles.

Les solutions de barrage en remblais d'enrochements munis d'un masque amont en produit noir ou en béton de ciment avaient été écartées au niveau de l'inventaire en raison de l'importance des fouilles qu'auraient appelées d'une part la nécessaire assise au rocher du massif d'enrochements, et d'autre part la régularisation des formes du rocher dans la chicane au droit du raccordement du masque amont avec la fondation. Ces considérations valent également pour les solutions de barrage en remblais à noyau incliné.

Il ne restait donc en compétition pour les études d'Avant Projet Détaillé que les deux solutions de barrage en remblais citées tout d'abord: la digue tout en terres et la digue mixte, terres et enrochements en recharge amont.

Par rapport à une recharge amont en enrochements, la recharge amont en terre, dont la moitié amont aurait reposé sur les alluvions avec leurs passées silto-tourbeuses compressibles, avait surtout contre elle un supplément de 3 millions de mètres cube qu'il aurait fallu trouver dans les moraines. S'agissant d'un chantier saisonnier, mieux valait réduire autant que possible

le volume à mettre en place. D'où l'adoption de la digue mixte pour la suite des études.

A retenir que cette dernière solution implique un transit croisé des éboulis venant de la cuvette vers la recharge aval et des enrochements extraits en aval vers la recharge amont.

6.4. Les préoccupations du projeteur lors des études

La première préoccupation, déjà évoquée dans la description des matériaux, était d'obtenir un noyau suffisamment étanche. Avec les terres caillouteuses du gîte de la Cochette, on encourait le risque de ségrégation et celui de mettre en place un matériau non convenable soit par excès de cailloux soit par manque de fins. Aussi, des contrôles de granularité à raison de 1 pour 2 000 mètres cube en place ont été prévus et sont réalisés grâce à un laboratoire mécanisé adapté au traitement d'échantillons de 400 kg, quantité nécessaire pour une représentativité satisfaisante (ce que l'expérience du chantier a confirmé).

Par précaution, le noyau a été prévu relativement épais, avec plus de 100 mètres à la base, et des filtres à granularité suivie l'entourent en amont et en aval. Ces filtres sont prêts à contrôler tout éventuel cheminement d'eau privilégié qui se développerait à la faveur de passages ségrégués ou de fissuration (voir la granularité des filtres et drains sur la figure 2).

La seconde préoccupation était le risque de fissuration suite à des tassements différentiels et transferts de charge engendrés par la raideur des rives, la forme en chicane de la vallée, et enfin le maintien éventuel dans l'emprise de la digue de matériaux plus compressibles que les remblais.

Les dispositions du projet qui vont être présentées ci-après ont intégré ces préoccupations.

6.5. Les choix quant aux fouilles sous la digue

Les options suivantes ont été prises quant aux fouilles (voir figure 5 présentant les mêmes numéros repères que donnés ci-dessous).

1. Enlèvement du remplissage quaternaire de fond de vallée sous l'emprise du noyau, de la recharge amont et du tiers de la recharge aval.
2. Maintien sous la recharge aval du manteau d'éboulis en place sur la rive droite, en aval du talus de fouille pour asseoir le noyau au rocher, ainsi que, mais seulement sous le tiers aval, du remplissage quaternaire avec ses passées compressibles.
3. Maintien sous la recharge amont côté rive-droite d'une langue d'éboulis et moraines nichée au creux aval de l'éperon rive-droite, lequel assure une solide butée de pied à toute la moitié rive-droite du talus amont de la digue.
4. Pour prévenir les risques de fissuration, les formes des rives rocheuses ont été régularisées au mieux par retailles et bétons de forme et l'édification des remblais a été demandée autant que possible de niveau.

6.6. La coupe type de l'avant-projet détaillé

La coupe type de l'avant-projet détaillé a bénéficié des dispositions suivantes (voir figure 6 présentant les mêmes numéros repères que donnés ci-dessous) :

1. Introduction pour en réduire le coût dans le tiers aval de la recharge amont, composée par ailleurs d'enrochements, d'une zone d'éboulis. La stabilité à la vidange rapide a été assurée même en prêtant à ces éboulis, par sécurité, un comportement non drainant quant au développement de pressions interstitielles.
2. Adoption sur le talus aval d'un revêtement épais (10 m verticalement) en enrochements assurant une très bonne stabilité superficielle même avec une recharge en éboulis pouvant contenir jusqu'à 15 % d'éléments inférieurs à 0,1 mm.
3. Inscription à titre définitif dans les parements de la digue des nécessaires pistes de construction de 14 m de largeur pour éviter dans les rives relativement raides la réalisation d'entailles en escalier, ou dans les remblais celle de constructions phasées, toutes dispositions qui peuvent être source de tassements différentiels. L'emploi d'enrochements sur les deux parements a facilité, à talus moyens fixés par les conditions de stabilité (1,7 horizontal pour 1 vertical à l'amont et 2,1 horizontal pour 1 vertical à l'aval) le raidissement des talus entre pistes (1,4 pour 1 à l'amont et 1,6 pour 1 à l'aval).
4. Au voisinage des rives rocheuses, les bandes de filtres amont et aval enserrant le noyau et celle du drain incliné aval, font l'objet d'un élargissement progressif de 4 m, en partie courante, à environ 10 m au contact du rocher, ce qui place dans ces zones susceptibles de tassements différentiels une réserve de matériaux pulvérulents capables d'arrêter le développement de fissures et de limiter les éventuelles circulations d'eau qui pourraient s'y établir ;
5. De même, les 40 mètres supérieurs de la digue, qui constituent également une zone sujette à fissurations engendrées par d'éventuels tassements différentiels bénéficient d'un renfort de filtre côté amont. Entre le filtre amont 0/20 mm utilisé en partie courante et le noyau est insérée une bande de filtre fin 0/2 mm à même de s'engouffrer et colmater partiellement toute éventuelle fissure du noyau.

6.7. L'adaptation de la coupe type au début de l'exécution

Après réalisation des fouilles générales sous la digue et pendant l'exécution de traitement particulier du rocher sous l'emprise du noyau en fond de vallée, comportant notamment les injections superficielles, l'entrepreneur a souhaité monter quelque peu à l'avance les remblais des recharges sans devoir organiser un transit croisé des gros camions sur une piste provisoire. Après une étude particulière de stabilité à la vidange rapide, et compte tenu des formes du rocher découvertes au pied amont, le fond de la recharge amont a pu être entièrement édifié en éboulis tandis que les enrochements provenant des premiers tirs d'ouverture de la carrière aval étaient admis dans la recharge aval. Ces modifications ont été représentées sur la coupe centre rive-gauche de la figure 7.

Aucun changement d'importance n'a été apporté depuis à la coupe type du barrage.

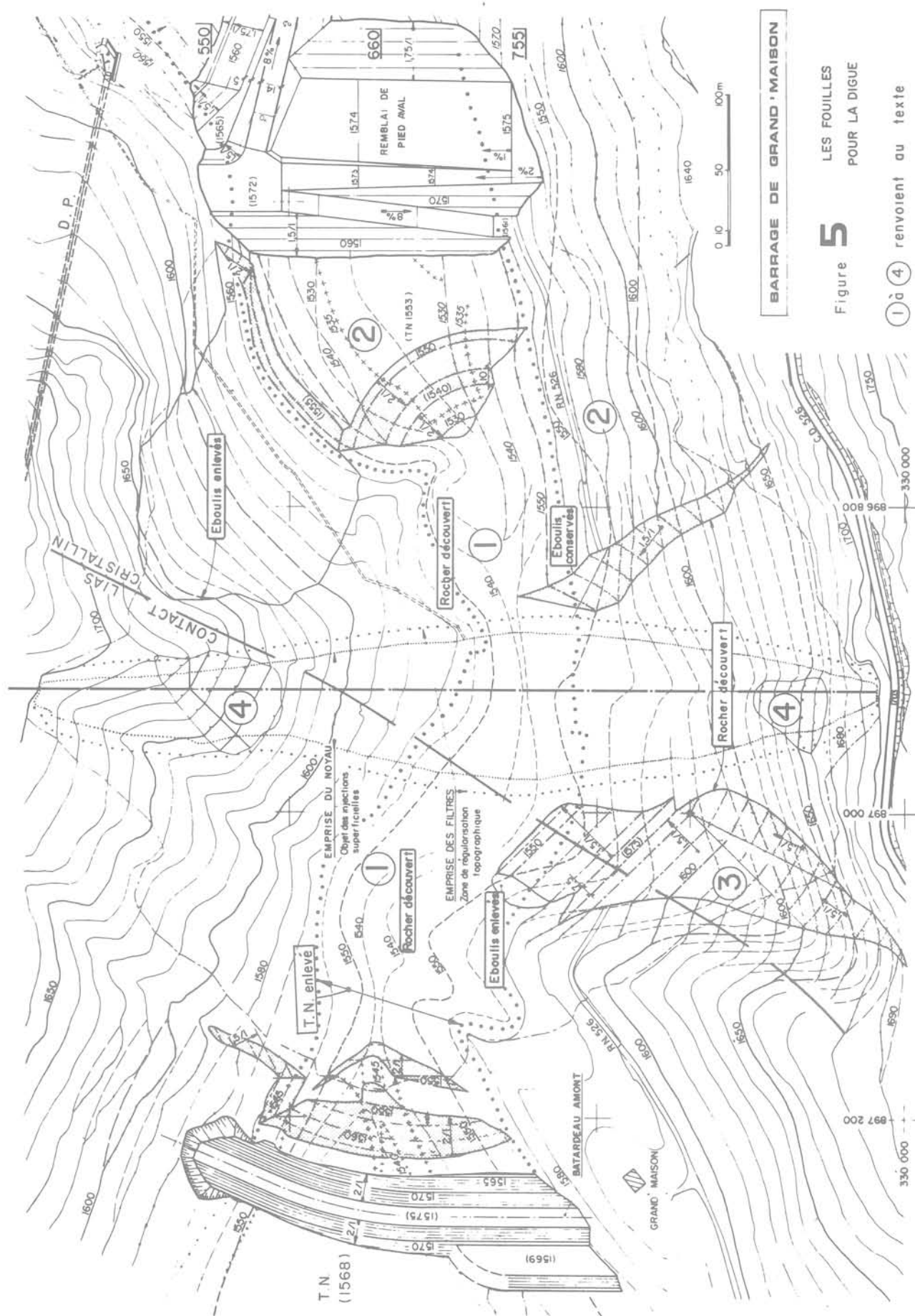
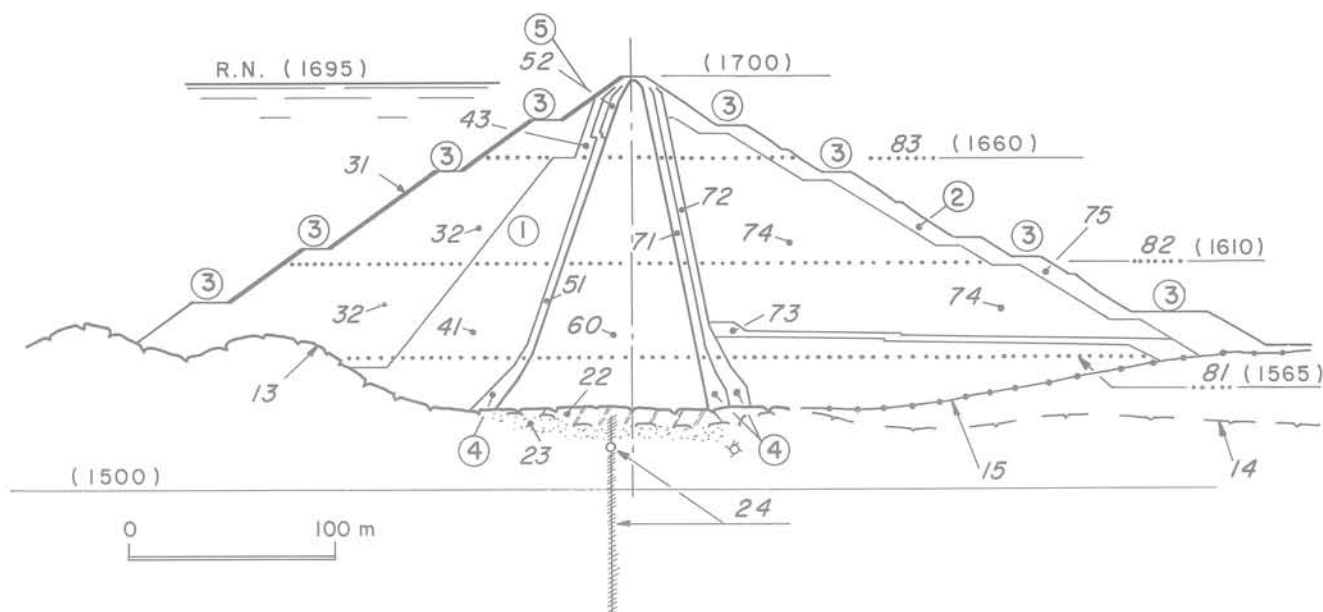


Fig. 5. — Les fouilles



① à ⑤ renvoient au texte

Fig. 6. — La coupe type (noyau au plus haut)

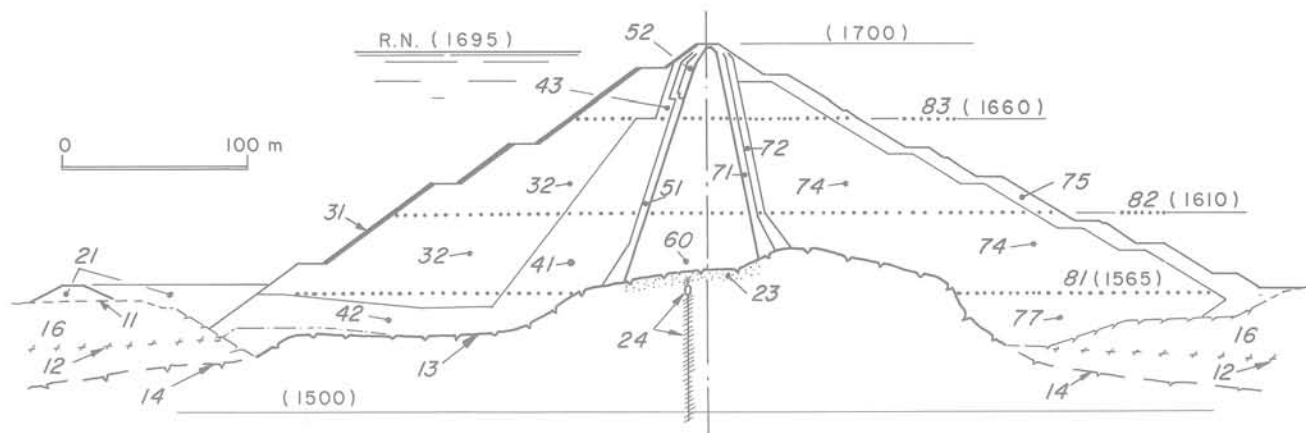


Fig. 7. — La coupe centre rive-gauche (présentant la modification du pied amont)

6.8. Le choix de la position du noyau contre l'éperon rive-gauche

La position du noyau contre l'éperon rive-gauche a fait l'objet d'un choix particulier. On n'a pas voulu raccorder le noyau au plus court sur un éperon très étroit à peine aussi haut que le barrage. En plaçant l'axe du barrage légèrement en amont de l'éperon, on a obtenu un large raccordement débordant sur la face amont de l'éperon. Précisément, en partie basse et à mi-hauteur, le contact est réalisé sur une face de l'éperon regardant légèrement vers l'amont, face obtenue

à mi-hauteur par une retaille de la forme arrondie initiale de l'éperon. En partie haute, également retournée côté vallée, le noyau vient en plus recouvrir la face naturelle de l'éperon tournée vers l'amont.

Ce retour du noyau sur la face amont de l'éperon en partie haute n'a pas pour but de pallier à une mauvaise étanchéité de l'éperon lui-même — le marnocalcaire qui le compose est assez étanche — mais il vise à assurer autour de la singularité que constitue l'arête entre la face de l'éperon regardant vers l'amont et la face bise regardant la vallée, une plus grande

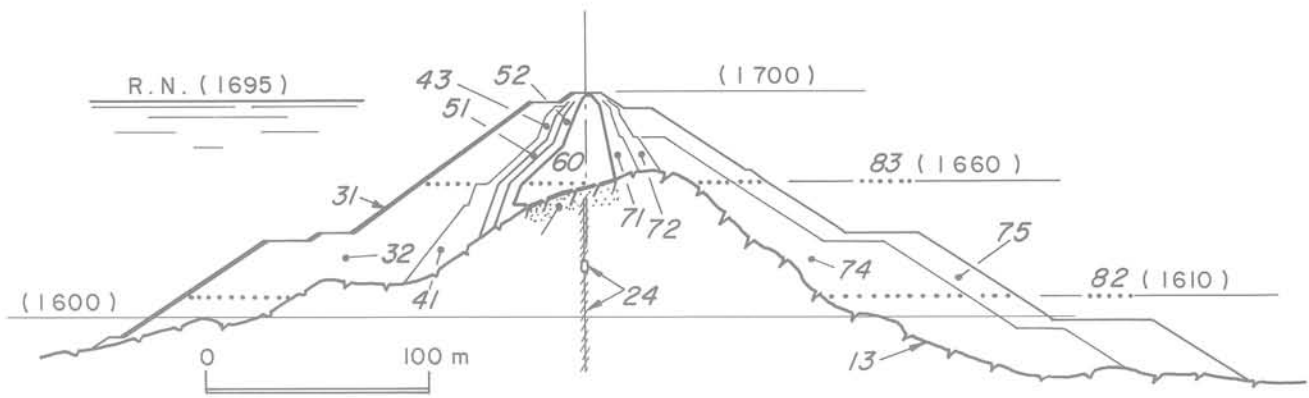


Fig. 8. — La coupe extrême rive-gauche

- | | |
|--|---|
| 11. Terrain naturel | 51. Filtre amont |
| 12. Toit des moraines en place | 52. Filtre fin spécial en partie haute |
| 13. Rocher découvert | 60. Noyau |
| 14. Rocher caché | |
| 15. Eboulis en place | 71. Filtre aval |
| 16. Alluvions avec passées silteuses | 72. Drain incliné |
| | 73. Drain exutoire de sécurité avec couches de transition sous et sus jacents |
| 21. Batardeau et décharge amont | 74. Eboulis de la recharge aval |
| 22. Béton de blocage du sillon sous glaciaire | 75. Enrochements en protection aval |
| 23. Zone de rocher traitée par injections superficielles | 77. Enrochements des premiers tirs admis dans la recharge aval |
| 24. Galerie et voile d'injection | |
| | 81. Arrêt de fin de campagne 1981 |
| 31. Enrochements spécialement rangés: rip rap | 82. Arrêt de fin de campagne 1982 |
| 32. Enrochements | 83. Arrêt de fin de campagne 1983 |
| 41. Eboulis ouverts à moins de 12% d'inférieurs à 0,1 mm | |
| 42. Eboulis ouverts substitués aux enrochements | |
| 43. Eboulis ouverts servant de transition vers le filtre | |

épaisseur du noyau et également de son contact avec le rocher de la rive. On en attend malgré les inévitables tassements différentiels, dus à la raideur et à la forme de la rive, une continuité suffisante du noyau et de son contact avec le rocher (fig. 8).

Autour de l'arête aval très vive de l'éperon rive-gauche, et le long de sa face aval très pentue, il est probable que des tassements différentiels se développeront, notamment pendant la mise en place des derniers remblais de la crête. Mais cette zone se trouve dans la recharge aval en aval du drain incliné, donc dans une zone drainée de percolations d'eau en pression, et des fissurations locales y seraient donc sans conséquence.

6.9. Retour sur la seconde préoccupation du projecteur: les déformations

Avec ces enrochements et ces terres caillouteuses, tous matériaux à angle de frottement élevé, la stabilité au glissement des talus du barrage sous les différentes sollicitations envisagées classiquement est bien assurée, en l'absence d'un niveau de séisme élevé (intensité VI-VII M.S.K.).

Il reste le souci d'obtenir, dans la zone centrale du barrage comprenant le noyau, ses filtres et les parties toutes proches des recharges, un champ de déforma-

tion le plus continu possible en évitant les irrégularités de répartition des charges susceptibles d'engendrer des tassements différentiels.

La fondation entièrement au rocher de cette zone centrale du barrage, les travaux de régularisation des formes rocheuses des rives et enfin la montée des remblais presque de niveau sont autant de précautions concourant à la continuité des déformations.

En plus des mesures topographiques classiques sur les talus, les déformations vont faire et font déjà l'objet de mesures internes, dans la recharge aval drainée (12 furets et 9 téléniveaux) et dans le noyau et la recharge amont (8 téléniveaux et 5 élongamètres).

Avec ces matériaux graveleux, les plus grandes déformations auront lieu pendant l'édification même des remblais (de l'ordre de 2 m au centre du noyau à mi-hauteur). La connaissance de l'histoire complète de ces déformations de construction est essentielle pour qu'on soit en mesure d'apprécier les plus petites déformations qui seront constatées ensuite à la mise en eau et dans les premières années de service.

Mais les points de mesures étant en nombre limité devant la complexité géométrique des rives, un modèle de calcul de déformations donnant des résultats en tout point du barrage est d'autant plus intéressant.

7. LES CALCULS DE DÉFORMATION EN FIN DE CONSTRUCTION

7.1. L'outil de calcul

Le programme de calcul aux éléments finis utilisé est le programme G.E.F.-B.A.R., développé par Coyne et Bellier à partir du programme N.O.N.-S.A.P., opérant ici en déformations planes. Ce programme peut simuler la construction par couches, ce qui est essentiel pour bien approcher les déformations d'un barrage en remblais.

Le modèle de comportement de sol utilisé est celui développé depuis 1976 à l'Ecole Centrale par AUBRY, DES CROIX, et HUJEU à partir du modèle Cam-Clay de Cambridge.

Les paramètres déterminant le comportement de chacun des matériaux du barrage ont été tirés, à l'exception des enrochements, d'essais triaxiaux menés en fait, pour les terres du noyau et les éboulis des recharges, sur des échantillons écrêtés à 63 mm et même à 20 mm pour les étreintes de 0,8 et 1,6 MPa. Ce qui, à 20 mm en particulier, élimine 30 % de cailloux sur les terres du noyau et 40 à 50 % sur les éboulis des recharges et exige donc une transposition délicate pour passer du matériau de laboratoire au matériau réellement mis en place.

Il a fallu aussi choisir les deux paramètres qui fixent, dans le modèle de comportement, l'état initial du matériau complet mis en place dans une couche de calcul, épaisse dans le cas présent de 8 à 12 mètres. Ces deux paramètres traduisent l'état d'écroutissage du matériau avant l'application du poids propre et du chargement progressif des couches sus-jacentes.

C'est dire l'incertitude qui entache la détermination par le calcul de l'état de contrainte et de déformation d'un élément du barrage, en admettant que l'hypothèse des déformations planes s'y trouve justifiée localement.

On doit considérer l'application de ce modèle mathématique davantage comme un outil d'interprétation des déformations mesurées et des tendances générales.

Le modèle actuel devrait cependant permettre, confronté aux déformations mesurées, d'étudier et de mieux comprendre le comportement de remblais posés sur une fondation à géométrie variée. En fait, la géométrie de la vallée à Grand'Maison est tellement variée, avec ses pentes raides et ses éperons formant chicane, qu'il faudra sans doute recourir à un modèle tridimensionnel pour approcher correctement les contraintes et les déformations réelles dans la partie centrale du barrage.

7.2. Présentation de quelques résultats en déformations planes

Il s'agit de calcul en conditions drainées donnant, avant mise en eau, les déformations à la fin d'une construction supposée assez lente, en regard de la perméabilité des matériaux, pour que les effets du développement et de la dissipation des pressions interstitielles dans le

noyau puissent être négligés; ce qui est presque le cas de la construction réelle répartie sur quatre campagnes d'été, puisque ces surpressions de construction se dissipent pour l'essentiel au cours de l'inter-campagne.

On dispose pour le moment d'une coupe amont/aval, correspondant à la coupe la plus haute du noyau où il atteint 160 m, et d'une coupe transversale de rive à rive sur l'axe.

Du fait du tracé sinueux du fond de la vallée, la coupe amont/aval interceptant la plus grande hauteur de noyau présente de part et d'autre une remontée de la fondation: à l'amont, c'est le rocher qui remonte tandis qu'à l'aval, c'est le manteau d'éboulis qui recouvre la rive droite qui s'épaissit vers l'aval au-dessus d'un rocher quasi horizontal.

Avec la coupe transversale de rive à rive dans le plan axial du noyau, on s'interrogeait sur la formation éventuelle d'un arc prenant appui sur les flancs du fond de vallée et déchargeant d'autant la partie la plus basse du noyau. L'intérêt étant centré sur la moitié inférieure de la coupe, le maillage a été pris très grossier dans la moitié supérieure.

Dans la coupe amont/aval:

- l'orientation et les grandeurs des contraintes paraissent satisfaisantes, sauf en crête où les derniers éléments posés ne bénéficient pas d'un nombre d'itérations suffisant (du moins dans ce calcul) et ne sont pas significatifs;

- le champ des déplacements est très régulier. Au centre, à mi-hauteur du noyau, le déplacement est de 2,20 m;

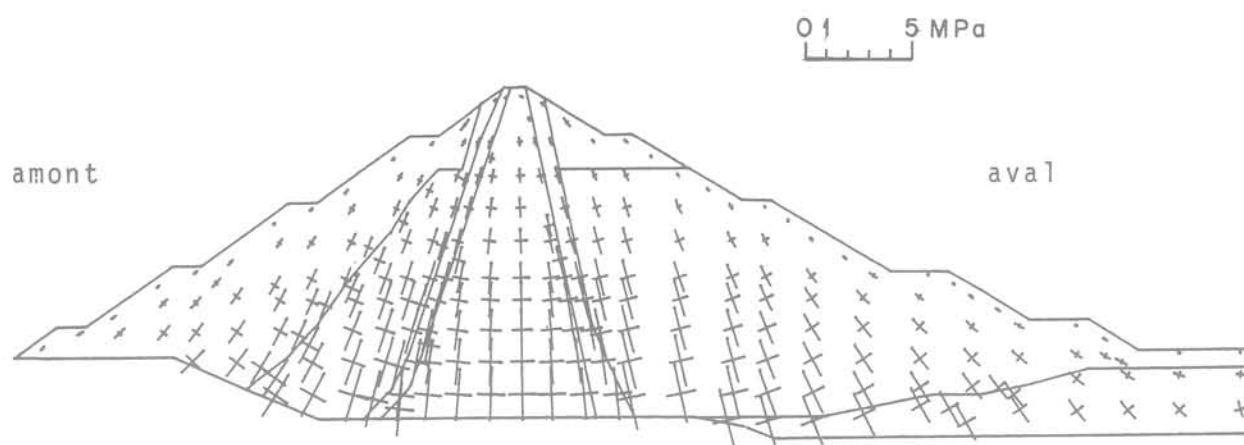
- c'est sur la représentation des iso-contraintes verticales que l'on peut apprécier les conséquences des différences de raideur entre les divers matériaux constituant le remblai: les éboulis situés à l'amont et à l'aval du noyau «portent» en partie ce noyau dont la partie basse se trouve de ce fait quelque peu déchargée (contrainte verticale de l'ordre de 2,7 MPa seulement sur le rocher de fondation, représentant 73 % du poids de la colonne de terre). Aux interfaces, notamment avec les zones de filtres et drains encadrant le noyau, les courbes iso-contraintes présentent quelques arabesques dues au jeu des fonctions d'interpolations. Mais on peut voir néanmoins dans la partie supérieure que les filtres «portent» également le noyau.

Dans la coupe de rive à rive:

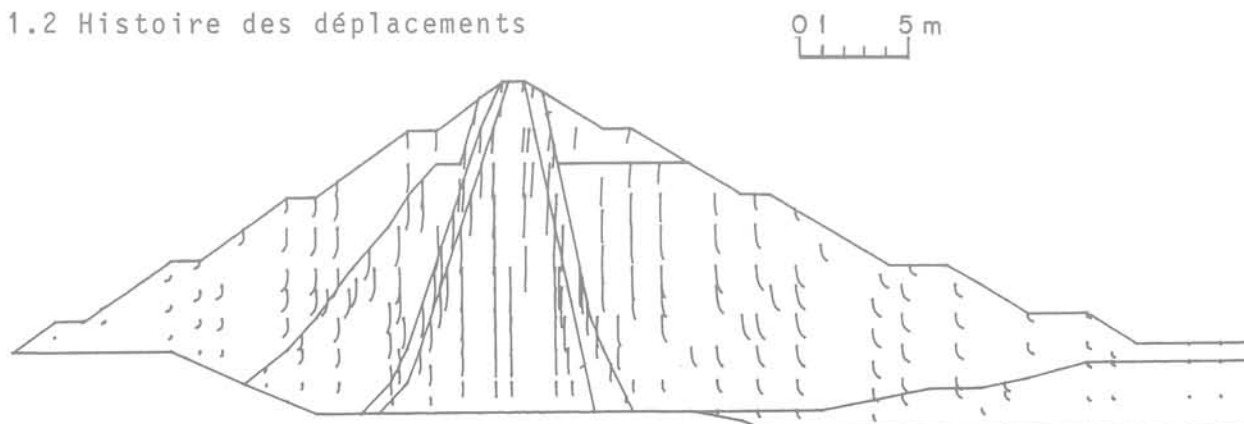
- la distribution des contraintes ne révèle pas de formation d'arc et de décharge associée de la base du noyau au fond de la vallée. Les contraintes verticales sont voisines de 3 MPa, valeur un peu plus forte que dans la coupe amont aval. Ce qui montre les limites des analyses de coupes croisées avec l'hypothèse de déformations planes;

- sur les versants, en analysant la direction des contraintes d'appui sur le rocher, on peut vérifier que l'angle de frottement mobilisé, de l'ordre de 26 degrés, ne dépasse pas celui que l'on peut attendre du contact noyau/rocher, compte tenu de l'interposition de la bande de terre fine. Sauf irrégularités locales, il ne devrait pas y avoir de glissements des remblais le long des flancs de la vallée au cours de la construction.

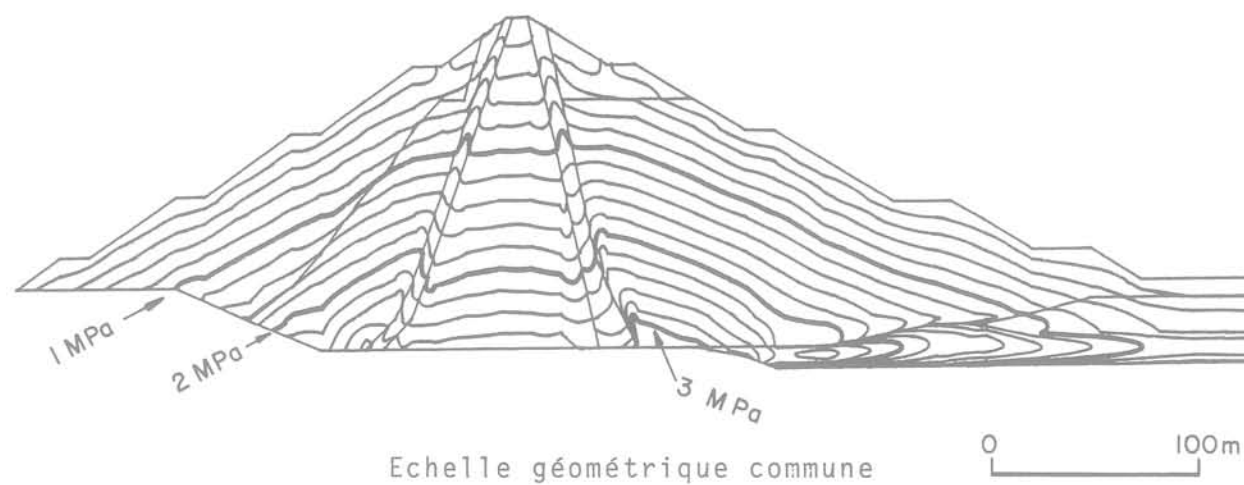
1.1 Contraintes principales



1.2 Histoire des déplacements



1.3 Courbes iso-valeurs de la contrainte verticale

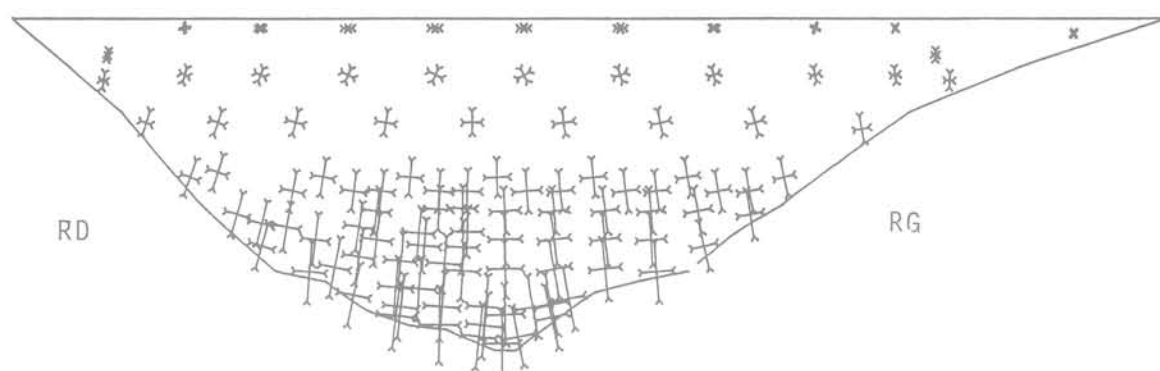


Calcul en déformations planes avec programme GEF-BAR de COYNE et BELLIER
et loi de comportement AUBRY/DES CROIX/HUJEUX

Fig. 9. — Résultats de calculs: coupe amont aval

1.1 Contraintes principales

0 1 5 MPa

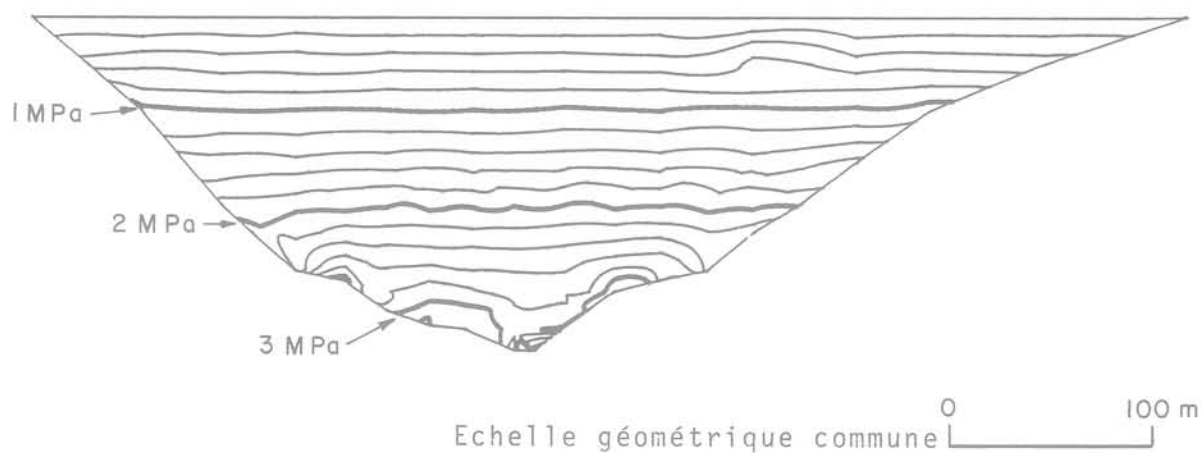


1.2 Histoire des déplacements

0 1 5 m



1.3 Courbes iso-valeurs de la contrainte verticale



Calcul en déformations planes avec programme GEF-BAR de COYNE et BELLIER
et loi de comportement AUBRY/DES CROIX/HUJEUX

Fig. 10. — Résultats de calculs :
coupe d'une rive à l'autre

7.3. Développement en cours

La démarche de calcul des déformations de ce barrage en remblais se poursuit :

— d'abord par la prise en compte complète de l'effet de l'eau, c'est-à-dire au-delà de l'effet de consolidation en fin de construction déjà résolu en 1981 (cf. la thèse de Docteur Ingénieur de Christophe TOSCAS, citée en référence 4), par la simulation du remplissage et de la vidange ;

— ensuite, par le passage au calcul tridimensionnel appelé par la géométrie singulière de ce site. Mais ce dernier calcul, surtout en non drainé, risque d'exiger une puissance de calcul exceptionnelle.

En attendant, on cherche d'abord à exploiter les calculs en déformations planes de plusieurs coupes du barrage et à les confronter aux déplacements constatés par le dispositif d'auscultation, déplacements qui, dans un barrage en remblais, sont maximums pendant la phase de construction même.

8. CONCLUSION

Les dispositions prises dans les plans d'exécution de ce grand barrage se sont inscrites jusqu'à présent (à 40 m sous le couronnement) dans le cadre du projet dont on peut partant avancer que ses options étaient bien adaptées aux conditions naturelles du site.

Ces conditions comprennent celles du site proprement dit, mais aussi celles des 12 millions de mètres cube de matériaux employés devant lesquels les moyens de reconnaissances mobilisables lors de la phase de projet apparaissent toujours faibles, notamment pour donner un portrait exact de la granularité de ces matériaux

grossiers dans la masse des éboulis qui vont être exploités. En fait, les reconnaissances réalisées pendant les étés 1977 et 1978 ont pu donner une idée correcte de la granularité et des volumes disponibles des différents matériaux.

Il restera, après achèvement de l'ouvrage, à constater au remplissage et à la vidange un comportement satisfaisant aux critères de sécurité admis pour de tels barrages, et c'est là que les calculs de déformations pourraient apporter des tendances précieuses lors de l'interprétation du comportement du barrage.

BIBLIOGRAPHIE

1. LECLERCQ, J. ; COURIER, M. ; TOURNEY, J. — «Le barrage et l'Aménagement de Grand'Maison» — Revue Travaux n° 564 de mars 1982, numéro spécial du 14^e Congrès International des Grands Barrages à Rio de Janeiro, pages 36 à 45.
2. MARCHAND, R. ; LEFEBVRE, J. ; GAUTHERON, J. — «Le barrage du Mont Cenis» — Revue Travaux n° 390 d'août-septembre 1967, numéro spécial du 9^e Congrès International des Grands Barrages.
3. COUR, F. ; VINCENT, A. — «Détermination de la perméabilité d'un noyau de barrage à partir des mesures in situ des pressions interstitielles» — Géotechnique, vol. XXIII, n° 3 de septembre 1973. The Institution of Civil Engineers — Great George Street — London.
4. TOSCAS, C. — «Calcul numérique de problèmes de consolidations élastoplastiques : application aux barrages». Thèse présentée à l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures soutenue le 9 février 1982, pour obtenir le grade de Docteur Ingénieur.

