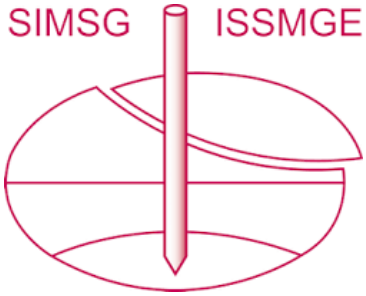
INTERNATIONAL SOCIETY FOR
SOIL MECHANICS AND
GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

https://www.issmge.org/publications/online-library

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Fondations profondes de l'ensemble usine-écluse de l'aménagement de Pierre-Bénite sur le Rhône– la mise hors d'eau du chantier

The Deep Foundations and Dewatering Operation for the Pierre-Bénite Power Development and Lock on the Rhone River

M. HENRY, *Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées HC, Directeur Honoraire de la Compagnie Nationale du Rhône, Chargé de mission à l'Electricité de France, Paris, France*

R. PAUBEL, *Ingénieur des TPE HC, Ingénieur en Chef à la Compagnie Nationale du Rhône, Lyon, France*

SOMMAIRE

L'ensemble usine-écluse de Pierre-Bénite est implanté en bordure du Rhône, dans une vallée constituée par une couche d'alluvions quaternaires à forte perméabilité, reposant sur un substratum de mollasses tertiaires moins perméables présentant l'aspect d'un sable faiblement aggloméré avec des bancs lenticulaires mieux grésifiés. Les alluvions renfermant une nappe phréatique fortement alimentée par le Rhône, la mise hors d'eau des fouilles a nécessité la construction d'une enceinte étanche de 1.360 m de pourtour et de 36.300 m.ca. de surface. Cette enceinte a été réalisée en béton plastique moulé dans le sol.

SUMMARY

The Pierre-Bénite plant and lock are located along the Rhone River, in a valley consisting of very pervious Quaternary alluvium underlain by less pervious Tertiary calcareous sandstone. Since the Rhone contributed largely to the phreatic water table in the alluvium, a watertight enclosure, 1360 meters in perimeter and 36,300 square meters in area, was required to dewater the excavation. This enclosure was made of cast *in-situ* concrete.

LES CHANTIERS DE LA CHUTE de Pierre-Bénite sur le Rhône ont été ouverts en 1962, dans le cadre des travaux réalisés par la Compagnie Nationale du Rhône pour l'aménagement du fleuve au triple point de vue de la production d'énergie électrique, du développement de la navigation et de l'irrigation. Le projet des ouvrages principaux, usine hydroélectrique, déchargeur et écluse est, dans l'ensemble, assez semblable aux réalisations antérieures du Bas-Rhône. En particulier, tous ces ouvrages sont attenants les uns aux autres (figs. 1, 2 et 3).

Cependant, des dispositions spéciales assez différentes ont dû être adoptées à Pierre-Bénite, en raisons des conditions géologiques du site, notamment au stade du chantier pour l'exécution à sec des travaux.

DESCRIPTION GÉOLOGIQUE

Les ouvrages principaux sont implantés en bordure du lit mineur du Rhône, dans une vallée inondable constituée par une couche d'alluvions quaternaires recouvrant un substratum de mollasses tertiaires.

Les mollasses tertiaires se présentent sous l'aspect d'un sable faiblement aggloméré renfermant des bancs lenticulaires mieux grésifiés. Elles résistent mal à l'érosion interne et se désagrègent rapidement sous l'action des agents atmosphériques. En revanche, elles ont l'avantage de présenter une bonne étanchéité (coefficient de perméabilité $k = 10^{-5}$ à 10^{-6} m/sec environ) et, tout en étant susceptibles de tassements assez importants, peuvent constituer, moyennant certaines précautions, une assise de fondation acceptable. Le toit de cette formation est sensiblement horizontal.

Les alluvions quaternaires, dont l'épaisseur totale atteint 20 m dans la région, sont constituées par une couche d'alluvions graveleuses d'une épaisseur d'environ 18 m surmontée

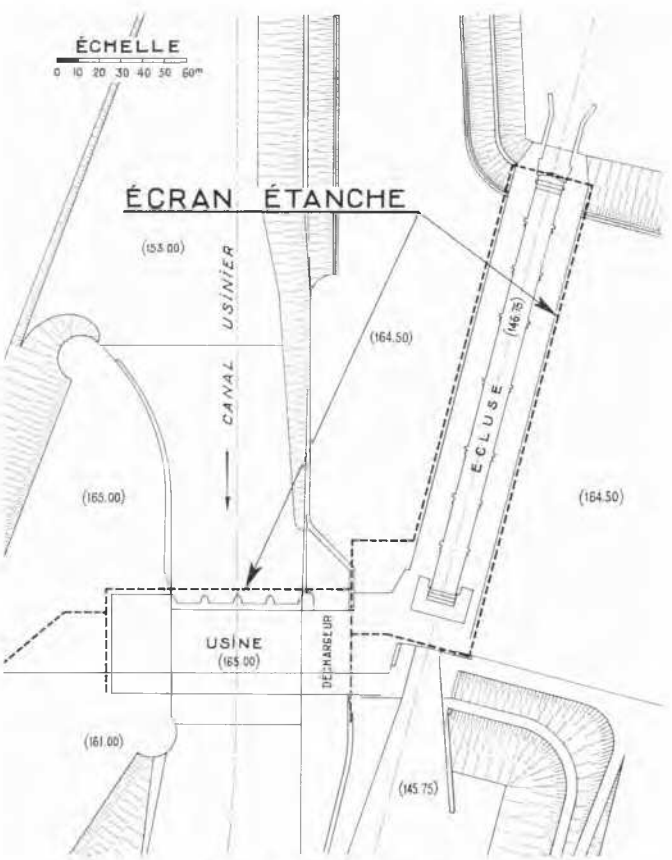


FIG. 1. Plan des ouvrages.

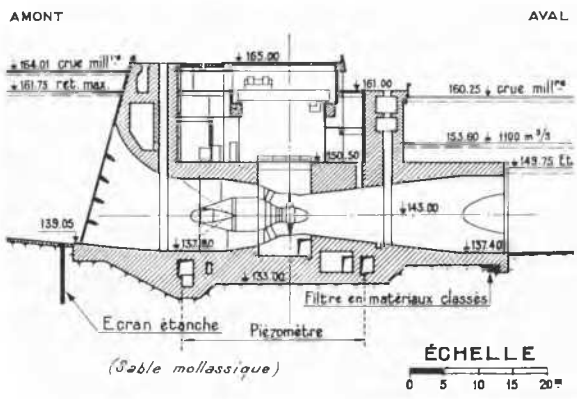


FIG. 2. Usine—coupe transversale.

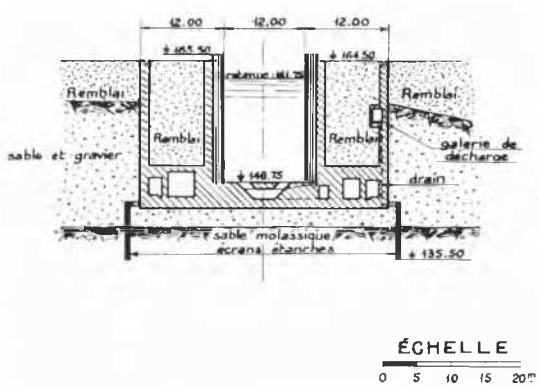


FIG. 3. Ecluse—coupe transversale.

d'une couverture superficielle d'alluvions modernes de 1,50 à 2 m, composée d'éléments plus fins.

Les alluvions graveleuses ne sont pas homogènes; elles comportent des lentilles de granulométries très différentes pouvant aller du sable presque pur jusqu'à des graviers dépourvus de sable. Du fait de cette hétérogénéité, ces alluvions présentent une perméabilité extrêmement variable d'un point à un autre ainsi qu'aux différents niveaux d'un même emplacement. En outre, l'existence d'une stratification horizontale fait que la perméabilité globale est, en général, notablement plus faible suivant la direction verticale que suivant la direction horizontale. Cependant, en considérant la couche d'alluvions graveleuses dans son ensemble, tout se passe à peu près comme s'il y avait une perméabilité horizontale moyenne de l'ordre de 7 à 8 mm/sec, avec des maxima d'environ 20 mm/sec et des minima de l'ordre du mm/sec.

Ces alluvions renferment une nappe phréatique médiocrement alimentée par les coteaux qui bordent la vallée du fleuve sur la rive droite. Par suite de la perméabilité relativement forte des alluvions, la pente de cette nappe est très faible, son niveau suivant assez fidèlement les variations de niveau du fleuve. L'épaisseur de cette nappe varie de 15 à 18 m.

La couche superficielle *d'alluvions modernes* comprend des sables fins, des silts, de l'argile et une proportion variable de matières organiques, notamment en surface, dans la terre végétale.

PROTECTION DU CHANTIER

Dans les chantiers des précédents aménagements du Rhône, la mise à sec des fouilles a pu s'obtenir sans protections spéciales dans des alluvions grossières assez semblables à celles de Pierre-Bénite. Toutefois, dans ce dernier aménagement, l'épaisseur de la couche perméable est beaucoup plus grande (18 m au lieu de 8 à 10 m), la perméabilité est plus forte (7 à 8 $\times$ 10^{-3} m/sec au lieu de 2 $\times$ 10^{-3} m/sec) et, au total, la transmissibilité kh est nettement plus grande (120 à 150 $\times$ 10^{-3} m.ca./sec au lieu de 16 à 20 $\times$ 10^{-3} m.ca./sec).

Mais la différence essentielle provient du fait que les précédents aménagements étaient situés à l'aval du confluent de l'Isère, affluent du Rhône dont les eaux, notamment en période de crue, sont très chargées en matériaux fins. Ces matériaux sont principalement des paillettes de schiste relativement grosses à l'égard desquelles les alluvions grossières constituent un filtre; il s'ensuit que le colmatage est très rapide et, pratiquement, les débits pompés dans les fouilles ont toujours été relativement faibles.

A Pierre-Bénite, la granulométrie des alluvions est à peu près la même, la proportion de sable fin étant cependant un peu moins forte. Quant aux eaux du Rhône, elles sont moins chargées qu'en aval de l'Isère, les matériaux en suspension étant, par ailleurs, plus fins. Ces deux différences, bien que faibles, sont suffisantes pour que le phénomène de colmatage ne se produise plus: c'est du moins ainsi qu'on explique le fait que de fortes stations de pompage, aspirant l'eau de la nappe, fonctionnent depuis 20 ans, sans que leur débit tende à diminuer.

Un batardeau de protection était donc absolument nécessaire pour éviter, dans les fouilles, des venues d'eau dangereuses pour la stabilité des talus (leur débit aurait été de l'ordre de 10 m.cu./sec, soit 7 litres/sec par mètre courant de périmètre). Pour examiner la possibilité de réaliser ce batardeau en palplanches, la Compagnie Nationale du Rhône a fait procéder, à l'emplacement même du chantier, à deux essais consistant, le premier, à exécuter un rideau de 10 m de longueur, le second, une enceinte carrée de 5,20 m de côté.

Dans les deux cas, on a constaté que le battage dans les alluvions pouvait s'exécuter sans grosses difficultés, mais que, par contre, l'enfoncement dans la mollasse nécessitait des moyens très puissants et laissait craindre des possibilités de déchirure ou de déboîtage. Cet enfoncement ne pouvait d'ailleurs pratiquement pas dépasser 1 à 2 m ce qui, pour des charges d'eau pouvant atteindre 20 m, laissait subsister des risques sérieux de contournement accompagné d'érosion interne.

On sait, d'ailleurs, que, si les palplanches donnent généralement de bons résultats lorsqu'elles peuvent se déplacer librement (batardeaux en rivière) leur étanchéité reste médiocre dans un terrain relativement dur où les mouvements tendant au coincement des joints sont limités. En fait, les essais de pompage réalisés à l'intérieur de l'enceinte expérimentale ont fait apparaître des débits de fuite importants pour des rabattements relativement faibles. On pouvait en déduire que si le batardeau de chantier était exécuté par ce procédé, les pompages atteindraient plusieurs mètres cubes par seconde avec des risques de "renard" non négligeables.

Au surplus, l'arrachage des rideaux expérimentaux a été extrêmement long et difficile en raison de la grande hauteur de fiche et des déformations subies par les palplanches au cours de l'enfoncement dans la mollasse. Enfin, il convenait également de prendre en considération le délai nécessaire aux approvisionnements ainsi que l'immobilisation du capital correspondant.

C'est pour toutes ces raison que la Compagnie Nationale du Rhône a, en définitive, renoncé à l'utilisation des palplanches pour s'orienter vers un autre procédé, celui de la

paroi en béton plastique moulé dans le sol. Ce procédé consiste à réaliser, dans le terrain, une saignée verticale dont les parois sont stabilisées à l'aide d'une boue thixotropique résultant de la mise en suspension de bentonite dans l'eau, en proportion précise (50 kg à 70 kg par 1.000 litres d'eau à Pierre-Bénite); après achèvement de la saignée, cette dernière est remplie de béton plastique à l'argile et au ciment qui est coulé dans la tranchée, d'où la boue est évacuée vers le haut, en sorte que le soutènement du terrain continue à être assuré; le béton ainsi coulé constitue une paroi continue moulée dans le sol.

De tels ouvrages avaient été utilisés depuis quelques années, notamment en Italie et sur divers chantiers français; mais peu d'entre eux atteignaient des dimensions aussi importantes que celles qui étaient nécessaires à Pierre-Bénite: la longueur développée devait être, en effet, de 1.360 m et compte tenu des profondeurs d'ancrage nécessaires dans la mollasse, la surface totale de l'écran devait atteindre 36.300 m.ca., l'aire ainsi protégée étant d'environ 12 ha (figs. 4, 5 et 6).

L'épaisseur de l'écran a été fixée à 0,50 m dans toutes les zones où sa hauteur est inférieure à 24 m, et à 0,60 m dans les zones où sa hauteur dépasse 24 m. Si le procédé permettait de résoudre parfaitement les problèmes posés par la nappe dans les alluvions, l'écoulement dans les sables mollassiques, par contre, pouvait, dans les zones à faible cohésion, produire une érosion régressive pouvant conduire au phénomène du renard. Une étude de l'écoulement a donc été faite en vue de déterminer les profondeurs d'ancrage nécessaires. Cette étude était compliquée par le fait que, en raison notamment de la présence dans le sable mollassique de lentilles horizontales de grès, ce sable présente une forte anisotropie, la perméabilité horizontale y étant très supérieure à la perméabilité verticale.

Le réseau d'écoulement a été établi suivant la méthode classique consistant à tracer un premier réseau en milieu isotrope et à déformer ses dimensions horizontales dans un rapport égal à la racine carrée du quotient A^2 de la perméabilité horizontale à la perméabilité verticale. Ce quotient étant mal connu, l'étude a été faite avec deux valeurs qui

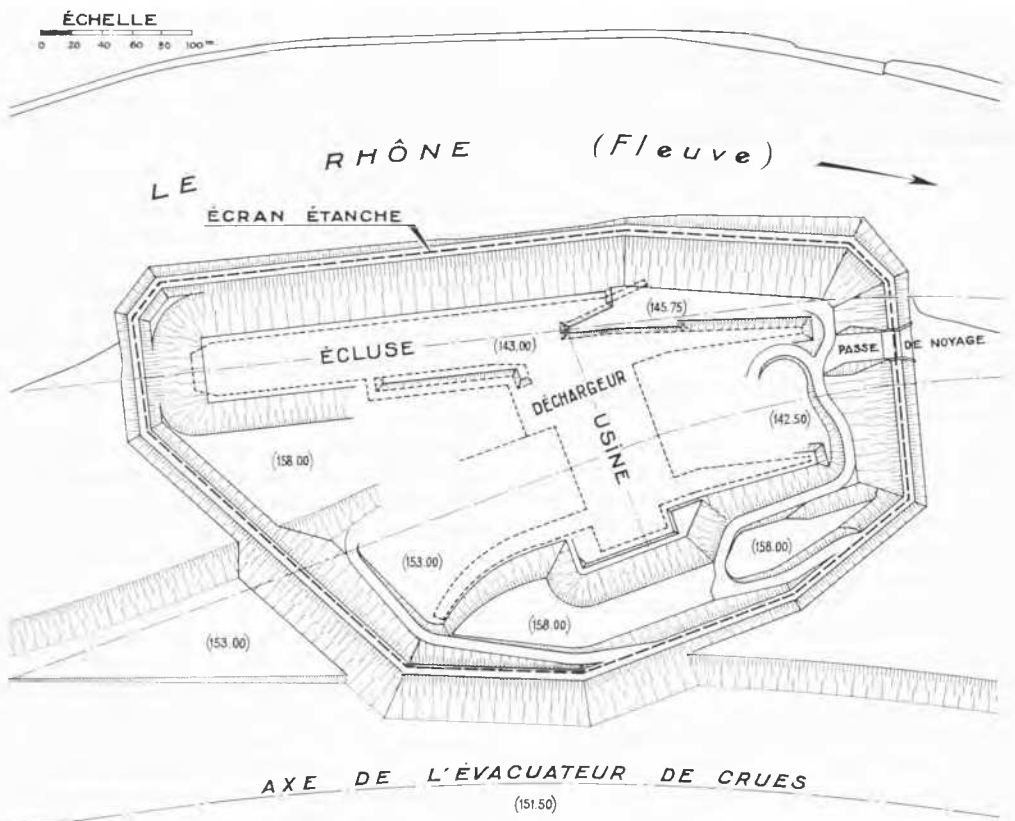


FIG. 4. Plan du batardeau.

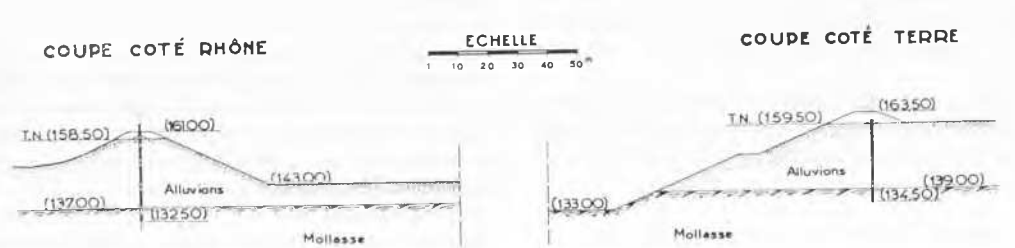


FIG. 5. Coupes transversales dans le batardeau.

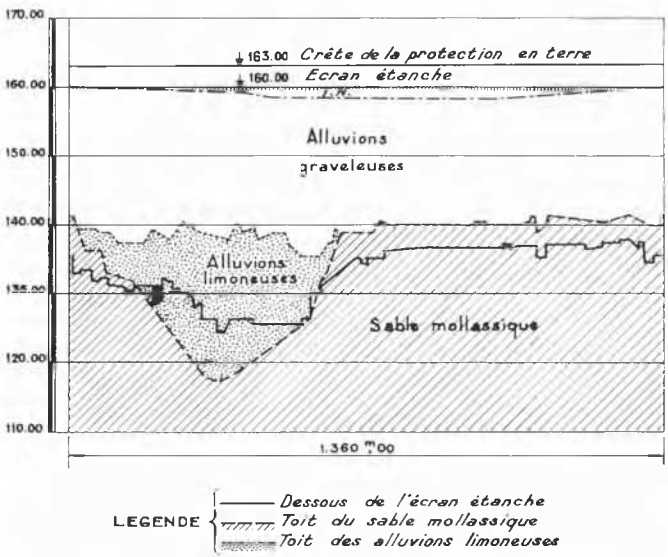


FIG. 6. Profil développé de l'écran étanche

peuvent être considérées comme encadrant la valeur réelle: $A^2 = 25$ et $A^2 = 500$.

Le sable mollassique présente une densité sèche de 1,55, pour une densité absolue de 2,65, de sorte que sa densité apparente à l'état saturé est de $1{,}55 \times 1{,}65/2{,}65 = 0{,}965$. Si sa cohésion est nulle, il ne peut donc résister à un gradient vertical ascendant supérieur à l'unité. Mais, pour avoir, au pied de l'écran, un gradient qui ne dépasse pas cette valeur, il faudrait un ancrage d'au moins 10 m, ce qui serait extrêmement onéreux.

S'agissant d'un ouvrage provisoire, il a été admis que les hypothèses à envisager ne devaient pas être, dans tous les cas, les plus défavorables. En particulier, bien que les sondages aient montré qu'au contact de la mollasse les alluvions sont généralement assez perméables et que, par conséquent, elles manquent vraisemblablement d'éléments fins, il a été admis qu'elles pourraient se comporter comme un filtre à l'égard du sable mollassique. En conséquence, pour déterminer l'ancrage de la paroi moulée dans la mollasse, on s'est contenté de considérer les risques de renard en pied de talus de la fouille.

Dans les zones où la mollasse se présente sous forme de sable sans cohésion, cet ancrage doit être de 6 m pour que le gradient reste inférieur à 1 avec la valeur $A^2 = 500$; ce gradient tombe à 0,5 lorsqu'on prend la valeur $A^2 = 25$. Mais ces zones de sable sans cohésion ont été, en fait, extrêmement rares et l'ancrage a pu, sur la plus grande partie de la longueur de l'écran, être réduit à 4 m.

Au cas où l'observation des débits arrivant au fond de la fouille aurait laissé craindre des risques de renard en certains points, un rabattement général de la nappe du sable mollassique était envisagé au moyen d'une série de puits filtrants sommaires. Mais, fort heureusement, ce dispositif onéreux et d'une réalisation difficile ne s'est pas avéré nécessaire.

L'ensemble de cet écran étanche a été réalisé en dix mois, de juillet 1962 à mai 1963, malgré un hiver assez rigoureux et plusieurs crues du Rhône qui ont arrêté les travaux à plusieurs reprises. Le travail a été exécuté par panneaux dont la longueur varie de 5 à 26 m.

Le forage de la tranchée a été exécuté par percussion dans les alluvions à forte proportion de gros éléments, par percussion et rotation combinées dans les alluvions à faible proportion de gros éléments et par rotation dans les mollasses. L'enlèvement des déblais a été réalisé suivant la méthode dite de circulation inverse de boue qui consiste à aspirer, à la base du trépan, par un circuit situé à l'intérieur du train de tubes supportant l'outil, la boue chargée des matériaux désagrégés par le forage; cette boue est ensuite criblée et épurée en surface avant d'être renvoyée dans la tranchée. Un contrôle permanent était exécuté pendant toute la durée du travail pour vérifier les largeurs et les profondeurs de chaque panneau. Le bétonnage s'est effectué sous la boue au moyen de deux colonnes formées de tubes de 300 mm de diamètre intérieur, dont l'extrêmité supérieure était munie d'un entonnoir et dont l'extrêmité inférieure pénètrait dans la masse de béton frais déjà en place. Au total, la tranchée a été excavée par 14 machines perforatrices dont le rendement moyen a été de 1,70 m.ca./hr. dans les alluvions, de 0,46 m.ca./hr. dans la mollasse.

Le seul incident notable est l'éboulement de 10 panneaux forés et non encore bétonnés, au cours d'une montée rapide des eaux du Rhône en mars 1963. Cette crue a entraîné une montée de même importance de la nappe phréatique, qui a atteint des niveaux supérieurs à ceux de la boue thixotropique dans la saignée ce qui a provoqué l'éboulement de la paroi verticale. L'action de soutènement exercée par la boue sur des talus verticaux de grande hauteur peut s'expliquer, en effet, compte tenu de la présence sur les parois d'un dépôt partiellement étanche dénommé "cake," par l'intervention simultanée de deux phénomènes: d'une part, un certain débit qui traverse le cake en exerçant une pression de courant, ce qui produit le même résultat qu'un adoucissement du talus, d'autre part, une discontinuité de pression qui s'établit de part et d'autre du dépôt et qui réalise un soutènement direct du terrain par la boue.

On conçoit que cet équilibre devienne précaire lorsque le niveau de la nappe dans le sol devient voisin de celui de la boue dans la tranchée. Les travaux de réfection ont consisté à remblayer entièrement les saignées qui ont donné lieu à des incidents et, après un certain délai destiné à permettre le tassement de ce remblai, à creuser une nouvelle saignée.

Les terrassements de la fouille, à l'intérieur de l'enceinte, ont commencé, avant achèvement complet de celle-ci, par les déblais situés au-dessus de la nappe. Dès achèvement de l'enceinte, il a été procédé aux épuisements à l'intérieur du batardeau au moyen de quatre pompes de 350 m.cu./hr. chacune et les déblais se sont poursuivis, principalement avec des engins de surface. Les terrassements dans la mollasse ont été exécutés avec des pelles, les parties les plus dures étant préalablement disloquées à l'explosif.

Les talus de la fouille ont des inclinaisons de 5/2, sauf en bordure du Rhône où, en raison du manque de place, ils ont été raidis à 2/1: la crête du talus au niveau du terrain naturel se trouve toujours à une distance de la paroi moulée d'au moins 9 m.

Au total, les résultats sont très satisfaisants étant donné que les épuisements à l'intérieur de l'enceinte, qui sont d'ailleurs indépendants du niveau du Rhône, n'excèdent pas 60 litres/sec. Or, ces épuisements correspondent aux eaux de pluie, au débit qui provient de la mollasse, à celui qui provient de la nappe par contournement de l'ancrage de la paroi et enfin aux venues d'eau à travers la paroi proprement dite ou à travers les joints. Il n'est pas possible de ventiler le débit total entre ces quatre éléments; on a cependant pu évaluer à 20 litres/sec. environ les venues d'eau en provenance de la mollasse et l'on voit que, même dans l'hypothèse où tout le complément proviendrait de la paroi, on arrive à

des débits extrêmement faibles eu égard à la surface totale de cette paroi qui est de 36.300 m.ca. Ces débits sont hors de proportion avec ceux qui auraient été obtenus par d'autres procédés et notamment les rideaux de palplanches.

Il est intéressant de comparer les débits ci-dessus avec les résultats de calculs* basés sur les réseaux d'écoulement évoqués ci-avant: En supposant un coefficient de perméabilité de 10^{-5} m/sec suivant une direction horizontale et de $(10^{-5})/25$ m/sec suivant une direction verticale, on arrive à un débit de 50 litres/sec, et en conservant le coefficient de perméabilité de 10^{-5} m/sec suivant une direction horizontale et en prenant la valeur $(10^{-5})/500$ suivant une direction verticale, on obtient un débit de 5 litres/sec environ. On voit que les ordres de grandeur sont comparables.

La majeure partie du débit en provenance de la mollasse arrive dans la fouille par d'anciens sondages descendus à 30 m environ dans cette formation et dont le débit et la pression se maintiennent constants. Il semble que ces sondages aient rencontré des horizons perméables assez fortement alimentés. La mise en place d'un réseau de piézomètres est en cours pour préciser ce point.

L'extrême faiblesse de cette venue d'eau montre que la paroi a supporté, sans se casser, la déformation correspondant à la mise en butée du massif de gravier formant soutènement, déformation qui est certainement importante puisque la charge d'eau atteint environ 20 m. Ce fait illustre l'intérêt d'utiliser un béton à l'argile-ciment, donc plastique.

Il est intéressant d'observer que, pour un autre chantier du même aménagement, celui du barrage, une enceinte analogue a été réalisée par application dans les mêmes terrains d'un procédé différent consistant à réaliser l'excavation de la tranchée au moyen d'une benne ne possèdant qu'une faible possibilité de perforation et ne pouvant, par conséquent, s'enfoncer que dans le sable mollassique non cimenté. Ce procédé plus économique était justifié, dans ce cas, par le fait que, le niveau de la fondation étant à quelques mètres au-dessus du niveau de la mollasse, un ancrage important n'était pas nécessaire, une sécurité moindre pouvant s'admettre.

Au total, à ce chantier, pour une enceinte d'une surface de 16.800 m.ca. et d'une longueur de 793 m, les venues d'eau varient suivant les niveaux du Rhône entre 120 litres/sec, pour des eaux moyennes, et 200 litres/sec, pour les crues. Ces débits ne semblent pas varier dans le temps de sorte qu'on peut penser qu'il n'y a pas de formation de renard ou que, si l'écoulement s'est concentré sur certaines surfaces, le gravier recouvrant la mollasse a joué le rôle d'un filtre.

Quoi qu'il en soit, on voit que ce procédé n'aurait pu être employé au chantier de l'usine en raison de l'importance des venues d'eau qui se seraient produites et des risques d'érosion régressive dans la mollasse, en pied de talus.

*Le calcul du débit par mètre courant de paroi moulée a été fait d'après les réseaux d'écoulement et le débit total a été obtenu en multipliant ce débit unitaire par la longueur de la paroi.

CONCLUSION

Les ouvrages principaux de la chute de Pierre-Bénite devant être fondés à sec, à 15 m de profondeur minimale, dans une nappe dont le terrain de support est éminemment perméable, cette condition a pu être réalisée grâce à la constitution, au moyen d'une paroi moulée dans le sol, d'un écran d'étanchéité traversant le gravier perméable et ancré dans la mollasse sous-jacente. Les venues d'eau dans la fouille sont minimes.