Le barrage de Serre-Ponçon sur la Durance

Étude des Infiltrations

Serre-Ponçon dam on the Durance infiltration study

PAR G. SCHNEEBELI

INGÉNIEUR AU SERVICE DES ÉTUDES ET RECHERCHES HYDRAULIQUES D'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

Le barrage projeté à Serre-Ponçon, sur la Durance, est une digue en terre de plus de 120 m de haut. Il est assis sur une épaisseur très importante d'alluvions perméables.

La mise au point du projet a demandé une étude poussée des infiltrations à travers l'ouvrage et ses fondations. Des essais sur modèle hydraulique à trois dimensions ont permis, de concert avec des mesures effectuées sur place, de préciser et de corriger les idées que l'on se faisait initialement de l'homogénéité d'ensemble des alluvions et des circulations privilégiées au contact du rocher. Les différents organes du barrage ont été étudiés par les méthodes d'analogie électrique, qui se sont révélées très fructueuses.

L'auteur signale deux résultats généraux obtenus au cours des études : l'un concerne une théorie de l'action de la capillarité sur les écoulements de filtration à surface libre, l'autre une méthode nouvelle pour le calcul des écoulements variables.

Le mémoire se termine par une comparaison des méthodes analogiques et de l'expérimentation sur modèle.

The dam proposed at Serre-Ponçon on the Durance is an earth structure more than 120 m high. It is founded on a very deep layer of permeable alluvium.

The final design of the project has demanded a thorough study of the infiltrations through the structure and its foundations. Tests on a three dimensional scale model, together with site measurements, have allowed the initial ideas to be developed and corrected — i.e. the ideas about the homogeneity of the alluvium and the free passage in contact with the rock. The various parts of the dam have been studied by the methods of electrical analogy which have proved very helpful.

The author announces two general results that have been obtained during the investigations : one is a theory on the action of capillarity in filtering flows with a free surface, the other is a new method of calculating variable flows.

The note ends with a comparison of the methods of analogy and model experiment.

INTRODUCTION

Le projet de Serre-Ponçon est trop connu de tous ceux qui, de près ou de loin, suivent le développement de l'équipement hydroélectrique français pour que nous ayons à le présenter (*). Rappelons simplement que dès 1856 le site de Serre-Ponçon avait attiré l'attention des techniciens par les avantages qu'il offre pour la cons-

truction d'un grand ouvrage régulateur. La réalisation du projet a cependant paru impossible, jusqu'à un passé très récent, en raison de la grande épaisseur d'alluvions remblayant le rocher qui était alors considéré comme la seule assise possible du barrage.

La solution retenue par l'Electricité de France est, on le sait, une digue en terre de plus de 120 m de haut, réalisée avec les alluvions de la Durance (fig. 1). L'étanchéité est assurée par un noyau argileux prolongé dans la fondation par un rideau d'injections.

(*) On trouvera les grandes lignes du projet dans le numéro de février 1952 de la *Revue de la Chambre de Commerce de Marseille*, dans le texte d'une conférence de M. DECELLE, Directeur de la Région d'Équipement Hydraulique Alpes III.

FIG. 1

Ce projet se distingue de la plupart des grands barrages en terre existants par l'épaisseur très importante des alluvions perméables qui remblaient la vallée rocheuse (la fig. 2 montre une

duit à l'abandon du projet d'un grand barrage à Serre-Ponçon. Il semblait donc devoir, *a priori*, présenter les plus grandes difficultés.

FIG. 2

coupe de cette vallée au voisinage de l'axe du barrage). Une étude poussée de la percolation à travers la digue et ses fondations s'imposait donc en raison même de cette particularité.

Les idées directrices de cette étude ont naturellement évolué au cours de l'avancement du projet. Nous pouvons distinguer trois phases principales :

— L'ÉTUDE DES FONDATIONS. Le problème des fondations avait déjà maintes fois con-

- L'ÉTUDE DE LA SÉCURITÉ DE LA DIGUE. Étant donné la charge d'eau très importante (115 m) que supportait l'ouvrage, il était indispensable de tenir compte de l'incidence de la percolation sur sa stabilité.
- L'ÉTUDE DE LA DISPOSITION LA PLUS ÉCONOMIQUE DES DIVERS ORGANES DE LA DIGUE ET EN PARTICULIER DE LA COUPURE. Les préoccupations économiques ont naturellement pris le premier rang lorsque le projet était assez avancé et que les dispositions techniques étaient prises pour assurer une entière sécurité à l'ouvrage.

Ces différentes études ont été effectuées par le Service des Etudes et Recherches Hydrauliques d'Electricité de France et le Laboratoire National d'Hydraulique de Chatou, en liaison étroite avec les Services de l'Équipement (R.E.H. Alpes III). Pour les analogies électriques, nous avons bénéficié du précieux concours des Spécialistes de l'Institut Blaise-Pascal; pour les essais d'injection d'isotopes radioactifs de ceux du Service de Physique et Chimie du Commissariat de l'Energie Atomique et de la Société Solétanche.

Nous nous proposons, dans cette note, de décrire rapidement ces études et d'en commenter les résultats.

LE PROBLÈME DES FONDATIONS

En 1951, lorsqu'il fut décidé de procéder à une étude sur modèle hydraulique, l'accent avait été mis sur le danger que pourraient présenter pour le barrage les circulations privilégiées que l'on supposait exister dans des fissures au contact alluvions-rocher.

L'existence de ces circulations avait été déduite de l'accident, survenu en 1913 au fond d'une galerie de reconnaissance qui avait été brutalement envahie par les eaux, ainsi que des réactions anormales de certains piézomètres lors des essais de pompage en 1950. On craignait

alors qu'il n'existât tout un système de fissures ouvertes, au voisinage desquelles d'importantes érosions souterraines pouvaient se produire lors de la mise en charge du barrage. De telles érosions risquaient non seulement de créer des contournements importants du dispositif d'étanchéité, mais pouvaient favoriser la formation de renards et ainsi compromettre gravement la sécurité de la digue.

Ce danger semblait encore accru par l'hétérogénéité de la perméabilité des alluvions. Au cours de l'importante campagne de reconnaissance du site de Serre-Ponçon des essais de perméabilité locale avaient été exécutés dans de nombreux sondages traversant les alluvions. Ces essais ont mis en évidence une grande dispersion dans les valeurs des perméabilités qui variaient entre les extrêmes d'environ 1 et 10^{-4} cm/s.

Le problème des fondations se présentait donc sous le double aspect : circulations privilégiées dans le rocher et hétérogénéité des alluvions.

Cette dernière s'explique d'ailleurs fort bien par le mode de formation du remblai alluvial. Les matériaux comblant la vallée rocheuse ont, en effet, été déposés au cours de nombreuses divagations de la Durance, dont on trouve encore à l'heure actuelle d'excellents exemples. L'alternance des crues et des étiages, la naissance de bras morts et les changements de lit de la rivière ont laissé entre les rives rocheuses une masse où s'imbriquent les dépôts fins et les dépôts grossiers. On a parlé de structure lenticulaire et, en fait, aucune continuité n'a pu être établie entre les différentes couches traversées par les sondages.

Si la masse des alluvions souffre incontestablement d'une forte hétérogénéité locale, on pouvait cependant penser qu'à une échelle plus grande elle retrouverait une homogénéité relative. Cette hypothèse d'alluvions « homogènes dans la masse » semblait d'ailleurs devoir se confirmer après les essais de pompage à grande échelle réalisés par Solétanche en 1950. L'interprétation de ces essais, au cours desquels les rabattements ont été observés dans de nombreux piézomètres répartis dans la vallée à l'emplacement du futur barrage, a réduit la fourchette des perméabilités à 10^{-1} — 10^{-2} cm/s environ.

Les premiers essais que nous avons effectués sur le modèle de Serre-Ponçon au Laboratoire de Chatou avaient pour but d'examiner cette hypothèse.

Ce modèle réalisait à l'échelle de 1/200, sans distorsion, la forme de la vallée rocheuse telle qu'elle avait été déterminée d'après les sondages de reconnaissance. Les alluvions y étaient figurées par un remplissage de sable homogène.

Nous avons réussi à représenter la nappe souterraine actuelle dans des conditions surpre-

nantes. La coïncidence des lignes phréatiques obtenues sur le modèle et celles qui ont été relevées *in situ* est quasiment parfaite, les écarts ne dépassant guère les erreurs de mesure, sauf au voisinage immédiat de la limite aval du modèle. La figure 3 en montre un exemple. Nous avons

FIG. 3

ainsi représenté sur le modèle quatre états différents de la nappe correspondant à des relevés faits à Serre-Ponçon.

À la suite de ces essais, nous avons pu conclure définitivement que les alluvions étaient « homogènes dans la masse ». Le profil de la nappe est uniquement conditionné par la forme de la vallée rocheuse. En particulier, la plongée de celle-ci au droit de l'étroit du Serre de Monge s'explique par le rétrécissement des sections d'écoulement. Rien, dans les relevés faits *in situ*, ne permet de déceler une hétérogénéité d'ensemble ou une action quelconque d'un système de circulations privilégiées.

L'étude de ces circulations n'avait cependant pas été abandonnée. Avant de relater les essais qui nous ont finalement permis de nous faire une idée de leur importance, nous rappellerons succinctement les phénomènes qui ont été à l'origine de l'hypothèse de leur existence.

Il y a, en premier lieu, l'inondation de la galerie de reconnaissance en 1913. Cette galerie a été amorcée à la cote 613 au fond d'un puits vertical implanté sur la rive droite de la Durance. On estimait, à l'époque, qu'elle devait passer en

dessous du point le plus bas de la vallée souterraine. Au cours des 70 premiers mètres, elle reste effectivement dans du rocher compact, très faiblement diaclasé. A l'abscisse 71, une fissure de plafond débite 20 l/s d'eau thermique à 47°. A partir de là, la roche présente diverses fissures avec dépôts de marne noire et de nombreux suintements puis, à 75 m du puits, c'est l'inondation brutale par une venue d'eau estimée à 500 l/s.

En 1950, diverses anomalies ont été observées lors d'un essai de pompage dans le puits de 1913. Il a été notamment constaté que le sondage incliné D''V situé dans le rocher sur la rive opposée de la Durance réagissait avec une rapidité et une amplitude anormale. Le rapport Solétanche, qui rend compte de ces essais, fait remarquer que ce sondage est en communication directe avec les fissures du rocher et suggère ainsi une communication possible, par l'intermédiaire de ces fissures, entre le D''V et le puits 1913. Il suffit de regarder la figure 4, qui donne la disposition en plan et en coupe du puits et de la galerie de 1913 ainsi que du sondage D''V, pour comprendre que s'il existait réellement une telle communication court-circuitant pour ainsi dire la vallée et passant notamment en dessous du profond sillon en coup de sabre qui sépare les deux rives, beaucoup de craintes étaient justifiées. En particulier, rien n'interdisait plus d'imaginer des systèmes importants de fissures ouvertes, contournant purement et simplement la coupure souterraine du barrage.

L'injection d'un colorant, de l'éosine, dans le sondage D''V ne donna pas de résultats, aucune trace de ce produit n'ayant pu être détectée dans le puits 1913, après plus d'une semaine de pompage. A la suite de cet échec, les techniciens de la Société Solétanche proposèrent de remplacer l'éosine par des traceurs radioactifs. C'est ainsi que fut réalisée, dans la semaine du 16 au 23 septembre 1952, l'opération d'injection d'isotopes radioactifs dans le sondage D''V.

Nous n'insisterons pas sur la réalisation de cet important essai, au sujet duquel on trouvera des détails dans la communication de M. HOURS et nous nous contenterons des précisions suivantes. L'échec de l'injection d'éosine était dû, ainsi que des essais en laboratoire l'ont montré par la suite, à l'adsorption de cette substance sur les alluvions de Serre-Ponçon. Les ingénieurs de l'Energie Atomique se sont donc efforcés de choisir des isotopes qui subissent le moins possible cette adsorption (Br.⁸² et I¹³¹). L'activité maximum est apparue dans le puits 1913 environ 60 heures après l'injection.

Ce temps de parcours correspond à un cheminement dans les alluvions sur une distance de 60 à 20 mètres, suivant l'hypothèse faite quant à la perméabilité (10^{-1} ou 10^{-2} cm/s). La forme

FIG. 4

de la courbe d'activité montrait qu'il y avait encore une rétention importante, ce qui exclut l'hypothèse d'un circuit hydraulique ne comportant que des fissures ouvertes.

Nous en avons déduit que les fissures du rocher recoupées par le sondage D''V n'étaient pas en communication directe avec la galerie 1913, mais débouchaient très vraisemblablement sur les parois du sillon. Les systèmes de fissures sont donc purement locaux et l'hypothèse d'un système général de circulations privilégiées semble à exclure. La réaction du sondage D''V à un pompage dans le puits 1913 et les autres anomalies de même nature qui ont été observées s'expliquent alors par la structure feuilletée de la masse alluviale qui peut donner lieu à des nappes localement en charge, ainsi que cela a été effectivement observé au cours de l'étude de la nappe actuelle.

Abandonnant l'hypothèse des circulations privilégiées, nous avons reconsidéré l'accident survenu en 1913. On sait maintenant que l'extrémité de la galerie avait atteint la zone limite rocher-alluvion. Il est donc logique d'expliquer son inondation par l'irruption de l'eau de la

nappe. Dans cette hypothèse, l'extrémité de la galerie aurait fonctionné comme un drain soumis à quelque 50 mètres en charge. En ne supposant l'existence dans la zone de contact que d'un système très local de fissures permettant d'assimiler l'extrémité de la galerie à une poche filtrante hémisphérique de 2 m de rayon, on peut calculer le débit qui, pour une perméabilité de 10^{-1} cm/s, est de 630 l/s. Ce chiffre coïncide bien avec le débit d'inondation de la galerie. Il ne paraît donc nullement nécessaire de maintenir l'hypothèse des écoulements privilégiés pour expliquer l'incident de 1913.

Ceci n'exclut pas la possibilité d'écoulements dans des fissures du rocher. Le percement de la galerie en 1913 a bien montré que de tels écoulements existaient. Les eaux thermales, dont la présence au fond du sillon est reconnue, ne sauraient d'ailleurs avoir d'autre origine que les diaclases du rocher. Mais l'importance de ces circulations est faible par rapport à l'écoulement dans les alluvions. Dans la galerie de 1913, le débit d'eau thermique n'était que de 20 l/s, alors que le débit provenant, selon toutes les apparences des alluvions, a été, à conditions de charge égales, de l'ordre de 500 l/s.

L'ÉTUDE DE LA SÉCURITÉ DE LA DIGUE

L'action de l'eau interstitielle sur la stabilité d'un massif de terre présente deux aspects qui sont d'ailleurs liés; d'une part, l'eau intervient par ses gradients de pression qui se superposent en quelque sorte aux forces massiques, d'autre part, il ne faut tenir compte que de la « pression effective » (pression totale diminuée de la pression de l'eau interstitielle) dans le calcul de la résistance au glissement. Parmi toutes les méthodes existantes d'analyse de la stabilité des ouvrages en terre, l'Équipement n'a retenu que celles qui tiennent compte des pressions de l'eau interstitielle.

Pour les appliquer à Serre-Ponçon, il fallait donc connaître la répartition des pressions dans la digue et les alluvions sousjacentes. Notre rôle était de fournir ces données à la Région d'Équipement.

Toutes les méthodes actuellement connues d'analyse de la stabilité d'une digue ne concernent que des états de contraintes plans. Il était donc logique de ramener à deux dimensions seulement les écoulements de filtration étudiés. Dans ces conditions, les méthodes d'analogie électrique devaient nous fournir des résultats beaucoup plus rapidement que le modèle hydraulique. Nous avons utilisé un réseau de résistances. Celui-ci permettait de tenir compte très facilement des

zones de perméabilité différentes. La théorie des réseaux a été exposée par M. HUARD DE LA MARRE dans une Communication faite à la S.H.F. en 1952 (*). Nous n'y reviendrons pas. La figure 5 montre, à titre d'exemple, l'un des résultats obtenus. Il est relatif à l'écoulement à retenue pleine. On remarquera que le rétrécissement du sillon a été représenté par une zone de perméabilité plus faible. Des essais correspondants, faits sur le modèle hydraulique, tenaient compte de la troisième dimension: ils confirmaient qualitativement ceux du réseau.

En vue de l'analyse de la stabilité de la recharge amont de la digue, nous avons dû étudier également l'écoulement variable, qui a lieu dans la recharge amont, au cours d'une vidange de la retenue.

En effet, il s'établit, au cours d'une vidange, un décalage entre la ligne de saturation dans la digue et le plan d'eau de la retenue. Ce décalage, qui est d'autant plus important que la perméabilité est plus faible, provoque une « poussée au vide » qui peut être fatale pour la

(*) P. HUARD DE LA MARRE. — « Nouvelle méthodes pour le calcul expérimental des écoulements dans les massifs poreux. » *La Houille Blanche*, n° A/1953.

FIG. 5

tenue du talus. L'écoulement le plus dangereux s'établit en fin de vidange.

La détermination des positions successives de la surface libre dans la recharge aval, dont dépend finalement l'écoulement en fin de vidange, a pu être faite à l'aide du réseau électrique grâce au succès d'une étude générale que nous avons entreprise depuis quelque temps déjà en collaboration avec M. HUARD DE LA MARRE de l'Institut Blaise-Pascal. La méthode utilisée a fait l'objet d'une Communication antérieure (*). La

(*) G. SCHNEEBELI et P. HUARD DE LA MARRE. « Nouvelles méthodes de calcul pratique des écoulements de filtration non permanents en surface libre. » Mémoire présenté au Comité technique le 19/3/1953. *La Houille Blanche*, n° B/1953.

figure 6 montre, à titre d'exemple, les surfaces libres successives et l'écoulement obtenu en fin d'une vidange totale en 27 jours. L'originalité de la méthode utilisée et le fait que Serre-Ponçon était sa première application, nous ont incité à doubler, pour l'un des cas envisagés, les calculs analogiques par un essai sur modèle hydraulique. Nous y reviendrons ultérieurement.

En ce qui concerne l'aménagement général de la digue, les études faites au moyen du réseau de résistances nous ont permis de montrer l'inutilité d'un tapis étanche amont. Ce tapis, qui représente une solution classique pour la réduction du débit d'infiltration et des sous-pressions, est pratiquement sans effet dans le cas où il existe en outre une coupure verticale descendue

FIG. 6

jusqu'au sillon (cote 600). De plus, il est un élément défavorable au cours d'une vidange, car il empêche l'essorage de la recharge amont par sa

base. Enfin, ce tapis, réalisé en matériaux argileux, risquait de donner naissance à un plan de glissement privilégié.

L'ÉTUDE DE LA COUPURE

Les études de stabilité effectuées par l'Équipement, compte tenu des résultats obtenus au réseau électrique, ont montré que la sécurité du barrage était assurée par une coupure par injections descendue jusqu'à la cote 600, c'est-à-dire jusqu'au rétrécissement de la vallée souterraine. Il restait cependant à vérifier si des considérations économiques ne pouvaient pas justifier une coupure totale.

Pour cela, il était nécessaire d'évaluer avec précision l'incidence sur le débit de fuite de la profondeur de la coupure.

Des essais réalisés dans ce but sur le modèle hydraulique ont donné des résultats déconcertants : le débit de fuite était plus important pour une coupure plus profonde ! L'explication en est que la perméabilité du modèle subit, d'un essai à l'autre, des variations non négligeables dues au colmatage et au tassement. Devant cette insuffisance du modèle hydraulique, nous avons eu recours, une fois de plus, à l'analogie électrique.

Cette fois-ci, il s'agissait de reproduire un écoulement à trois dimensions. Nous avons adopté la méthode de la cuve électrique. La forme de la vallée rocheuse a été reproduite au 1/1.000 en stratifié de résine synthétique. On réalisait ainsi une cuve étanche et isolante. Le conducteur était de l'eau de la distribution urbaine, sans aucune addition (sa résistivité, environ 2.600 Ω cm, est d'un ordre de grandeur convenant parfaitement).

Un artifice du montage expérimental mérite d'être signalé. Le choix d'un conducteur liquide entraînait quelques difficultés, sa surface supérieure étant forcément un plan horizontal. À l'aval de la coupure ceci ne présentait pas d'inconvénients, car nous savions *a priori* que la recharge aval serait pratiquement à sec. À l'amont, par contre, il fallait représenter la recharge de la digue qui est complètement saturée. Nous l'avons fait au moyen d'une petite cuve auxiliaire qui était reliée à la cuve principale par un pavage d'électrodes. Un tel pavage n'introduit que des perturbations absolument négligeables s'il est bien conçu et surtout s'il se trouve dans une zone de gradients faible, ce qui était le cas. La figure 7 montre le principe de ce montage. La figure 8 donne une vue d'ensemble du modèle électrique. On remarquera, appliqué sur la cuve principale, le pavage d'électrodes qui est relié à la cuve auxiliaire par un paquet de fils.

Le débit de fuite est directement proportionnel à la perméabilité des alluvions. Or, ainsi que nous l'avons dit précédemment, cette perméabilité est assez mal connue. Il faut donc considérer le quotient Q/K que l'on pourrait appeler « débit géométrique » puisqu'il s'exprime en m^2 ou en cm^2 et ne dépend que de la forme géométrique et des conditions aux limites de l'écoulement. On l'obtient à l'aide du modèle électrique à partir de mesures de résistance entre électrodes et de la résistivité de l'eau des cuves.

Fig. 7

Nous avons réalisé toute une série d'essais pour des profondeurs p différentes du rideau d'injection. Celui-ci était supposé parfaitement étanche. Nous avons également fait varier, indépendamment de la profondeur de la coupure, la section S de l'ouverture subsistant sous la coupure. Tous les résultats obtenus peuvent se mettre sous la forme :

$$\frac{Q}{K} = f \left(\frac{\sqrt{S}}{p} \right)$$

(voir fig. 9). Nous avons considéré le cas où il existerait un tapis filtrant sous la recharge aval et le cas où ce filtre serait supprimé.

Pour le cas d'une coupure totale, nous avons

FIG. 8

étudié l'incidence sur Q/K du rapport de la perméabilité des alluvions injectées, à la perméabilité des alluvions en place. Malheureusement, la

place manque ici pour entrer dans le détail de toutes ces études.

Du point de vue pratique, nous avons pu conclure qu'un approfondissement du dispositif de la coupure entraînait un gain sur le débit qui augmente d'autant plus rapidement avec la surface supplémentaire d'écran injectée que la coupure est plus profonde. Ce gain croît évidemment avec la perméabilité K des alluvions. Ces conclusions ne sont valables que si la perméabilité des alluvions injectées ne dépasse pas le $1/500$ de la perméabilité du terrain en place. Il ne paraît pas intéressant, par ailleurs, d'augmenter beaucoup au-delà de ce chiffre l'étanchéité du rideau. Les perméabilités obtenues sur les plots d'essais réalisés à Serre-Ponçon sont comprises entre $K/500$ et $K/1.000$. Elle correspondent donc à des valeurs optima pour la réalisation d'une coupure totale. D'un autre côté, les essais ont montré qu'il était possible de réduire considérablement le dispositif de drainage à l'aval et de remplacer le tapis filtrant par un drain assez local au pied de la digue.

FIG. 9

LE MODÈLE HYDRAULIQUE, INSTRUMENT DE RECHERCHE

Avant de faire la comparaison des études sur modèle hydraulique avec les études par analogie électrique, nous montrerons rapidement un autre

aspect, moins immédiatement utilitaire, de l'expérimentation sur modèle.

Le modèle hydraulique est un instrument im-

parfait et délicat à manier. La similitude, qui est basée sur des lois théoriques impliquant notamment l'homogénéité du remplissage et l'absence d'effets de capillarité que l'on ne peut pas en général représenter à l'échelle, est rarement réalisée de façon rigoureuse.

Ressemblant au prototype par ses imperfections mêmes, le modèle demande à l'expérimentateur un constant effort d'analyse et d'interprétation des phénomènes observés.

Il n'est pas étonnant, dans ces conditions, qu'une étude sur modèle conduise parfois à des résultats d'ordre général, sans rapport direct avec l'étude particulière que l'on a entreprise.

C'est ainsi qu'au cours d'études préliminaires qui devaient nous permettre de mettre au point les techniques expérimentales pour le modèle de Serre-Ponçon, nous avons été amené à étudier l'effet de la capillarité sur un écoulement à surface libre et à échaffauder une théorie simple du siphon capillaire. Nous en donnerons un exposé succinct ci-dessous.

La surface libre, dans un milieu poreux, est constituée par une infinité de petits ménisques qui se forment entre les grains. Or, on sait qu'à travers chaque ménisque il y a une discontinuité de pression. En effet, au-dessus du ménisque la pression est nulle (pression atmosphérique), alors qu'immédiatement en dessous elle est négative si le liquide mouille les parois solides. Cette « pression capillaire » dépend du rayon de courbure, c'est-à-dire en fin de compte des dimensions du ménisque (loi de Laplace). La pression capillaire négative correspond à « l'ascension capillaire » (loi de Jurin). Il existe, dans le milieu poreux, des ménisques de dimensions variées, ce qui fait que la surface libre réelle présente une configuration chaotique. Pour une théorie approchée cependant, on peut lui substituer une surface libre fictive, à travers laquelle existe une discontinuité de pression moyenne correspondant à « l'ascension capillaire moyenne » de l'eau dans le sol :

$$p_c = -\bar{\omega} \zeta$$

Cette discontinuité modifie la condition à la limite imposée à la charge $\varphi = p/\bar{\omega} + z$ sur cette surface.

On sait que dans le cas où la capillarité est négligeable, cette condition est double :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$$

traduit le fait que la surface libre n'est traversée par aucun débit (nous sommes en régime permanent) et qu'elle est donc surface de courant.

$$\varphi = z \quad \text{ou} \quad p = 0$$

est la condition physique exprimant que la pression est atmosphérique.

Dans le cas où la capillarité agit, il paraît évident que la pression à prendre en compte pour écrire la seconde condition est non pas la pression atmosphérique régnant au-dessus des ménisques, mais la pression négative $-p_c$ existant juste en dessous, du côté de l'écoulement. On a donc :

$$\varphi = z - \zeta \quad \text{ou} \quad p = -p_c$$

Nous avons reproduit, sur la figure 10, le schéma des conditions aux limites imposées à l'écoulement à travers un massif rectangulaire. La surface libre est située au-dessus de la ligne de pression atmosphérique qui se raccorde à l'amont au niveau d'eau et recoupe le parement aval au point E (EF étant le segment de suintement bien connu). Sur les surfaces BC et DE nous avons indiqué la condition :

FIG. 10

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$$

En effet, l'eau ne peut sortir à travers une paroi du massif que si la pression régnant sur la surface est atmosphérique. En des points où $-p_c \leq p < 0$, aucun débit à travers la paroi n'est possible. Ceci est précisément le cas des segments BC et ED de la figure 10. Ces segments se comportent comme de véritables surfaces imperméables formées par des ménisques plus ou moins déformés accrochés à l'extrémité des canaux capillaires.

Nous avons traité par la méthode de l'analogie électrique l'écoulement schématisé sur la figure 10. Le résultat, ainsi que celui que l'on obtient en l'absence de capillarité, est donné par la figure 11. On constate que la surface de pression atmosphérique est traversée par des lignes de courant.

Ce résultat (*) s'accorde fort bien avec les observations que nous avons faites sur un modèle hydraulique et dont nous recherchions l'explica-

d'encre de Chine, recoupe en deux points la surface de pression atmosphérique que nous avons tracée en retouche sur la photographie. Il

FIG. 11

tion. La figure 12 montre en effet que la ligne de courant supérieure, visualisée par une injection

(*) Nous venons de prendre connaissance, au moment où nous rédigeons ce mémoire, des expériences de M. Andréa Russo SPENA, qui confirment parfaitement notre théorie (voir l'*Energia Elettrica* de décembre 1954).

est à remarquer que le « siphon capillaire » augmente sensiblement le débit. Dans le cas traité (fig. 11), le facteur de débit $q/K(h_1 - h_2)$ passe de 0,128 (en l'absence d'effet capillaire) à 0,173 pour $\zeta = H_1/4$.

Par ailleurs, l'épaisseur de la « frange capil-

FIG. 12

laire » n'est pas constante en raison de l'écoulement dont elle est le siège ($\overline{CB} < \zeta$ et $\overline{DE} > \zeta$).

Un deuxième résultat que nous voudrions mentionner concerne notre méthode pour le calcul des écoulements variables. Nous en avons exposé le principe, avec M. HUARD DE LA MARRE, voici exactement deux ans. Nos travaux n'étaient alors pas suffisamment avancés pour que nous ayons pu comparer avec l'expérience les résultats obtenus. Ceci a été fait depuis. Nous avons reproduit, sur un modèle hydraulique à deux dimensions, le cas de la vidange en 100 jours de la retenue de Serre-Ponçon. La digue comportait un tapis étanche amont, ce qui isolait pratiquement l'écoulement dans la recharge et nous a permis de ne représenter que celle-ci sur le modèle. Le résultat de cette confrontation est donné par la figure 13. Nous avons reproduit en traits pleins les surfaces libres obtenues par le calcul analogique et en trait brisé les surfaces libres obtenues sur le modèle. On voit que la concordance est excellente. Les petites différences que

l'on relève peuvent d'ailleurs s'expliquer par une légère hétérogénéité du modèle hydraulique. En effet, le sable était inévitablement moins tassé au voisinage du talus. La perméabilité y était donc

FIG. 13

un peu plus forte, ce qui explique que le long de chaque verticale de mesure la surface libre baissait d'abord un peu trop vite.

COMPARAISON DES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ÉTUDE ET CONCLUSIONS

Si nous faisons le bilan des études effectuées et si en particulier nous comparons les études sur modèle aux études par analogie électrique, nous devons admettre que ces dernières ont donné un plus grand nombre de résultats directement utilisables.

Dans tous les cas d'écoulements à deux dimensions, les analogies électriques ont, par rapport aux modèles, une supériorité incontestable; elles permettent toujours une représentation précise des hypothèses relatives à la perméabilité, tandis que l'on ne peut jamais être sûr de celle du remplissage d'un modèle. Les modèles hydrauliques sont en particulier tout à fait impropres à l'étude des débits, ainsi que l'expérience nous l'a montré.

Un autre avantage considérable des modèles électriques est la petite échelle compatible avec la précision des mesures. Un modèle hydraulique, par contre, nécessite une échelle beaucoup plus grande, qui le rend d'un maniement extrêmement lourd. Pour apprécier cette différence, il suffit de comparer les photographies de la figure 14 qui montrent respectivement le modèle de Serre-Ponçon avant son remplissage et en cours de fonctionnement, à celle de la figure 8 montrant le modèle électrique. Dans l'espace

FIG. 14 a. — Modèle de Serre-Ponçon avant son remplissage.

d'un mois nous avons réalisé, sur la petite cuve électrique, plus de 16 essais différents, alors que dans le même temps il n'était pas possible d'en faire plus de deux sur le modèle hydraulique.

L'analogie électrique semble donc être le moyen idéal *d'étude*. Il reste à la développer dans le domaine des écoulements à trois dimen-

ses imperfections, conduit à réfléchir (nous l'avons vu à propos de l'étude sur l'action de la capillarité). Il reste donc un instrument de *recherche* irremplaçable.

Pour terminer, nous insisterons sur le fait que les études en laboratoire doivent s'appuyer sur une bonne connaissance des conditions *in situ*.

FIG. 14 b. — Modèle de Serre-Ponçon en eau.

sions. Le petit modèle électrique de Serre-Ponçon peut être considéré comme un pas intéressant dans cette direction. Il subsiste encore quelques difficultés, notamment pour la représentation des surfaces libres. Nous ferons cependant confiance, pour notre part, aux spécialistes des analogies électriques qui se sont attaqués à ces problèmes.

Le modèle hydraulique, par le fait même de

Seuls des essais effectués sur place et une campagne de reconnaissance comportant des mesures nombreuses et soignées de la perméabilité peuvent fournir les données de base nécessaires. Cette détermination de la perméabilité est particulièrement importante. Dans certains cas, l'influence des caractéristiques du terrain peut être plus grande encore que celle de la topographie souterraine.

DISCUSSION

Commentaire de M. GIGUET, Président de séance

M. le Président félicite et remercie M. SCHNEEBELI de son exposé. Il ajoute que les travaux du Service des Etudes et Recherches Hydrauliques ont été du plus grand secours pour la Direction de l'Équipement d'E.D.F., pendant la période des essais et de la préparation du projet de Serre-Ponçon; les décisions prises au sujet du diaphragme d'étanchéité résultent de la combinaison des

renseignements numériques fournis par le Service E.R.H. avec des données économiques qui se dégageaient de la situation du marché des entreprises. C'est donc en plein dans le réel que les travaux de recherches faisant l'objet de la communication de M. SCHNEEBELI ont été poursuivis.