

**TRANSMISSION
DES ONDES DE CRUE DU
VERDON
A TRAVERS LE MASSIF D'APPUI
RIVE DROITE DU FUTUR
BARRAGE
DE SAINTE-CROIX**

PAR J.-C. GARNIER * ET Mlle CL. CLARION **

Introduction

A la sortie de son célèbre cañon, le Verdon s'étale dans une vaste cuvette, la cuvette de Sainte-Croix; puis il s'enfonce dans de nouvelles gorges dites basses gorges du Verdon, ou gorges de Baudinard.

Il s'agit là d'un site tout à fait exceptionnel pour la constitution d'une grande retenue. Un barrage de 100 m de hauteur établi dans les basses gorges permettrait d'emmagasiner plus de 1,3 milliard de mètres cubes d'eau.

Aussi ce site attira-t-il très tôt l'attention des projecteurs. Dès 1863, les Ponts et Chaussées d'Aix-en-Provence envisagèrent d'y créer une retenue destinée à faciliter l'exploitation du canal du Verdon et à atténuer les pénuries d'eau en basse Durance pendant les périodes d'étiage. Il ne s'agissait d'ailleurs encore que d'un réservoir relativement modeste de 130 millions de mètres cubes contenus par un barrage en maçonnerie de 32 m de hauteur.

Ce projet subit de nombreuses vicissitudes : abandonné en 1865, repris en 1896, il était à nouveau abandonné au profit d'autres ouvrages prévus plus à l'amont sur le Verdon et ses affluents et d'un captage de la très grosse résurgence de Fontaine-l'Évêque qui jaillit dans la cuvette de Sainte-Croix.

Ce n'est qu'après le vote de la loi de 1923 relative au développement des irrigations en Provence que les sociétés chargées de l'aménagement du Verdon reprirent l'ancien projet de Sainte-Croix. Elles proposèrent des solutions plus ambitieuses de 70, 80 et même 110 m de hauteur, la retenue noyant alors le village des Salles et remontant vers l'amont jusque dans le fond du grand cañon.

Le site se prêtait fort bien à cette surélévation du projet initial. Mais, simultanément, apparaissait un problème qui ne se posait pas avec la même acuité pour des barrages de faible hauteur : celui de l'étanchéité de la cuvette.

Sur la majeure partie de son périmètre, en particulier sur la rive droite, les berges de la cuvette sont formées par des terrains réputés imperméables du tertiaire (essentiellement poudingues de Valensole) et du crétacé.

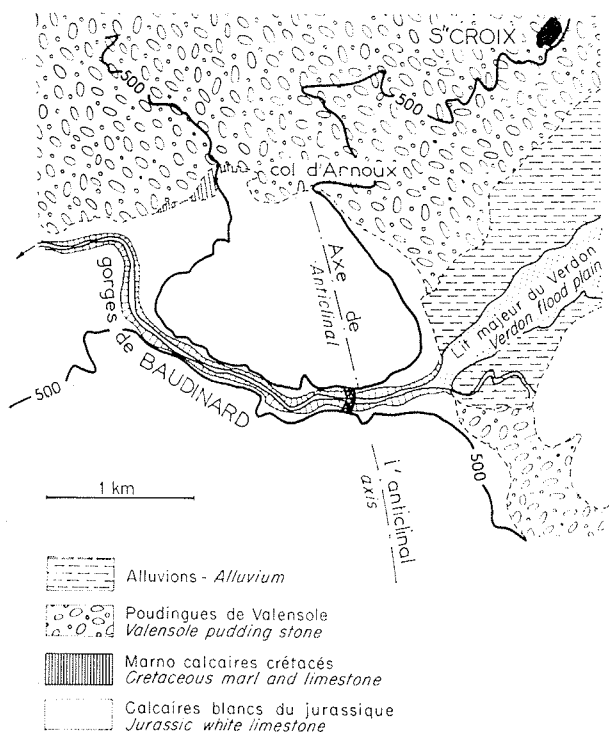
Le danger provient des calcaires jurassiques qui affleurent largement dans la zone du barrage et plus à l'amont sur la rive gauche du Verdon.

Nous ne traiterons pas ici de la question de l'étanchéité générale de la cuvette, qui est liée à la présence de circulations karstiques de grande envergure dans les plateaux calcaires qui viennent affleurer sur la rive gauche de la retenue. Disons simplement que cette question a fait l'objet de nombreuses recherches depuis 1926, et que les méthodes utilisées ont été celles de la géologie, de la morphologie, de la spéléologie et de l'hydrologie.

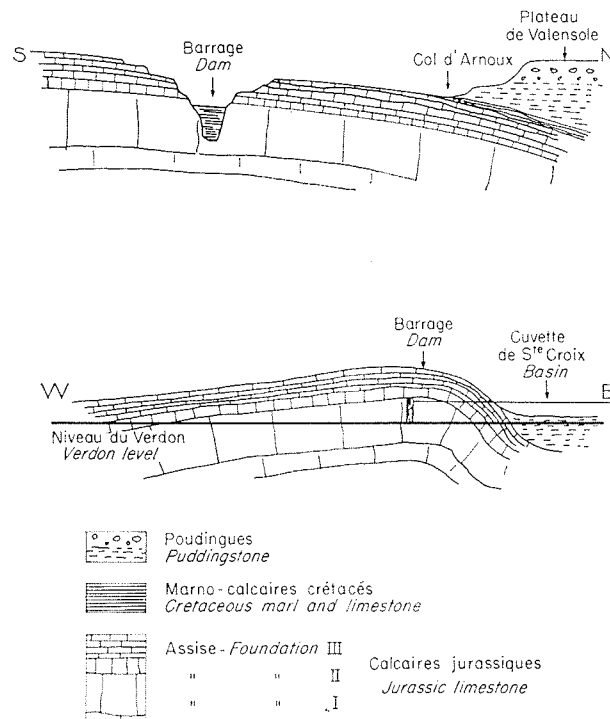
La présente étude a été réalisée dans le cadre des recherches sur la perméabilité des calcaires dans la zone du barrage. Il s'agit d'une étude déjà relativement ancienne, puisqu'elle date de 1955-1956, effectuée à la demande de la Région d'Équipement Hydraulique Alpes III. Elle offre cependant

* Ingénieur au Service Géologique et Géotechnique de E.D.F.

** Professeur à la Faculté des Sciences, Institut de Mécanique des Fluides de Marseille.



1/ Carte géologique simplifiée de la zone du barrage.
Simplified geological map of the dam area.



2/ Coupes longitudinale (nord-sud) et transversale (est-ouest) de l'anticlinal de Baudinard.
Longitudinal and transversal cross-sections of Baudinard anticlinal.

un regain d'intérêt, par suite de la reprise récente, et avec des moyens importants, des reconnaissances dans la zone du barrage.

Cette étude s'applique à un milieu fissuré. On notera cependant dès à présent que les formules utilisées sont celles des milieux poreux. L'aquifère a été supposé homogène et isotrope à grande échelle, les écoulements satisfaisant à la loi de Darcy. Justification de cette hypothèse sera donnée dans le cours de l'exposé.

Description géologique sommaire

La carte schématique de la figure 1 et les coupes de la figure 2 montrent quelles sont les conditions géologiques d'implantation de l'ouvrage.

Les gorges par lesquelles le Verdon s'échappe de la cuvette sont taillées dans un gros anticlinal de calcaire jurassique orienté Nord-Sud.

L'anticlinal n'est ni horizontal (il plonge assez fortement vers le Nord où il s'ennoie sous les poudingues de Valensole), ni symétrique (son flanc Ouest pend doucement vers l'aval tandis que son flanc Est plonge brusquement vers la cuvette).

Les calcaires jurassiques étant très épais, la gorge n'en recoupe que la partie supérieure où l'on distingue trois assises numérotées de la plus basse à la plus haute par les chiffres I à III.

L'assise inférieure (assise I) apparaît dans le cœur de l'anticlinal. Elle est constituée par un calcaire particulièrement massif et compact, non stratifié, alors que les assises supérieures (II et III) sont plus litées.

Epaisseur des différentes assises :

- assise III : 150 m ;
- assise II : 40 m ;
- assise I : plus de 100 m visibles dans la gorge. Sa base n'est connue que par les sondages.

Dans l'assise inférieure, on ne voit pas de véritables grottes, mais seulement de grandes baumes résultant de l'érosion latérale du Verdon lors de son enfoncement.

Par contre, de nombreuses grottes s'ouvrent dans la retombée aval de l'anticlinal, le long de l'assise II et à la base de l'assise III. Peu profondes, elles ne représentent vraisemblablement pas le débouché de réseaux lointains anastomosés. Il convenait cependant de s'en écarter.

Comme la gorge, longue de plusieurs kilomètres, présente un certain nombre de rétrécissements notables, on pouvait hésiter sur le choix du lieu d'implantation du barrage. Le choix s'est porté sur la région axiale de l'anticlinal, à 500 m à l'aval de l'entrée des gorges, où l'on bénéficie :

- de conditions topographiques favorables ;
- d'un massif d'appui très homogène sur toute sa hauteur, et très peu karstifié ;
- d'une situation telle que toutes les grottes connues se trouvent à l'aval de l'ouvrage.

Fracturation.

On peut distinguer dans le massif calcaire de Sainte-Croix trois échelles superposées de fracturation :

- fracturation à l'échelle du bloc (1 cm à 1 m) ;

- fracturation à l'échelle du banc (1 m à 10 m);
- cassures maîtresses recoupant toute la série.

Les cassures maîtresses, assez peu nombreuses (maille décimétrique à hectométrique), ne sont bien visibles que dans la gorge où elles semblent être perpendiculaires à celle-ci. L'orientation Nord-Sud des accidents principaux est confirmée par l'examen des photographies aériennes.

La fracturation à l'échelle métrique ou décimétrique, très uniforme dans les assises supérieures, semble avoir une répartition beaucoup plus erratique dans l'assise I non litée.

Quant à la fracturation fine, elle peut être considérée comme très générale, bien que les sondages aient donné sur des passées relativement longues de très belles carottes.

Toutes ces fractures sont bien visibles en surface, par suite de la décompression et de l'altération. En profondeur elles sont assez fréquemment fermées ou simplement présentes à l'état potentiel.

Il convient cependant de remarquer que les déformations tectoniques de l'anticlinal, qui datent de la fin du Tertiaire, se sont faites sous charge faible ou nulle. Il en est résulté de nombreuses fractures de distension qui ont pu rester béantes au milieu des calcaires; ce qui expliquerait que des perméabilités non négligeables aient été enregistrées jusqu'à de grandes profondeurs.

Karstification.

Nous avons vu que les grottes ne sont réparties que dans l'assise II et l'assise III et qu'elles ne s'étendent probablement pas très loin dans le massif. Cela ne veut pas dire que l'assise I est exempte de toute karstification.

Les galeries de reconnaissance, réalisées dans cette assise, 30 m au-dessus du Verdon, ont recoupé quelques « trous de rats » et une « poche », *colmatée également*, marquant vraisemblablement l'élargissement d'un de ces « trous de rats ».

Les sondages ont rencontré aussi des passées argileuses de faible longueur ou des zones de fractures remplies d'argile se traduisant par la remontée d'eaux rouges ou ocres au moment de la foration.

Tous ces indices montrent l'existence d'une karstification, apparemment de faible ampleur, consistant la plupart du temps en un léger élargissement des fissures de la roche, certaines de ces fissures étant entièrement colmatées, d'autres donnant lieu au contraire à des « pertes totales » ou à de fortes absorptions.

Reconnaissance des caractéristiques hydrauliques du massif

C'est le massif rive droite, moins élevé et plus accessible que celui de la rive gauche, qui a été le mieux étudié :

Quinze sondages y ont été réalisés successivement de 1945 à 1949 :

- trois à partir du fond de la gorge et profonds de 80 m;
- huit près du col d'Arnoux, dans la zone très fracturée de la flexure de la Fare, et descendant pour cinq d'entre eux jusqu'à 50 m sous le niveau du Verdon;
- quatre autres, enfin, répartis entre le barrage et le col d'Arnoux, tous arrêtés entre 40 et 60 m sous le niveau du Verdon.

La plupart de ces sondages ont fait l'objet d'essais d'eau type Lugeon systématiques par passes de 5 m au-dessous du niveau prévu pour la retenue.

Par la suite, une galerie de reconnaissance de 150 m de longueur ayant été forée 30 m au-dessus du fond de la gorge, la partie du massif située sous la galerie fut reconnue par trois nouveaux sondages qui donnèrent lieu aussi à des essais Lugeon.

Absorptions.

Pour les sondages implantés dans la zone fracturée de la flexure de la Fare, les absorptions ont été fortes, atteignant et dépassant souvent 15 unités Lugeon (1 u.L.=1 l/mn.m de forage sous 10 kg de pression), ce qui n'est pas surprenant.

Ailleurs, on pouvait s'attendre à ce que les absorptions soient fortes près de la surface karstifiée et de plus en plus faibles en allant vers la profondeur.

Si ces prévisions se sont montrées exactes pour la zone superficielle, les essais d'eau dans le cœur du massif ont révélé des absorptions extrêmement variables réparties de façon tout à fait erratique, certaines zones profondes situées à 80 m sous le niveau du Verdon ayant donné des absorptions importantes.

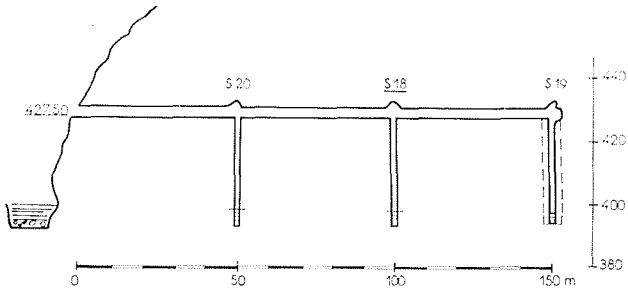
Les absorptions les plus fortes, toujours très localisées, correspondent certainement à la traversée d'une cassure ou d'un ensemble de fissures restées ouvertes au milieu des calcaires.

Dans l'ensemble on pouvait s'attendre à plus mauvais en haut et meilleur en bas. D'où alerte; ou du moins première incertitude quant à la perméabilité dans le cœur du massif.

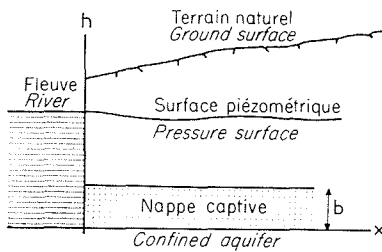
La « nappe du Verdon ».

Au cours des travaux de connaissance on a pu constater que le niveau de l'eau s'établissait généralement dans ces sondages au niveau du Verdon. Ce fait montre simplement que le réseau de fissures est en rapport avec le Verdon, ce qui n'est pas surprenant. On peut remarquer cependant que le S II est pratiquement étanche au niveau du Verdon. Il y a donc, même à ce niveau-là, des volumes rocheux parfaitement sains. Lorsqu'on envoie de l'eau dans le sondage, il se remplit et reste plein jusqu'à 30 m au-dessus du Verdon où la pointe d'absorption indique le passage d'une fissure par laquelle l'eau peut s'échapper.

Les essais Lugeon réalisés sous la nappe sont assimilables à des essais Lefranc. De ce fait ils permettent le calcul du coefficient de perméabilité, à condition bien sûr de supposer les écoulements régis par la loi de Darcy.



3/ Coupe en long de la galerie de reconnaissance rive droite.
Cross-section of the right-bank reconnaissance tunnel.



4/

Or, divers essais (notamment des essais d'injection de longue durée suivis de mesures de descente du niveau de l'eau), réalisés dans un sondage traversant la flexure de la Fare, montrèrent que, même dans cette zone particulièrement fracturée, les écoulements satisfont à la loi de Darcy.

Tous calculs faits, on constate que les perméabilités sont toujours inférieures à 10^{-6} m/s et souvent de l'ordre de 10^{-7} m/s, résultat peu conciliable en apparence avec l'horizontalité de la nappe dans les calcaires.

Fluctuations de la nappe.

Les mesures de niveau réalisées à la fin de l'exécution des différents forages n'ont pas été en général répétées dans le temps.

Les premiers renseignements sur les fluctuations de la nappe datent de janvier 1955, époque à laquelle ont commencé les relevés de niveaux dans les sondages S 18, 19, 20 forés à partir de la galerie de reconnaissance (fig. 3).

Là encore, on a pu constater que les niveaux de l'eau se fixaient sensiblement à la cote du Verdon, les variations du Verdon se répercutant elles-mêmes très nettement et très rapidement.

La contradiction entre les faibles valeurs de K données par les essais d'eau et cette grande vitesse de réaction de la nappe aux variations du Verdon, conduisit là encore à se demander si les mesures ponctuelles de K étaient bien représentatives de la perméabilité d'ensemble du massif.

Or, justement, ne tenait-on pas là le moyen d'appréhender par le calcul cette perméabilité d'ensemble? Plusieurs auteurs, à la suite de Jacob et de Ferris, avaient déjà utilisé les fluctuations produites par les variations d'un plan d'eau aux limites de la nappe pour calculer ce coefficient.

C'est dans ce but que furent installés au mois de mai 1955 des limnigraphes permettant l'enregistre-

ment continu des niveaux du Verdon et des hauteurs piézométriques dans les forages de la galerie.

Théorie et calculs

Le problème étant posé, on pensa d'abord pouvoir utiliser sans modification la théorie de Jacob et de Ferris sur la propagation d'une oscillation sinusoïdale au sein d'un milieu poreux (1950-1951).

Théorie de Jacob-Ferris.

Considérons une nappe captive d'épaisseur constante b , en communication avec un fleuve (fig. 4). La nappe est supposée semi-infinie dans la direction ox et le problème-plan.

La fonction $h = h(x, t)$ qui définit la surface piézométrique est solution de l'équation fondamentale suivante :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

bien connue des mathématiciens sous le nom d'équation de la chaleur, où :

S est le coefficient d'emmagasinement de la nappe (ou storativité);

T est le coefficient de transmission (ou transmissivité);

par définition $T = K \cdot b$, où K est le coefficient de perméabilité de l'aquifère.

Si la surface libre du fleuve varie en fonction du temps suivant une loi sinusoïdale, les conditions aux limites s'écrivent :

$$\begin{aligned} h &= h_0 \sin \frac{2\pi t}{t_0} & \text{pour } x = 0 \\ h &= 0 & \text{pour } x = \infty \end{aligned}$$

h est alors donnée par la formule :

$$h = h_0 e^{-x\sqrt{\frac{\pi S}{t_0 T}}} \sin \left(\frac{2\pi t}{t_0} - x \sqrt{\frac{\pi S}{t_0 T}} \right) \quad (2)$$

qui montre que le mouvement de la surface piézométrique à la distance x de la berge est un mouvement oscillatoire de période t_0 , déphasé par rapport au mouvement du fleuve de :

$$t_1 = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{t_0 S}{\pi T}} \quad (3)$$

et dont la demi-amplitude est donnée par :

$$h_1 = h_0 e^{-x\sqrt{\frac{\pi S}{t_0 T}}} \quad (4)$$

La mesure du temps t_1 et l'expression (3) donnent une valeur de S/T .

La mesure de h_1 et l'expression (4) permettent de calculer également S/T .

Ces équations, ne faisant intervenir que le rapport S/T , ne pourront donner à la fois S et T .

On notera que la théorie de Jacob basée sur l'équation de la chaleur n'est rigoureusement valable que pour une nappe artésienne horizontale d'épaisseur constante b communiquant avec la rivière sur toute sa hauteur.

Mais elle s'applique aussi, au cas des nappes libres pourvu qu'elles satisfassent à l'hypothèse de Dupuit (composantes verticales des vitesses négligeables et composantes horizontales constantes sur chaque verticale), ce qui est le cas ici.

Examen des graphiques d'enregistrement du Verdon.

L'analyse des limnigrammes (mai-décembre 1955) montre :

- a) que le mouvement de la surface libre du Verdon en fonction du temps ne peut à aucun moment être assimilé, même très vaguement, à un mouvement oscillatoire;
- b) le mouvement (qui est provoqué par les lachures des barrages de Castillon et de Chaudanne situés plus à l'amont) peut être, dans de nombreux cas, assimilé soit à une impulsion triangulaire, soit à une impulsion rectangulaire; ces impulsions pouvant être isolées ou en série (fig. 5).

Lorsque les conditions aux limites de la nappe ne varient pas sinusoidalement, on peut toujours décomposer la fonction définissant les variations, dans le temps, du plan d'eau en série de Fourier.

Le problème étant linéaire, l'effet global produit dans la nappe sera égal à la somme des effets produits par chaque composante élémentaire du développement en série.

En théorie, on se ramène ainsi facilement « au cas précédent ». En fait, dans la pratique, on se heurte rapidement à de sérieuses difficultés dès lors que l'on cherche à décomposer en série des fonctions non périodiques.

Dans ce cas, le calcul opérationnel permet de résoudre le problème avec élégance et avec une excellente approximation.

Le problème de la transmission des ondes de crues du Verdon a pu être traité de la sorte sans complication excessive.

Transformation de Carson (ou de Carson-Laplace).

Pour tout renseignement sur la transformation de Carson et ses applications, on se reportera à l'ouvrage de MM. Denis-Papin et Kaufmann cité en bibliographie. Nous n'en rappellerons ici que la définition et l'une des propriétés connue sous le nom de théorème du retard.

a) DÉFINITION.

Soit une fonction $h(t)$ telle que :

$$h(t) = 0 \quad \text{pour} \quad t < 0$$

on appelle transformée de Carson de $h(t)$ la fonction $H(p)$ donnée par l'expression suivante :

$$H(p) = p \int_0^{\infty} e^{-pt} h(t) dt$$

on écrit :

$$H(p) = \mathbf{L} h(t)$$

$$h(t) = \mathbf{L}^{-1} H(p)$$

notation non reconnue par l'AFNOR, mais utilisée internationalement, dans laquelle \mathbf{L} et \mathbf{L}^{-1} sont des symboles signifiant :

\mathbf{L} = « transformée de Carson de » ;

\mathbf{L}^{-1} = « transformée inverse de ».

b) THÉORÈME DU RETARD.

Si $H(p) = \mathbf{L} h(t)$:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}^{-1} e^{-\tau p} H(p) &= 0 && \text{pour } t < \tau \\ &= h(t - \tau) && \text{pour } t > \tau \end{aligned}$$

ce qui veut dire que (fig. 6) :

si $H(p)$ est la transformée de la fonction $h(t)$,

$e^{-\tau p} \cdot H(p)$ est la transformée de la fonction $h(t - \tau)$.

c) RÉSOLUTION DE L'ÉQUATION DE LA CHALEUR.

On considère maintenant la fonction $h(x, t)$ solution de l'équation :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} = 0$$

et satisfaisant aux conditions aux limites suivantes :

$$\begin{aligned} h(x, 0) &= 0 \\ h(0, t) &= \varphi(t) \text{ nulle pour } t < 0 \\ h(\infty, t) &= 0 \end{aligned}$$

$\varphi(t)$ est la fonction qui définit les variations du niveau de la rivière en fonction du temps.

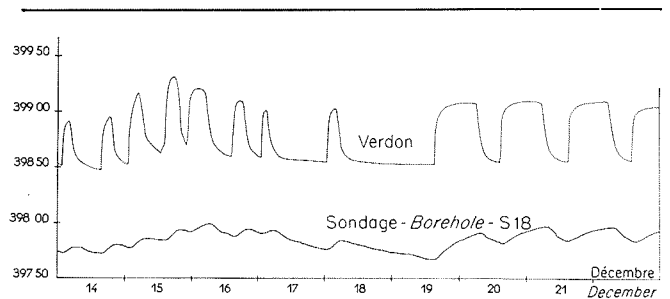
En posant :

$$\begin{aligned} H(x, p) &= \mathbf{L} h(x, t) \\ \Phi(p) &= \mathbf{L} \varphi(t) \end{aligned}$$

on montre facilement que :

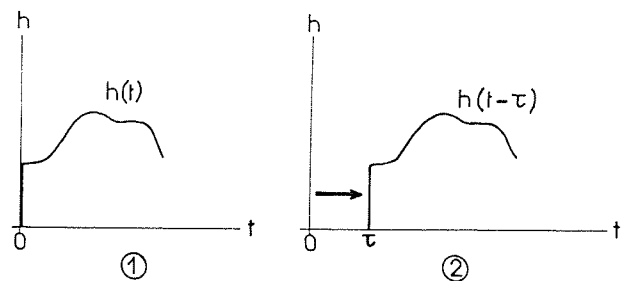
$$H(x, p) = \Phi(p) \cdot e^{-x\sqrt{pS/T}}$$

En conséquence, pour étudier les fluctuations de la



5/ Extrait des graphiques d'enregistrement des hauteurs d'eau dans le Verdon et le sondage S 18.

Extract from water level recordings in the Verdon and borehole S 18.



6/ Théorème du retard. Si $H(p)$ est la transformée de la fonction $h(t)$, $e^{-\tau p} H(p)$ est la transformée de la fonction $h(t - \tau)$.

Lag theory. If $H(p)$ is the transform of $h(t)$, $e^{-\tau p} H(p)$ is that of $h(t - \tau)$.

nappe, on déterminera la fonction $\varphi(t)$ et l'on cherchera sa transformée $\Phi(p)$; $h(x, t)$ sera la transformée inverse de $\Phi(p) \cdot e^{-x\sqrt{pST}}$.

Solutions obtenues pour divers types de conditions aux limites.

— *Premier cas* : échelon f (fig. 7) :

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= 0 && \text{pour } t < 0 \\ &= f && \text{pour } t \geq 0 \\ \Phi(p) &= f \end{aligned}$$

d'où l'expression de $H(x, p)$:

$$H(x, p) = f \cdot e^{-x\sqrt{pST}}$$

dont on trouve la transformée inverse dans les tables :

$$h(x, t) = f \operatorname{erfc} u \quad (5)$$

avec :

$$u = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t}}$$

$$\operatorname{erfc} u = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-\lambda^2} d\lambda$$

(fonction complémentaire de la fonction erreur).

— *Deuxième cas* : impulsion rectangulaire isolée (fig. 8) :

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= 0 && \text{pour } t < 0 \\ &= f && \text{pour } 0 < t < \alpha \\ &= 0 && \text{pour } t > \alpha \\ \Phi(p) &= f(1 - e^{-p\alpha}) \end{aligned}$$

$$H(p) = f [e^{-x\sqrt{pST}} - e^{-p\alpha} e^{-x\sqrt{pST}}]$$

La transformée inverse du premier terme est :

$$\operatorname{erfc} u_1 \quad \text{avec} \quad u_1 = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t}}$$

La transformée inverse du deuxième terme est (d'après le théorème du retard) :

zéro pour $t < \alpha$.

$$\operatorname{erfc} u_2 \quad \text{pour } t > \alpha \quad \text{avec} \quad u_2 = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t - \alpha}}$$

d'où l'expression de $h(x, t)$ dans chacun des intervalles :

$$\begin{aligned} 0 < t < \alpha & \quad h(x, t) = f \operatorname{erfc} u_1 && (6) \\ t > \alpha & \quad h(x, t) = f [\operatorname{erfc} u_1 - \operatorname{erfc} u_2] && (7) \end{aligned}$$

avec :

$$u_1 = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t}} \quad u_2 = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t - \alpha}}$$

— *Troisième cas* : impulsion triangulaire isolée (fig. 9) :

On pose :

$$\varphi(t) = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3$$

avec :

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) &= 0 && \text{pour } t < 0 \\ &= \frac{f}{\alpha} t && \text{pour } t > 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_2(t) &= 0 && \text{pour } t < \alpha \\ &= -\left(\frac{f}{\alpha} + \frac{f}{\beta}\right)(t - \alpha) && \text{pour } t > \alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_3(t) &= 0 && \text{pour } t < \alpha + \beta \\ &= \frac{f}{\beta}(t - |\alpha + \beta|) && \text{pour } t > \alpha + \beta \end{aligned}$$

$$\Phi(p) = \frac{f}{\alpha p} - \left(\frac{f}{\alpha} + \frac{f}{\beta}\right) \frac{e^{-p\alpha}}{p} + \frac{f}{\beta} \frac{e^{-p(\alpha+\beta)}}{p}$$

d'où l'expression de $h(x, t)$ dans chacun des intervalles :

$0 < t < \alpha$

$$h(x, t) = \frac{ft}{\alpha} \left[(1 + 2u_1^2) \operatorname{erfc} u_1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_1 e^{-u_1^2} \right] \quad (8)$$

$\alpha < t < \alpha + \beta$

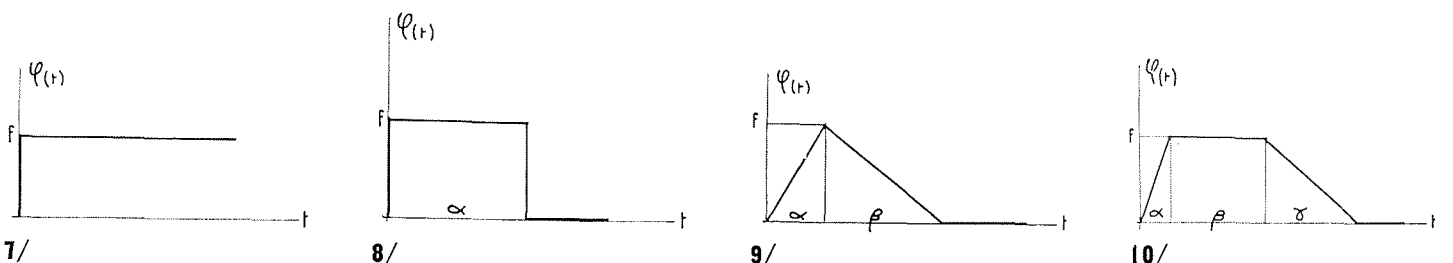
$$\begin{aligned} h(x, t) &= \frac{ft}{\alpha} \left[(1 + 2u_1^2) \operatorname{erfc} u_1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_1 e^{-u_1^2} \right] \\ &- \left(\frac{f}{\alpha} + \frac{f}{\beta}\right)(t - \alpha) \left[(1 + 2u_2^2) \operatorname{erfc} u_2 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_2 e^{-u_2^2} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

$t > \alpha + \beta$

$$\begin{aligned} h(x, t) &= \frac{ft}{\alpha} \left[(1 + 2u_1^2) \operatorname{erfc} u_1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_1 e^{-u_1^2} \right] \\ &- \left(\frac{f}{\alpha} + \frac{f}{\beta}\right)(t - \alpha) \left[(1 + 2u_2^2) \operatorname{erfc} u_2 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_2 e^{-u_2^2} \right] \\ &+ \frac{f}{\beta}(t - |\alpha + \beta|) \left[(1 + 2u_3^2) \operatorname{erfc} u_3 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_3 e^{-u_3^2} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

avec :

$$u_1 = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t}} \quad u_2 = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t - \alpha}} \quad u_3 = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t - |\alpha + \beta|}}$$



— *Quatrième cas* : impulsion trapézoïdale isolée (fig. 10) :

On obtient facilement :

$$\Phi(p) = \frac{f}{\alpha p} - \frac{f}{\alpha} \frac{e^{-p\alpha}}{p} - \frac{f}{\gamma} \frac{e^{-p(\alpha+\beta)}}{p} + \frac{f}{\gamma} \frac{e^{-p(\alpha+\beta+\gamma)}}{p}$$

d'où l'expression de $h(x, t)$ dans chacun des intervalles :

$$0 < t < \alpha$$

$$h(x, t) = \frac{ft}{\alpha} \left[(1 + 2u_1^2) \operatorname{erfc} u_1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_1 e^{-u_1^2} \right] \quad (11)$$

$$\alpha < t < \alpha + \beta$$

$$h(x, t) = \frac{ft}{\alpha} \left[(1 + 2u_1^2) \operatorname{erfc} u_1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_1 e^{-u_1^2} \right] - \frac{f}{\alpha} (t - \alpha) \left[(1 + 2u_2^2) \operatorname{erfc} u_2 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_2 e^{-u_2^2} \right] \quad (12)$$

$$\alpha + \beta < t < \alpha + \beta + \gamma$$

$$h(x, t) = \frac{ft}{\alpha} \left[(1 + 2u_1^2) \operatorname{erfc} u_1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_1 e^{-u_1^2} \right] - \frac{f}{\alpha} (t - \alpha) \left[(1 + 2u_2^2) \operatorname{erfc} u_2 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_2 e^{-u_2^2} \right] - \frac{f}{\gamma} (t - \alpha - \beta) \left[(1 + 2u_3^2) \operatorname{erfc} u_3 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_3 e^{-u_3^2} \right] \quad (13)$$

$$t > \alpha + \beta + \gamma$$

$$h(x, t) = \frac{ft}{\alpha} \left[(1 + 2u_1^2) \operatorname{erfc} u_1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_1 e^{-u_1^2} \right] - \frac{f}{\alpha} (t - \alpha) \left[(1 + 2u_2^2) \operatorname{erfc} u_2 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_2 e^{-u_2^2} \right] - \frac{f}{\gamma} (t - \alpha - \beta) \left[(1 + 2u_3^2) \operatorname{erfc} u_3 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_3 e^{-u_3^2} \right] + \frac{f}{\gamma} (t - \alpha - \beta - \gamma) \left[(1 + 2u_4^2) \operatorname{erfc} u_4 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_4 e^{-u_4^2} \right] \quad (14)$$

$$u_1 = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t}} \quad u_2 = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t - \alpha}}$$

$$u_3 = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t - \alpha - \beta}}$$

$$u_4 = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t - \alpha - \beta - \gamma}}$$

— *Cinquième cas* : n impulsions rectangulaires en série (nous avons représenté sur la figure 11 le cas $n = 3$) :

$$\Phi(p) = f_1 (1 - e^{-p\alpha_1}) + f_2 (e^{-p\tau_2} - e^{-p(\tau_2 + \alpha_2)}) + f_3 (e^{-p\tau_3} - e^{-p(\tau_3 + \alpha_3)})$$

d'où l'expression de $h(x, t)$ dans chacun des intervalles :

$$0 < t < \alpha_1 \quad h(x, t) = f_1 \operatorname{erfc} u_1 \quad (15)$$

$$\alpha_1 < t < \tau_2 \quad h(x, t) = f_1 [\operatorname{erfc} u_1 - \operatorname{erfc} u_2] \quad (16)$$

$$\tau_2 < t < \tau_2 + \alpha_2 \quad h(x, t) = f_1 [\operatorname{erfc} u_1 - \operatorname{erfc} u_2] + f_2 \operatorname{erfc} u_3 \quad (17)$$

$$\tau_2 + \alpha_2 < t < \tau_3 \quad h(x, t) = f_1 [\operatorname{erfc} u_1 - \operatorname{erfc} u_2] + f_2 [\operatorname{erfc} u_3 - \operatorname{erfc} u_4] \quad (18)$$

$$\tau_3 < t < \tau_3 + \alpha_3 \quad h(x, t) = f_1 [\operatorname{erfc} u_1 - \operatorname{erfc} u_2] + f_2 [\operatorname{erfc} u_3 - \operatorname{erfc} u_4] + f_3 \operatorname{erfc} u_5 \quad (19)$$

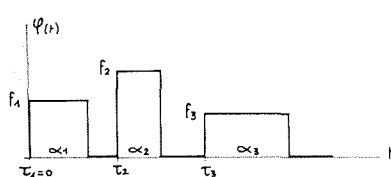
$$\tau_3 + \alpha_3 < t < \dots \quad h(x, t) = f_1 [\operatorname{erfc} u_1 - \operatorname{erfc} u_2] + f_2 [\operatorname{erfc} u_3 - \operatorname{erfc} u_4] + f_3 [\operatorname{erfc} u_5 - \operatorname{erfc} u_6] \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{aligned} u_1 &= \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t}} \\ u_2 &= \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t - \alpha_1}} \\ u_3 &= \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t - \tau_2}} \\ u_4 &= \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t - \tau_2 - \alpha_2}} \\ u_5 &= \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t - \tau_3}} \\ u_6 &= \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t - \tau_3 - \alpha_3}} \end{aligned} \right.$$

Application au calcul de S/T.

Dans le graphique du mois de décembre 1955, on constate (fig. 5), que, pendant la journée du 19, le niveau du Verdon reste constant; puis à partir de 17 h 24 mn, sa variation en fonction du temps peut être assimilée à une série de cinq impulsions rectangulaires, dont les trois premières sont représentées schématiquement sur la figure 12.

Nous pouvons appliquer les formules (15) à (20) précédemment établies pour obtenir les valeurs de $h(x, t)$ correspondant à $x = 100$ m, c'est-à-dire au sondage S 18, seul encore exploité à cette date.



11/



12/

12/ Evolution schématique du niveau du Verdon à partir du 19 décembre à 17 h 24. Trois impulsions seulement ont été représentées. Diagrammatic representation of water levels in the Verdon from 17.24 hrs on december 19 onwards. Only three impulses are shown.

La première impulsion et sa réponse permettent de calculer S/T :

pour : $t = 14$ heures $h = 22$ cm

$$\operatorname{erfc} u = \frac{h}{f} = \frac{22}{55} = 0,40$$

or : $\operatorname{erfc} u = 1 - \theta(u)$

avec : $\theta(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-\lambda^2} d\lambda$

Les tables de Marcel Boll donnent $\theta(u)$ en fonction de u et permettent inversement de déterminer u à partir de $\theta(u)$.

On obtient :

$$u = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t}} = 0,60$$

d'où :

$$S/T = 7,2 \text{ M.T.S.} = 7,2 \text{ s/m}^2$$

A partir de cette valeur de S/T et des conditions aux limites (impulsions rectangulaires du Verdon), on peut déterminer la courbe de réponse théorique dans S 18. Elle coïncide exactement avec la courbe réellement observée (fig. 13).

Interprétation et discussion

Valeur de K :

$$\frac{S}{T} = \frac{S}{Kb} = 7,2 \quad \text{d'où : } K = \frac{S}{7,2 b}$$

Pour déterminer K, ou un ordre de grandeur de K, il convient d'estimer S et b.

ESTIMATION DE b (épaisseur de la nappe) :

— la théorie suppose une nappe horizontale en communication avec la rivière sur toute son épaisseur, ce qui n'est pas le cas, puisque le calcaire doit être saturé d'eau jusqu'à une grande profondeur sous le Verdon.

— on pourrait être tenté de prendre :

b = épaisseur de la lame d'eau libre.	1,50
+ épaisseur des alluvions certainement très perméables.	4,50
+ partie du bed-rock très fissuré donc perméable.	1,00
TOTAL.	7,00

En fait, la hauteur du terrain aquifère intéressée par les mouvements de la nappe doit être supérieure, les lignes de courant de la partie profonde de la nappe n'étant plus horizontales, mais incurvée pour pénétrer perpendiculairement dans le fond du lit de la rivière (fig. 14).

Nous admettrons provisoirement $b = 10$ m.

ESTIMATION DE S (porosité utile ou porosité efficace).

Une indication peut être fournie à ce sujet par les essais d'injection de ciment réalisés en 1948 dans la zone de flexure de la Fare très certainement beaucoup plus fracturée que l'ensemble du massif.

L'expérience a montré que pour une absorption moyenne inférieure à 500 kg de ciment par mètre linéaire, le rayon d'action des forages est de l'ordre de 5 m. Un calcul simple montre que le volume des vides remplis par le ciment est de l'ordre de $0,25 \cdot 10^{-2}$ ce qui peut correspondre à une porosité efficace voisine de :

$$0,5 \cdot 10^{-2} = 5 \cdot 10^{-3}$$

ce chiffre représente certainement une limite supérieure pour l'ensemble du massif, nous admettrons :

$$S < 3,5 \cdot 10^{-3}$$

ce qui conduit pour K à une valeur sûrement inférieure à $5 \cdot 10^{-5}$. Remarquons que si on prenait $b > 10$ m on obtiendrait une valeur de K encore plus petite.

Conclusion provisoire :

$$K < 5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Discussion.

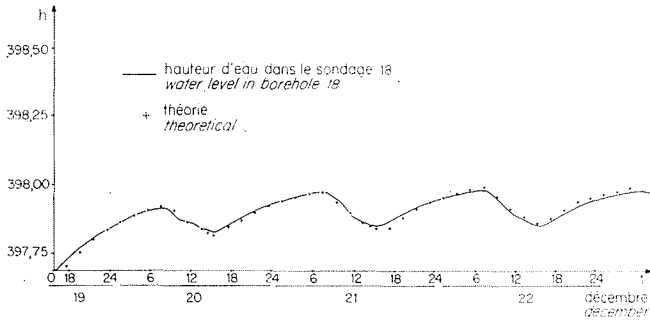
Il n'a été possible d'arriver à ce résultat qu'à force d'hypothèses et d'estimations plus ou moins sûres.

- 1° Terrain homogène et isotrope :
cette hypothèse n'est pas vérifiée et nous allons voir un peu plus loin ce qu'il faut en penser.
- 2° Écoulements satisfaisant à la loi de Darcy :
deux raisons permettent de penser *a priori* que les écoulements satisfont bien à cette loi :
 - a) les expériences de longue durée réalisées dans un sondage implanté sur la flexure l'ont confirmé,
 - b) R. Miche, aux « Journées de l'Hydraulique » de 1960, a montré que dans un réseau de film où les écoulements sont laminaires, la loi de Darcy généralisée $\bar{V} = -\bar{K} \text{ grad } h$ s'applique.

Par ailleurs, la bonne concordance entre théorie et résultats expérimentaux dans le cas présent incite à considérer cette deuxième hypothèse comme vérifiée.

3° Hypothèse de Dupuit :

- a) la surface libre moyenne de la nappe est presque horizontale et l'on montre assez facilement que sa faible inclinaison en direction de S 18 n'est susceptible d'introduire qu'une erreur minime dans les calculs;
- b) les variations de niveau du Verdon sont brutales mais toujours de faible amplitude ($f = 55$ cm). Sauf au voisinage immédiat des berges, on peut donc considérer l'hypothèse de Dupuit comme satisfaite.



13/ La courbe en trait plein représente la variation du niveau de l'eau dans le sondage S 18, telle qu'elle nous est donnée par le graphique. Les croix représentent les points calculés d'après les formules (15) à (20).
The continuous line and crosses are the water level variations in borehole S 18 given by the graph and calculated by formulae (15) to (20) respectively.

Il n'en est pas de même, évidemment, à la limite de la nappe. L'influence de la courbure des lignes de courant et des variations rapides de niveau ne doit cependant pas être bien grande, comme l'atteste la bonne concordance entre résultats théoriques et expérimentaux.

Parmi les trois hypothèses envisagées une seule n'est absolument pas vérifiée : celle de l'homogénéité et de l'isotropie.

Il a été admis, à la suite des études géologiques, que les zones fracturées favorables au mouvement de la nappe s'alignent, comme les grandes cassures visibles en surface, perpendiculairement au Verdon.

La galerie de dérivation provisoire qui contourne le futur barrage sur sa rive droite devrait donc recouper ces fractures. Or, elle se révèle remarquablement étanche, ce qui accrédirait l'idée de trajets non perpendiculaires au Verdon mais venant de l'amont ou de l'aval (fig. 15).

On peut se demander, dans ces conditions, quelle est la valeur de x à prendre en compte pour le calcul de S/T .

L'étude des fluctuations de la nappe nous a conduit directement à une certaine valeur de u .

u étant déterminé, on a :

$$u = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t}} = 0,60$$

S/T est donc inversement proportionnel à x^2 ;

K est proportionnel au carré de la distance x .

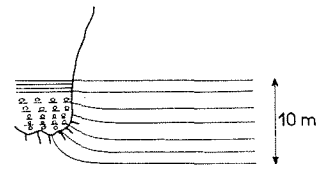
Si au lieu de $x = 100$ on était amené à prendre $x = 200$ la valeur de K serait multipliée par 4 et aurait pour limite supérieure :

$$2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

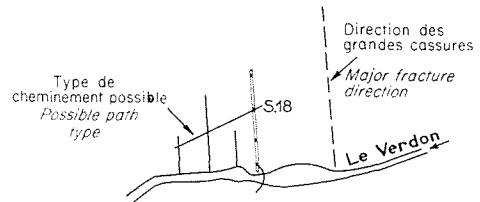
L'hétérogénéité de la fracturation dans le massif introduit donc une première et importante incertitude sur la longueur des cheminements à prendre en compte, donc sur la valeur de K à adopter.

Elle se manifeste de plus par de grandes différences dans le comportement de la nappe d'un point à un autre.

Les calculs précédents ont porté exclusivement sur le piézomètre S 18 distant de 100 m du Verdon;



14/



15/

or dans la galerie, deux autres piézomètres avaient été équipés de limnigraphes. Leurs enregistrements ne sont malheureusement pas exploitables par le calcul,

- le S 19, à 150 m de la rive, ayant été remplacé rapidement par un puits à constante de temps élevée;
- le S 20, à mi-distance entre le S 18 et le Verdon ayant vu son niveau régulièrement perturbé par des prélèvements d'eau.

Mais ils montrent quand même, et cela est particulièrement valable pour le S 20 proche de la rive, une réaction de la nappe beaucoup plus lente et bien moins importante que dans le S 18.

L'étude de la propagation des ondes dans les nappes peut être, en général, considérée comme un moyen sûr d'obtenir la perméabilité d'ensemble d'une couche aquifère, puisque les indications fournies par chaque piézomètre intègrent les caractéristiques de très nombreuses portions de l'aquifère.

Les remarques précédentes montrent cependant que dans le cas d'un massif rocheux fracturé, comme celui de Sainte-Croix, l'étude, pour être parfaitement valable, aurait dû porter, comme s'il s'était agi de mesures ponctuelles, sur un grand nombre de points d'observation.

Conclusion

La présente étude avait été entreprise pour essayer de déterminer la perméabilité globale du massif d'appui rive droite du futur barrage de Sainte-Croix.

Elle nous a permis de reconnaître tout d'abord, que les équations générales des écoulements souterrains déduites de la loi de Darcy s'appliquaient au cas envisagé.

Elle nous a donné l'occasion, ensuite, de mettre en évidence l'intérêt du calcul opérationnel dans la résolution des problèmes d'Hydraulique souterraine.

Enfin, elle nous a montré à quelles difficultés on pouvait se heurter, lorsque ayant l'équation du mou-

vement de la nappe, on voulait l'appliquer au calcul de K :

- difficultés provenant de l'hétérogénéité fondamentale de l'aquifère (répartition hétérogène des vides dans le massif fissuré);
- difficultés dues à une mauvaise connaissance de paramètres tels que l'épaisseur de la nappe et le coefficient d'emmagasinement.

A Sainte-Croix, de nouvelles recherches sont en cours, et nous espérons qu'elles permettront de recouper les résultats de cette note. Plusieurs piézomètres, notamment, ont été installés dans le massif rive droite entre le barrage et le col d'Arnoux. Outre la reconnaissance du sens d'écoulement de la nappe ils permettront, par l'étude des réactions de cette nappe aux précipitations, la détermination d'un coefficient d'emmagasinement S sans doute plus vrai que celui qui a été donné ci-dessus.

Bibliographie

- S.E. JACOB. — Engineering Hydraulics. John Wiley and Sons, New York 1950, chap. V, p. 364.
- J. FERRIS. — Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility. Assoc. int. d'Hydrologie Sc. - As. gén., Bruxelles 1951, t. II, p. 148.
- L.J. TISON. — Cours d'Hydraulique, Gand 1952, t. II, pp. 386 à 413 (nombreuses références en bas de pages).
- R. MEYER. — Quelques résultats théoriques récents concernant les écoulements des nappes d'eau souterraines. La Houille Blanche, 1955, pp. 86 à 108 et 744 à 758; 1956, pp. 23 à 35.
- R. MICHE. — Recherches théoriques sur les écoulements de filtration non permanents. Compte rendu des VI^{es} journées de l'Hydraulique. Nancy 1960, t. II, p. 31.
- M. DENIS-PAPIN et A. KAUFMANN. — Cours de Calcul opérationnel appliqué. Albin Michel, 1963.

Discussion

Président : M. BOURGIN

Avant de donner la parole à M. GARNIER, M. le Président dit qu'il a longtemps considéré que les calcaires fracturés en grand ne pouvaient pas donner lieu à l'établissement d'une nappe. Le rapport que présente M. GARNIER va démontrer le contraire. Le site étudié est celui des gorges du Verdon, en aval de Sainte-Croix du Verdon. Il y a près de 150 ans que l'on en parle. On avait pensé à en faire d'abord un réservoir de dimensions modestes, destiné à la régularisation de l'irrigation agricole; ensuite un barrage à buts multiples, à la fois énergétique et agricole. Soit le réservoir de Sainte-Croix, soit celui de Serre-Ponçon, soit celui de Rians, ont été étudiés dans ce but de régularisation de la Basse-Durance.

Seul le barrage de Serre-Ponçon a été mis en service, il y a une dizaine d'années. Le barrage de Sainte-Croix sera certainement réalisé au cours des prochaines années, dans une opération commune entre la Société du Canal de Provence et Electricité de France. Le site de ce barrage a été étudié dès 1950, et c'est à cette date qu'ont été faites les mesures de perméabilité dont M. GARNIER va parler.

Après l'exposé de M. GARNIER, M. le Président indique, au sujet du premier alinéa du paragraphe « Karstification » que l'assise I n'est pas exempte de karstification, elle n'est surtout pas exempte de fracturation; c'est la moins mauvaise assise que l'on ait pu trouver et c'est celle qu'on a reconnue pour l'appui du barrage.

Par contre, les assises II et III sont affectées de profondes fracturations et l'on retrouve des grottes nombreuses, profondes, dans la partie de la gorge du cañon de Baudinard qui s'étend en aval du barrage. On en trouve également dans la retombée de l'anticlinal, du côté de la cuvette des Sallés. Il peut se trouver que la karstification s'étende loin vers le col d'Arnoux dans la zone où le calcaire vient s'envoyer sous le miocène à un kilomètre environ au nord du site du barrage. Les grottes qui ont été visitées dans le cañon de Baudinard ont montré des remplissages d'argile importants.

D'autre part, M. le Président salue l'honnêteté avec laquelle M. GARNIER a discuté les hypothèses qu'il a introduites dans l'application de la théorie de Jacob.

M. le Président cite, à titre d'exemple, le cas du Sautet qui remonte à 1935, où des pertes se sont produites au large du barrage, dans un lit fossile, rempli d'alluvions anciennes. C'est un milieu poreux typique et l'on a étudié l'effet des impulsions résultant de l'exploitation du réservoir sur les niveaux de la nappe.

M. GARNIER répond aux objections faites par M. le Président :

— il y a une question d'échelle qui est assez intéressante à préciser, c'est que ce massif a un kilomètre, à peu près, de profondeur et un peu plus de largeur, et que la galerie qui a été étudiée n'avait que 150 m de longueur. Pour les écoulements qui ont été étudiés, il est difficile de supposer des contournements très lointains;

— en ce qui concerne la répartition des grottes, on n'en connaît qu'une vraiment importante sur la rive gauche, appelée « grotte de l'église » et totalisant 1 500 à 2 000 m de galeries. Encore s'agit-il de galeries nombreuses et courtes disposées suivant un plan quadrillé et ne pénétrant pas très loin dans l'intérieur du massif. Toutes les autres grottes qui ont été explorées, à l'exception d'une dans la rive droite, ont moins de 70 m de profondeur. Cela ne veut pas dire qu'elles ne sont pas plus profondes car, en général, la grotte est plus ou moins descendante et c'est un remplissage qui empêche d'aller plus profond. Mais les sections des grottes se réduisent fortement et on a l'impression qu'elles ne se prolongent pas très loin. M. GARNIER n'a pas insisté sur cette question qui sort assez largement du cadre de l'étude.

En complément d'information à la communication de M. GARNIER, M. RUBY précise que de nouveaux piézomètres équipés de Télimip Neyrpic ont été remis en observation depuis octobre 1966 et qu'ils permettent de tracer une carte des isopièzes. Celle-ci indique l'existence d'une zone de drainage sous le col d'Arnoux, semblant déboucher vers la grotte de l'Auchier. L'alimentation provient du Verdon et du versant, mais peut-être aussi de la plaine alluviale de Sainte-Croix, en amont; quelques piézomètres doivent être installés dans celle-ci et un essai de coloration à la fluorescéine tenté.

Enfin, une injection de fluorescéine dans la grotte de l'Arbitelle, R.G. du Verdon, est ressortie 48 h après dans le Verdon à partir du pont de Montpezat, à environ 2 km du point d'injection. Les sorties ont été détectées à l'aide de fluocapteurs au charbon actif.

M. ZAOURI exprime son admiration pour les calculs numériques effectués par les auteurs. Il a lui-même, il y a quelques années, entrepris une étude analogue pour une nappe phréatique voisine du Rhône mais, devant la lourdeur des calculs, a renoncé pour faire appel à un programme sur calculateur électronique qui, après mise au point, a fourni la solution en quelques minutes. Ce programme s'applique à tous les schémas du même type et il permet de plus de s'affranchir d'un certain nombre de conditions restrictives imposées par la méthode analytique (massif hétérogène, conditions aux limites quelconques, irrégularités de substratum).

tum ou du toit imperméable éventuel...) car il est fondé sur l'intégration numérique des équations de base, transformées en différences finies. La solution digitale est particulièrement bien adaptée à ce genre d'études qui exige la réalisation de calculs répétitifs.

M. le Président remercie M. RUBY et M. ZAOUÏ de leurs interventions mais il lui semble qu'elles débordent très largement sur le sujet de la séance du 18 novembre matin relative aux études mathématiques des écoulements permanents et transitoires.

M. THIRRIOT a été très intéressé par la communication de M. GARNIER qui lui rappelle un essai mené à bien à Grenoble par le Professeur KORDAS. Celui-ci a utilisé une méthode similaire à celle de M. GARNIER, qui consiste à représenter l'impulsion par une succession de segments rectilignes (cette étude a été publiée dans les comptes rendus de l'Académie des Sciences).

M. THIRRIOT est très heureux de voir que ce travail, qu'il jugeait un peu théorique, peut avoir des applications aussi pratiques que celle qui vient d'être présentée.

D'autre part, M. THIRRIOT se demande pourquoi M. GARNIER a éliminé d'entrée les développements en série de Fourier puisqu'il a pris une onde à forme rectangulaire. On sait, et la formule que M. GARNIER a présentée le montre bien, qu'il y a une atténuation très rapide lorsque la fréquence croît, lorsque la période de l'onde sinusoïdale devient très petite. Quand on prend le développement de Fourier, les deux premiers harmoniques suffisent pour représenter avec satisfaction le comportement du milieu poreux en réponse à l'impulsion à sa limite amont.

M. le Président dit que, dans le cas du Verdon, l'impulsion de forme carrée était suggérée par l'exploitation des réservoirs amont.

M. GARNIER précise qu'on a eu la chance de trouver dans la période de mesure un certain nombre d'impulsions rectangulaires qui se suivent de façon très régulière. En dehors

de cette séquence particulière, les impulsions se succèdent de façon irrégulière et avec des formes variables.

La première impulsion de la séquence considérée vient après une journée et demie de repos absolu. Cette séquence exceptionnelle aurait sans doute pu, du fait de ses caractéristiques particulières, être analysée à l'aide des séries de Fourier. La théorie proposée s'applique au cas général.

M. THIRRIOT demande si le niveau moyen que l'on a vu apparaître a un rapport avec le niveau qu'on pourrait considérer comme moyen sur la face amont du massif.

M. GARNIER indique qu'il est difficile de définir un niveau moyen dans le cas du Verdon. Il n'y a en fait qu'un niveau de base au-dessus duquel se produisent des impulsions. Lorsque les impulsions sont suffisamment rapprochées et se succèdent de façon régulière, alors on peut considérer qu'il existe un niveau moyen auquel correspond dans le sondage un niveau moyen simplement modulé. C'est ce qui se passe pour la séquence étudiée.

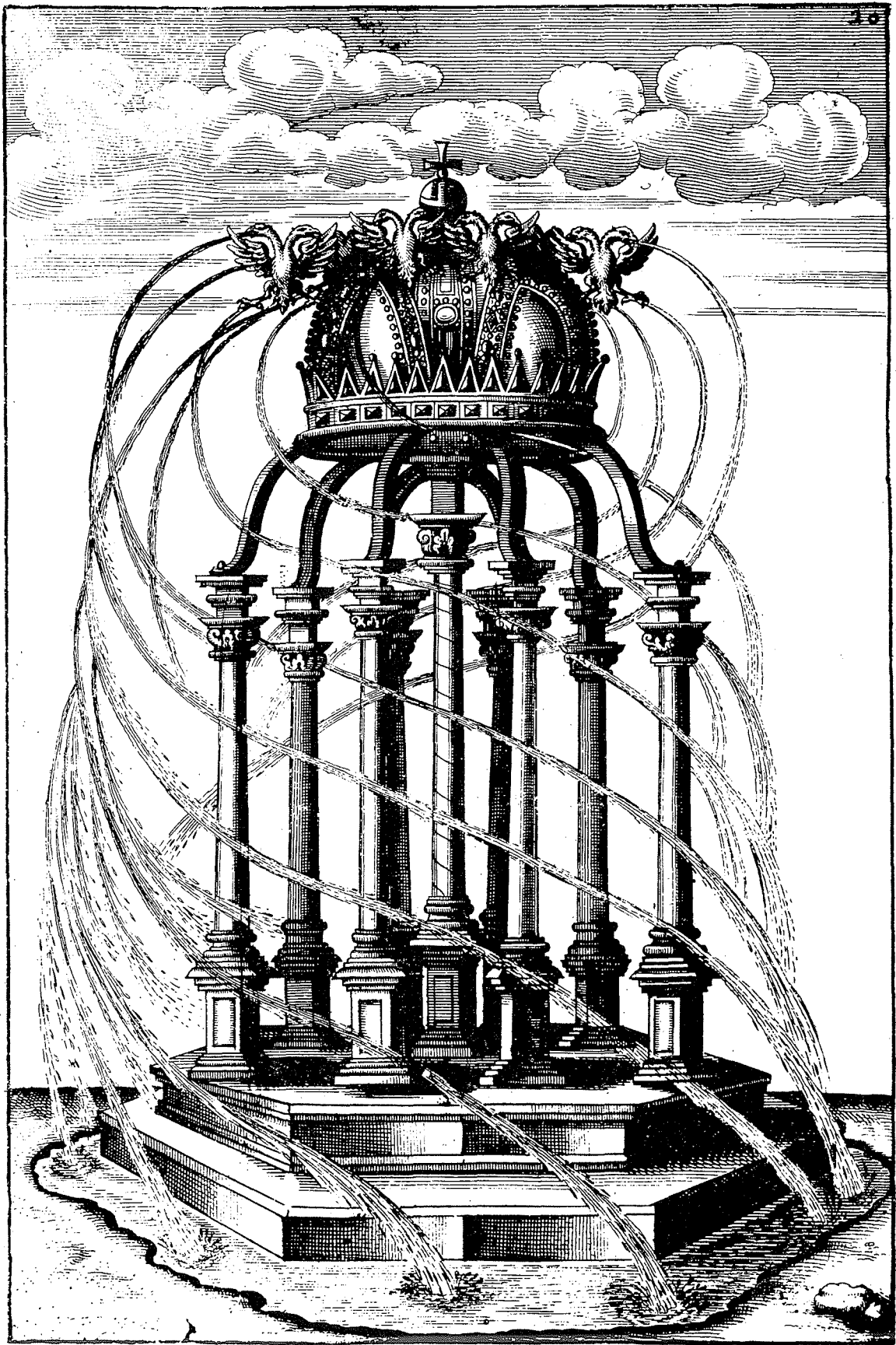
Mais dès qu'on a une période de repos de l'ordre de la journée, on retombe très près du niveau de base.

M. GARNIER croit que, pour la suite d'impulsions considérée, on aurait pu appliquer l'onde sinusoïdale *a priori*, et que la méthode aurait certainement donné un résultat à peu près valable. En dehors de cette séquence particulière, les impulsions se suivent de façon beaucoup plus erratique et c'est la méthode générale qu'il aurait fallu appliquer.

M. THIRRIOT signale qu'à Toulouse on a étudié la réponse d'un massif poreux de largeur limitée à des excitations de formes variées, sinusoïdales, trapézoïdales, triangulaires, et on a vérifié le bien-fondé de la superposition d'oscillations sinusoïdales.

M. le Président s'excuse d'avoir tellement étendu cette séance, mais le niveau des communications qui ont été présentées par M. LONDE, M. AVIAS et M. GARNIER justifie ce retard.

M. le Président remercie les conférenciers et lève la séance à 18 h 55.



Gravure extraite de *Architectura curiosa nova* par G. A. BÖCKLERN
Nuremberg (1664)