

Digue et écran d'injection de Mattmark

par B. Gilg

Docteur ès-Sciences Techniques
Directeur du Département d'Aménagements Hydrauliques
Electro-Watt Ingénieurs-Conseils S.A., Zurich

1. — Généralités

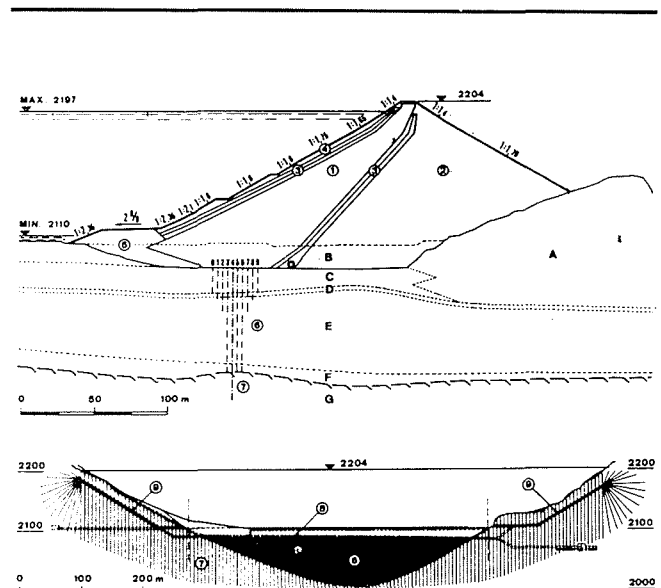
La digue de Mattmark se situe dans la vallée de Saas sur la viège de Saas, un tributaire du Rhône dans le Haut-Valais en Suisse. Cette vallée est caractérisée par un grand nombre de moraines latérales qui furent déposées après la dernière glaciation (Wurm) par les glaciers descendant des deux côtés lorsque le glacier principal s'est définitivement retiré.

Les travaux de prospection pour l'aménagement de Mattmark commencèrent en 1954 pour s'achever seulement en 1960. Cette même année l'entreprise spécialisée mit en place les installations pour l'exécution de l'écran d'injection dans les terrains meubles. Les travaux d'excavation pour la digue furent entrepris en 1961 et l'exécution des remblais s'étendit jusqu'en 1967, après une interruption d'environ une année provoquée par le tragique accident de la rupture du glacier d'Allalin en août 1965.

2. — Géologie et géotechnique

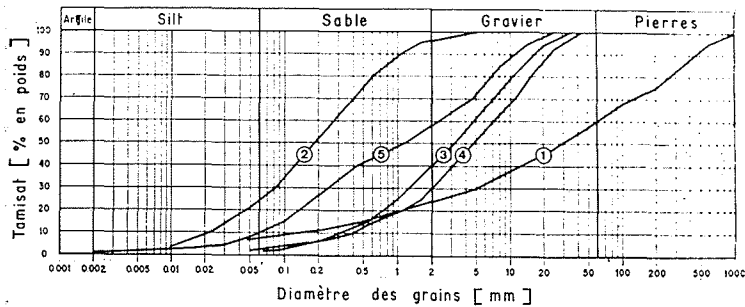
La prospection géologique comprenant une campagne de profilage sismique et géoélectrique, un grand nombre de forages avec essais de perméabilité, carottage classique et partiellement électrique et des galeries en rocher et surtout dans le terrain meuble des moraines, a permis d'établir le projet de la digue et du voile d'injection représenté dans la figure 1.

Au-dessus d'un soubassement très résistant et peu altéré de granit, gneiss et prasinite des gisements successifs de moraines, d'alluvions et de sédiments lacustres jusqu'à une épaisseur totale d'environ 100 m ont été déposés. La der-

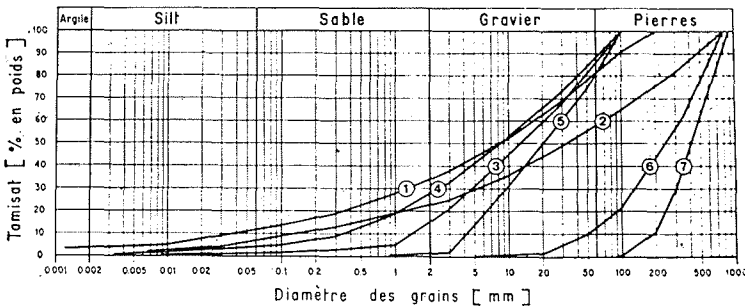


1/ Coupes transversale et longitudinale de la digue.

- | | |
|-------------------------------|---|
| A Moraine latérale. | 3 Zones de transition. |
| B Sédiments lacustres. | 4 Perré de protection. |
| C Alluvions fluvio-glacières. | 5 Recharge du pied amont. |
| D Moraine remaniée. | 6 Ecran d'injection dans le terrain meuble. |
| E Moraine de fond wurmienne. | 7 Rideau d'injection dans le rocher. |
| F Formations pré-wurmiennes | 8 Galerie de drainage. |
| G Rocher. | 9 Galerie d'injection. |
| 1 Noyau. | |
| 2 Corps d'appui. | |



- 1 Moraine Sud du glacier d'Allalin.
- 2 Sédiments lacustres.
- 3 Alluvions fluvio-glaciaires.
- 4 Moraine de fond wurmienne.
- 5 Formations pré-wurmiennes.



- 1 Noyau.
- 2 Corps.
- 3 Drainage amont.
- 4 Filtre.
- 5 Drainage aval.
- 6 Perré de protection.
- 7 Blocage du couronnement.

2/ Courbe granulométrique moyenne des matériaux de fondation et de construction.

nière couche ne possédant pas une capacité portante suffisante fut enlevée sous toute la fondation de la digue afin d'éviter des tassements inadmissibles.

Le choix d'une digue comme seul type possible de barrage s'imposa pour des raisons économiques car l'excavation des zones meubles jusqu'au rocher aurait occasionné des dépenses absolument prohibitives.

La prospection géotechnique a en outre permis de déterminer les propriétés de matériau telles que :

- granulométrie;
- perméabilité;
- résistance au cisaillement;
- module de déformation;

qui furent indispensables pour l'élaboration du projet détaillé autant pour la digue que pour l'écran d'étanchéité.

3. — Projet du barrage

A Mattmark la digue et le sous-sol en terrain meuble forment une unité. Les matériaux de construction étant prélevés en totalité dans les environs immédiats du site présentent pratiquement les mêmes caractéristiques que le soubassement direct. Ainsi le noyau, le corps aval et la zone de protection amont (qui remplace le corps amont) se composent de gisements morainiques tandis que les zones de transitions (filtre et drainage) proviennent des dépôts alluvionnaires.

Afin de réduire le volume de la digue à 10,5 Mio m³, une des moraines latérales, dénommée moraine sud, fut incorporée partiellement dans le remblai.

Comme d'une part sa perméabilité de 10⁻³ cm/s est trop forte pour qu'elle puisse servir de noyau et que d'autre part la granulométrie bien répartie (voir fig. 2 et 3) n'aurait

pas permis une injection économique et efficace, on a été amené à projeter un noyau oblique posé sur le talus de cette moraine. Le matériau du noyau, également d'origine morainique, possède une granulométrie très voisine de celle de la moraine sud. Son pourcentage en argile ($\leq 2 \mu$) n'étant que de 2-3 %, une réduction de grain maximum à 120 mm et un traitement particulier furent nécessaires pour atteindre une étanchéité suffisante dans le remblai. Grâce à la composition granulométrique le coefficient de pression interstitielle est très bas ($< 5 \%$), et — après un bon compactage — on obtient des valeurs de frottement interne exceptionnellement hautes (38° - 40°).

C'est pourquoi le noyau est capable de reprendre simultanément la fonction du corps amont de la digue. Il est séparé du corps aval et de la couche de protection amont par les deux zones de transition, dont les granulométries (voir fig. 2) diffèrent essentiellement dans la partie fine. Les deux matériaux proviennent des mêmes gisements, mais le filtre maintient les propriétés naturelles tandis que le drainage fut préparé dans une station de lavage-triage.

La perméabilité du corps doit évidemment être élevée. Afin d'obtenir ce résultat, on a essayé de rendre cette zone inhomogène par une mise en place irrégulière. Ceci fut réalisé en choisissant :

- des couches de 1 m d'épaisseur;
- des grains maximum de 800 mm;
- la mise en place occasionnelle du surplus du noyau (120 - 800 mm).

Néanmoins le corps atteint une résistance au cisaillement très haut, correspondant à un angle de frottement interne de 42° - 44°.

Les perméabilités moyennes successives des différentes zones sont les suivantes :

- corps aval $> 10^{-2}$ cm/s
- drainage 10^{-1} cm/s

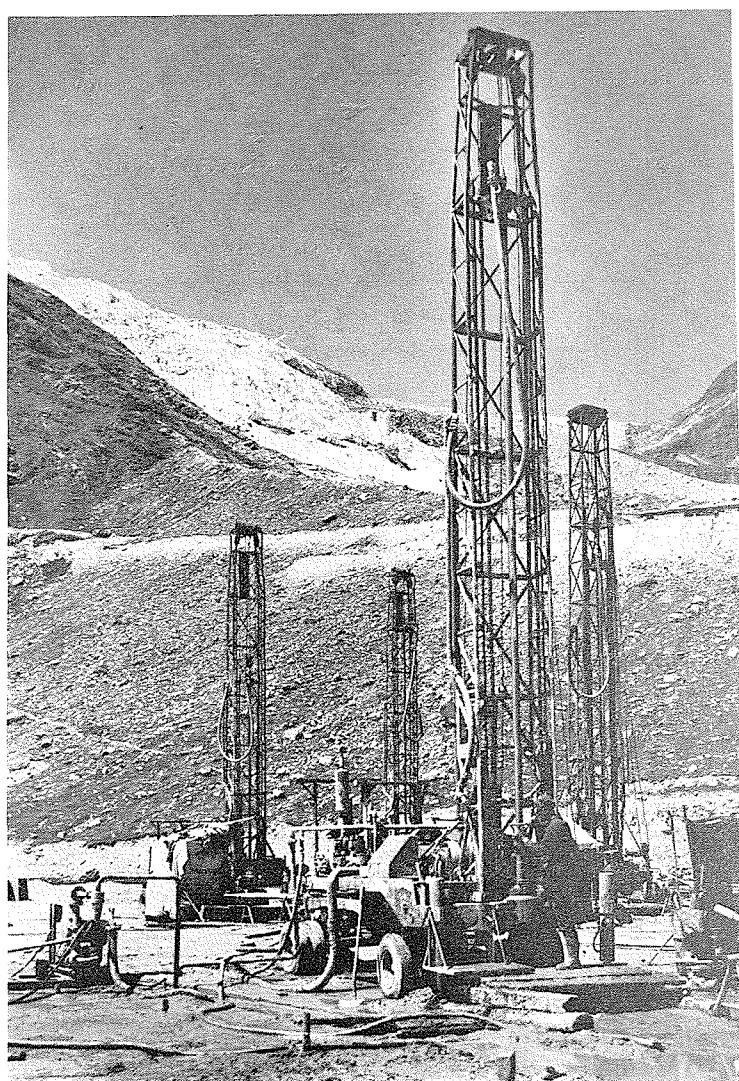
- filtre 5.10^{-4} cm/s
- noyau 2.10^{-5} cm/s

Il est évident que le filtre devrait présenter une valeur légèrement plus haute. En choisissant des zones de transition relativement épaisses ce désavantage peut quand même être considéré comme mineur.

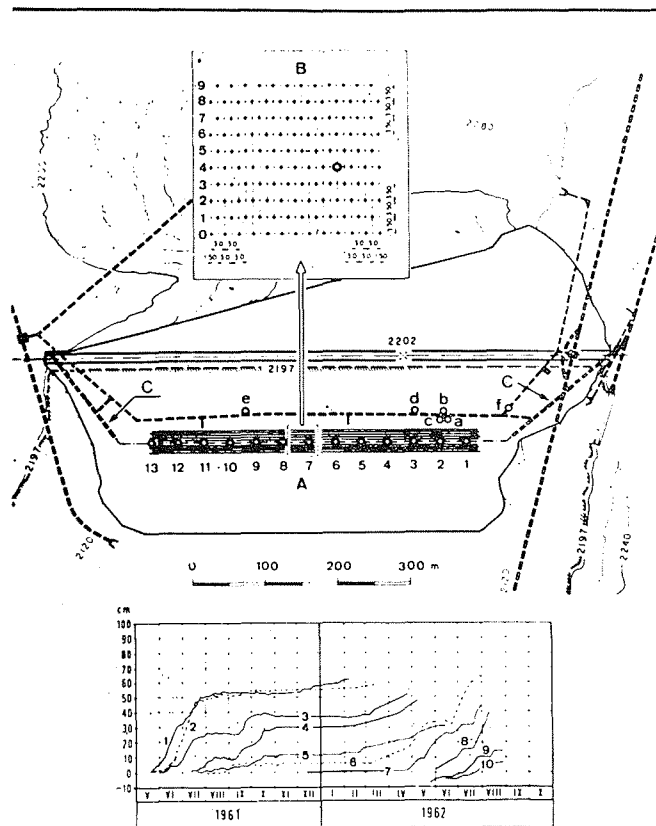
4. — Projet de l'écran

Le terrain meuble sous la digue fut reconnu comme étant en général assez perméable et un traitement s'avéra inévitable. L'exécution d'une paroi moulée de 100 m de profondeur et à travers des blocs de plusieurs mètres-cubes fut rejetée pour des raisons d'économie et de difficulté de réalisation.

Par contre un écran d'injection se présenta comme un dispositif efficace. Le projet (voir fig. 4) montre un ensemble de dix rangées de forages dans la partie supérieure avec diminution successive jusqu'à quatre rangées espacées de 3,5 m. La distance entre les forages est de 3 m.



3/ Installation de forage pour l'écran d'injection avec la moraine sud à l'arrière-fond.



4/ Situation de l'écran d'injection et soulèvements du terrain.

- A Coupure étanche.
- B Schéma des forages avec numérotation des rangées.
- C Rideau d'injection dans le rocher.
- a-f Lieu des prélèvements d'eau d'infiltration dans la galerie de drainage pour les analyses chimiques (voir tableau 1).
- 1-13 Points mesurés pendant les soulèvements du terrain lors des injections.

Deux coulis d'injection essentiellement différents furent utilisés pour le traitement selon le schéma suivant [m^3/m] (m^3 de coulis par m de forage).

PROFONDEUR	RANGÉE				
	0/9	1/8	2/7	3/6	4/5
Phase I					
argile/ciment:					
2 090 - 2 070	3	1,5	3	—	—
2 070 - 2 065	—	3	3	—	—
2 065 - 2 055	—	—	3	1,5	—
au-dessous de 2 055	—	—	—	3	1,5
Phase II					
bentonite/silicate :					
2 090 - 2 070	1,5	1,5	1,5	3	3
2 070 - 2 065	—	1,5	1,5	3	3
2 065 - 2 055	—	—	1,5	1,5	3
au-dessous de 2 055	—	—	—	1,5	3

La composition du m³ de coulis était en principe la suivante :

ARGILE / CIMENT		BENTONITE / SILICATE	
Eau	850 l	Eau	950 l
Argile	300 kg	Bentonite	100 kg
Ciment	80 kg	Silicate	16 l
Silicate	12 l	Phosphate	14 kg

On remarque d'ailleurs que le coulis argile/ciment dont la pénétration est limitée par un coefficient de perméabilité naturelle de 10⁻² cm/s fut principalement injecté dans les rangées extérieures, qui varient évidemment suivant la profondeur en dessous de la surface.

Comme le coulis argile/ciment fut injecté systématiquement avant le coulis de bentonite, on créa d'abord une zone d'arrêt pour ainsi limiter l'expansion de ce dernier.

5. — Détails d'exécution de la digue

Comme déjà mentionné dans le chapitre précédent, le matériau de noyau provenant des moraines latérales est relativement pauvre en particules fines. Ce fait a obligé l'entreprise de porter un soin particulier aux opérations de mise en place. Le problème principal fut le démélange lors du déchargement et de la répartition sur le remblai. Pour réduire au minimum ce phénomène les prescriptions suivantes furent imposées :

- utilisation d'engin du type « bottom-dump » (voir fig. 5) ;
- limitation du grain maximum à 120 mm ;
- réduction de l'épaisseur des couches à 18 cm foisonné et compactage de deux couches successives (à 30 cm fini).

La limitation du grain maximum fut obtenue par l'installation de trois séparateurs « wobbler » qui permettent une production plus puissante que les tamis ordinaires.

Le compactage du noyau fut effectué par des rouleaux à pneu de 80 t. La pression exercée étant d'environ 5 atm, les deux premiers passages assuraient déjà 80-90 % du compactage définitif. Après quatre passages celui-ci fut pratiquement terminé.

Comme la digue repose en partie sur du terrain meuble de grande épaisseur et en partie sur le flanc rocheux de la vallée, des tassements très différents se sont produits à la base du remblai, allant de peu de millimètres jusqu'à plus de 2 m au milieu de la vallée. L'hétérogénéité s'est manifestée particulièrement au contact rocher/alluvion sur la rive droite où les tassements furent très forts dans les alluvions. Quelques fissures transversales qui furent découvertes dans le remblai lors de l'arrêt des travaux en automne 1965 en ont été la conséquence. La cote atteinte était à ce moment-là 2 170 m.s.m. c'est-à-dire 85 au-dessus de la fondation.

Comme les fissures n'allaient que jusqu'à une profondeur de 7 m à partir de la surface, la preuve était donnée qu'il s'agissait de fissures de flexion et non pas de cisaillement. Ainsi la réparation fut facile. On termina d'abord la digue sur la rive gauche et au milieu de la vallée, et seulement en 1967 lorsque les tassements avaient atteint 90-95 % de la valeur finale (voir fig. 6), la région des fissures fut excavée et remblayée à nouveau en trois mois, très soigneusement, jusqu'au couronnement. Les extensomètres mis en place à cet endroit montrèrent encore pendant trois années des dilatations assez fortes mais aucune fissure ne s'est plus produite.

6. — Détails d'exécution de l'écran

Selon les résultats de l'essai d'injection exécuté en 1958 et en 1959, il fut estimé qu'une quantité de 0,6 m³ de gel argile/ciment ou bentonite/silicate serait nécessaire pour traiter efficacement 1 m³ de terrain. Il est évident que le volume de pore naturel de 25-30 % n'aurait pas suffi pour absorber une telle quantité de coulis mais on admettait :

- des pertes de volumes par expulsion d'eau sous la pression d'injection allant jusqu'à 40 atm ;
- des pertes de coulis hors de l'emprise de l'écran.

Très rapidement après le commencement des travaux d'injection on constata des soulèvements de terrain considérables (voir fig. 4) jusqu'à 60 cm. Il fut immédiatement décidé de réduire le volume total de gel à 0,4 m³/m³ de terrain traité comme le montre le schéma du chapitre 4. Ainsi l'écran exécuté eut les caractéristiques suivantes :

- longueur totale des forages 72 000 m
- longueur injectée 49 000 m
- quantité de coulis d'injection 215 000 m³

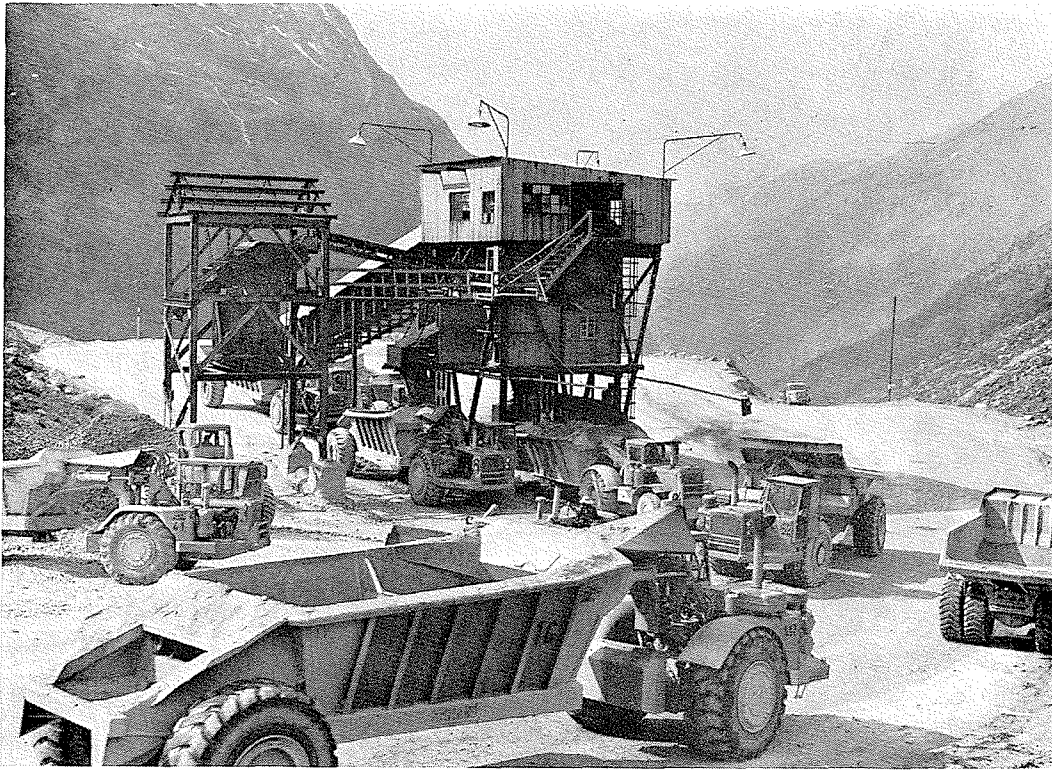
Matériaux

- ciment 15 000 t
- argile 36 000 t
- bentonite 11 000 t
- silicate 3 700 t
- phosphate 1 300 t
- terrain traité 516 000 m³
- surface de l'écran 21 500 m²
- pression d'injection (à l'exclusion de la phase finale) 20 - 25 atm

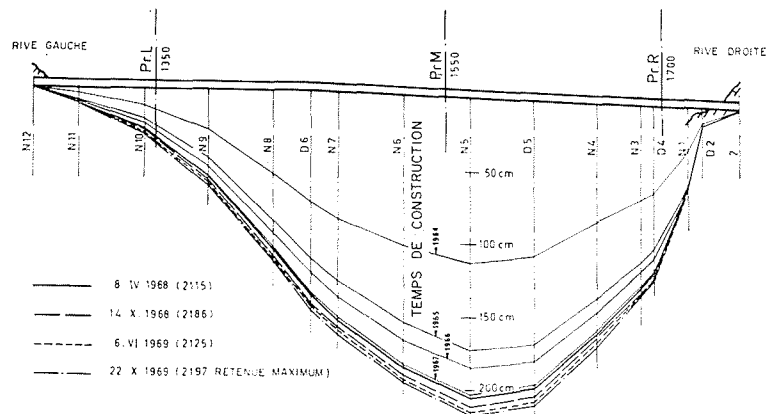
Malgré cette réduction les soulèvements n'ont pu être entièrement évités mais leur importance diminua.

La perméabilité du terrain traité fut contrôlée avec beaucoup de soins. On exécuta à cette fin des essais de pompage et d'abaissement d'eau dans des forages. Comme les résultats peuvent être très différents entre ces deux genres d'essais, surtout dans le cas de faible perméabilité, la valeur *k* de Darcy fut calculée par la méthode de la moyenne géométrique :

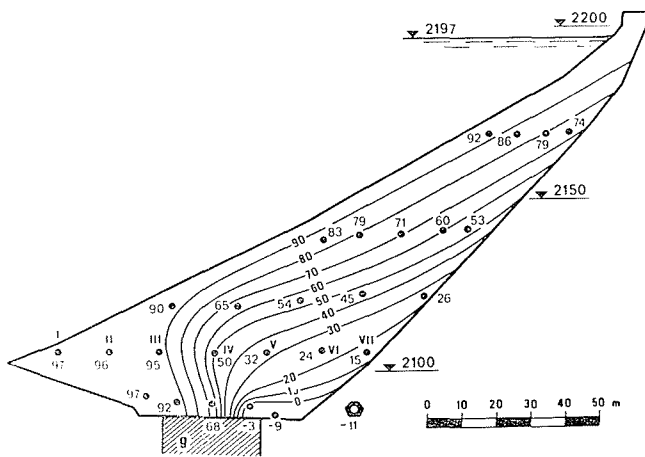
k_a : essais par abaissement ;



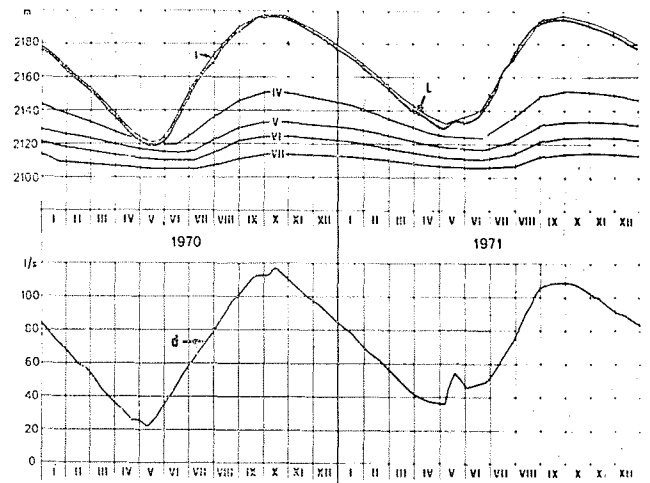
5/ Engins du type « bottom dump » pour la mise en place du noyau.



6/ Tassement de la galerie de drainage pendant la durée de construction.



7/ Lignes équipotentielles dans le noyau dans le profil moyen à retenue pleine.



8/ Mesures des pressions interstitielles dans le profil moyen et mesures du débit d'eau de drainage.

k_p : essais de pompage ;

$$k_m = \sqrt{k_a \cdot k_p}$$

Selon cette méthode on a obtenu une valeur moyenne pondérée pour l'ensemble de voile en terrain meuble de

$$k = 6 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$$

ce qui correspond bien avec les résultats des mesures de contrôle exécutées durant les cinq dernières années d'exploitation.

Grâce aux mesures des valeurs de perméabilités dans les différentes zones du terrain vierge et du terrain injecté et sur la base d'essais d'injection exécutés dans le laboratoire de mécanique de sol de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich avec des coulis de silicate pur dans des terrains artificiels on a pu établir une table de injectabilité telle que suit :

VALEUR k DU SOL NATUREL (cm/s)	VALEUR k APRÈS INJECTION SUR ÉPROUVETTE EN LABORATOIRE		
	argile/ciment	bentonite	silicate
10^{-1}	10^{-3}	$10^{-5} \div 10^{-6}$	—
$10^{-1} \div 10^{-2}$	$10^{-2} \div 10^{-3}$	10^{-5}	—
$10^{-2} \div 10^{-3}$	ininjectable	$10^{-4} \div 10^{-5}$	10^{-6}
$10^{-3} \div 10^{-4}$	ininjectable	ininjectable	$10^{-5} \div 10^{-6}$
10^{-4}	ininjectable	ininjectable	10^{-5}

On y remarque entre autre que déjà à partir de $k = 10^{-2} \text{ cm/s}$ un sol n'est pratiquement plus injectable avec un coulis argile/ciment Ce fait n'est peut-être pas suffisamment connu par les ingénieurs et peut conduire à de faux espoirs pendant l'établissement d'un projet.

7. — Mesures de contrôle pendant l'exploitation

Il n'existe que peu de digues en terre qui sont aussi intensément contrôlées que celle de Mattmark. Les mesures de tassements de la fondation de la digue ont déjà été mentionnées, en outre les déformations du remblai sont contrôlées par des repères de tassements, des dilatomètres et des mensurations géodésiques. Mais les valeurs qui nous intéressent ici plus particulièrement sont celles des mesures de pression intérieure d'eau dans le noyau et des percolations.

Les pressions sont entièrement enregistrées par des cellules hydrostatiques qui sont liées chacune par deux tuyaux en matière synthétique à des manomètres installés dans la chambre de mesure sur rive droite à l'aval de la digue.

Les valeurs mesurées sont très concluantes et sur les cent cellules il n'y en a qu'environ cinq qui ne fonctionnent plus d'une façon satisfaisante après 8-10 ans.

Le comportement de la digue est très constant. Ainsi par exemple pendant deux années de remplissages maximum (1970 et 1971) l'allure des pressions intérieures ne montre pratiquement pas d'irrégularité.

Les valeurs hydrostatiques sont indiquées dans la figure 7 pour le jour où la retenue a atteint la cote 2 197 (oct. 1970). Les lignes équipotentielles tracées sur la base des mesures apparaissent très régulières et plausibles. Il est d'ailleurs intéressant de remarquer que ces lignes se redressent fortement vers l'écran d'injection et qu'à cette place l'épaisseur pratique du noyau n'est que de 20 m.

Pour les cinq cellules de base I, IV, V, VI et VII la figure 8 montre l'allure des pressions pendant les remplissages et vidanges successifs. En plus les débits de percolation captés dans la galerie de drainage sont indiqués en fonction du niveau du lac. Le maximum de 110-115 l/s se compose de 50 l/s environ à travers le noyau, 55 l/s à travers l'écran d'injection dans le terrain meuble et 10 l/s environ à travers le rocher autour du barrage qui évidemment fut aussi injecté jusqu'à une certaine profondeur.

8. — Conclusions

La digue de Mattmark avec son noyau morainique relativement perméable et son écran d'injection en terrain meuble de 25 000 m² de surface représente un ouvrage où les méthodes d'exécution ont dû être très soigneusement développées pour que l'ouvrage puisse satisfaire aux critères économiques.

Chaque 1/sec d'eau perdu par percolation continue représente un capital d'environ 100 000 francs suisses, de sorte que certaines investigations supplémentaires pour la

réduction de la perméabilité du remblai et du sous-sol étaient justifiées. Mais il est évident que le bon comportement de la digue et de l'écran doit être contrôlé et à ce but servent les deux installations indispensables suivantes :

- la galerie de drainage à l'aval du noyau qui assure l'élimination de toute pression intérieure hydrostatique dans le corps aval ;
- les mesures de contrôle de la pression hydrostatique dans le noyau ainsi que les mesures de débit, des caractéristiques chimiques et de la turbidité de l'eau de percolation.

Discussion

Présidents : MM. J.-C. VAN DAM et J. FLORENTIN

M. le Président VAN DAM remercie le Dr GILG pour son exposé particulièrement clair et remarquablement illustré par de belles « diapositives ». Il ouvre ensuite la discussion.

M. POST pose la question ci-après :

M. GILG nous a montré tout l'intérêt de la galerie de drainage à l'aval du noyau de Mattmark et je partage pleinement cette conception. Toutefois, compte tenu du délavage (ou de la dissolution) de l'écran d'injection observé ces dernières années, n'y aurait-il pas eu intérêt à prévoir une galerie d'injection sous le noyau pour reprendre le traitement de l'écran si nécessaire ?

Je crois, répond M. GILG, qu'une galerie d'injection est aussi une bonne solution mais il faut la réaliser pratiquement au milieu du noyau. Cela aurait donc conduit à deux galeries ; comme il est ici possible, en abaissant le niveau de la retenue, de faire des injections à travers la digue en cas de nécessité, on a renoncé à ce système.

M. POST est aussi favorable à la solution adoptée. A cette occasion, il signale que beaucoup de galeries d'injection se compor-

tent en fait comme des galeries de drainage : cela a été le cas notamment au barrage de Saint-Cassien, au barrage de Gréoux et même, dernièrement, pour les galeries dans le rocher sous le noyau au barrage d'Ait Aadel. Les galeries d'injection ne sont pas parfaitement étanches et ont un effet de drainage appréciable avec des débits de fuite très faibles.

Sur une question de M. le Professeur THIRRIOT, M. GILG précise que, lors de la mise en service d'une digue en terre, une partie de ses déformations sont non réversibles. Mais après quelques années d'exploitation, l'ouvrage présente des déformations de caractère élastique. Ce point intéressant a été très souvent constaté. Peut-être est-ce plus visible pour les matériaux morainiques employés en Suisse que pour les matériaux que l'on a utilisés en d'autres endroits. Mais on constate, qu'après un certain temps, les déformations des digues deviennent plus ou moins réversibles.

M. le Président clôt la discussion en remerciant ceux qui l'ont animé et donne la parole à M. CHADEISSON pour l'exposé de sa communication, laquelle en l'absence de M. KAZDA sera la dernière de cette séance.