

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 84 (1958)
Heft: 2

Artikel: Essais de mise en pression de la galerie d'amenée Dixence-Bagnes:
aménagement hydro-électrique de la Grande Dixence
Autor: Cottier, R. / Welti, G.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-63477>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (S.V.I.A.)
de la Section genevoise de la S.I.A.
de l'Association des anciens élèves de l'E.P.U.L. (Ecole polytechnique
de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'E.P.F. (Ecole
polytechnique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE

Président: J. Calame, ing. à Genève
Vice-président: † G. Epitoux, arch. à Lausanne
Membres:
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: Cl. Groscurin, arch.; E. Martin, arch.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Gardel, ing.; A. Chevalley, ing.; E. d'Okolski, arch.;
Ch. Thévenaz, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: A. Stucky, ing.
Membres: M. Bridel; R. Neeser, ing.; P. Waltenspuhl, arch.
Adresse: Ch. de Roseneck 6, Lausanne

RÉDACTION

D. Bonnard, ing.
Rédaction et Edition de la S. A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Adresse: Case Chauderon 475, Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 26.—	Etranger.	Fr. 30.—
Sociétaires	»	» 22.—	»	» 27.—
Prix du numéro	»	» 1.60		

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »,
N° II. 57 75, Lausanne.

Adresser toutes communications concernant abonnement, changements
d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie La Concorde, Terreaux 29,
Lausanne

ANNONCES

Tarif des annonces:
1/1 page Fr. 275.—
1/2 » » 140.—
1/4 » » 70.—
1/8 » » 35.—

Adresse: Annonces Suisses S. A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. Lausanne et succursales

**SOMMAIRE**

Essais de mise en pression de la galerie d'aménée Dixence-Bagnes, par R. Cottier, ingénieur, et G. Welti, géologue

BIBLIOGRAPHIE

Les Congrès
Assemblée annuelle du Comité national suisse pour l'irrigation et les drainages — Centrales thermiques et hydrauliques
modernes — Premier congrès international des techniques du vide
Carnet des concours — Documentation générale — Service de placement

ESSAIS DE MISE EN PRESSION DE LA GALERIE D'AMENÉE DIXENCE-BAGNES

Aménagement hydro-électrique de la Grande Dixence

par R. COTTIER, ingénieur et G. WELTI, géologue

Avant-propos

Les essais de mise en pression décrits ci-après sont le couronnement du long et pénible labeur qui a permis de réaliser avec la galerie Dixence-Bagnes une œuvre à plusieurs égards exceptionnelle.

En prenant, fin 1952, la décision de supprimer la centrale de détente, primitivement projetée au pied du barrage, et de soumettre la galerie d'aménée de l'usine de Fionnay à la pression directe de 200 à 220 m du lac de la Grande Dixence, il n'avait pas été envisagé de renforcements proprement dits des revêtements de la galerie. En revanche, on avait prévu la nécessité de travaux d'étanchement très importants. Les tronçons extérieurs de la galerie devaient être d'emblée étanchés jusqu'à une grande profondeur, au moyen d'injections systématiques de ciment. Dans la partie centrale du tunnel, le danger de pertes d'eau semblait très réduit et l'on s'était réservé de

déterminer en cours de travail jusque à quelle limite il convenait de pousser l'étanchement des secteurs intermédiaires.

Les retards survenus dans la construction de la galerie eurent pour conséquence de réduire à un minimum le temps disponible pour l'exécution des injections, de sorte que finalement seuls les tronçons dont la couverture de roche est plus faible que la hauteur statique correspondant au niveau du lac plein, furent traités. En revanche, sur ces secteurs, l'étanchement fut poussé aussi loin que possible, dans la conviction qu'il était judicieux de concentrer tous les moyens disponibles sur les secteurs les plus vulnérables et d'en assurer une bonne étanchéité, avant de soumettre la galerie aux essais de pression.

La possibilité de procéder pendant les premiers mois de 1957 à des essais de mise en charge systématiques et ensuite de parfaire l'étanchement, aux points où cela

pouvait se révéler nécessaire, présentait un très gros avantage, car elle permettait d'ordonner efficacement les travaux.

La Direction de Grande Dixence est à féliciter d'avoir fait le nécessaire pour que ces essais puissent être entrepris, préparés si soigneusement et poursuivis pendant une longue période. Deux éléments étaient, en effet, nécessaires pour arriver à un résultat suffisamment précis. D'une part, une longue durée de la mise en charge et, d'autre part, le sectionnement de la galerie en tronçons de mesures, afin de contrôler le comportement de zones très diverses, conditions qui n'étaient pas simples à réaliser.

Bien que l'élévation progressive de la nappe d'eau dans la montagne, au cours de la mise en pression de la galerie, ait été d'emblée considérée comme le facteur essentiel pour maintenir les fuites du tronçon central, de plus de 5 km de longueur, dans des limites admissibles, on ne peut manquer d'être surpris par les résultats obtenus. En effet, l'ampleur et la durée des phénomènes de saturation de la roche sont telles que, pendant l'avant-dernière et la dernière semaine de charge à la pression maximum, les fuites du secteur central diminuaient de moitié par semaine. Elles n'étaient plus que de 15 l/s, lorsque l'alimentation par pompage a été interrompue et la seule baisse consécutive de pression de 20 à 18 kg/cm² a suffi pour provoquer un retour d'eau, de la montagne dans la galerie, d'un débit au moins égal, probablement supérieur à 15 l/s.

L'étanchéité des autres tronçons, déjà excellente pour les dimensions de la galerie et de la haute pression à laquelle elle a été soumise, a très certainement encore été améliorée par les injections complémentaires.

Le résultat final n'est pas seulement très réjouissant pour Grande Dixence, mais il constitue aussi une expérience de grande valeur pour la construction de galeries à haute pression.

H. JUILLARD, ingénieur-conseil, Berne.

I. Description de l'ouvrage

Pour situer la galerie soumise aux essais décrits ci-dessous, nous rappelons brièvement les données générales de l'aménagement hydro-électrique de la Grande Dixence. Situé dans les Alpes valaisannes, sur le flanc gauche de la vallée du Rhône, il comporte principalement :

1. Un réseau général d'adduction (environ 92 km de galeries) situé approximativement à 2400 m au-dessus du niveau de la mer et collectant les eaux des deux rives du haut de la vallée de Zermatt, du vallon de Ferpècle, du vallon d'Arolla et de celui de Vouasson. Le volume total des eaux captées sera d'environ 410 millions de m³ par année.
2. Un bassin d'accumulation dont la retenue maximum est fixée à la cote 2364.00. Le nouveau barrage, du type poids et de 284 m de hauteur, est situé à l'aval de l'ancien barrage de la Dixence, qui est noyé depuis la fin du mois de juillet 1957. La capacité de retenue a ainsi été portée de 50 millions de m³ à 400 millions de m³.
3. Une nouvelle galerie d'aménée de 8600 m de longueur environ, de pente 1,92 ‰, partant de la nouvelle prise d'eau (radier à la cote 2162.70) et aboutissant à la chambre d'équilibre de Louvie, sur la rive droite de la vallée de Bagnes.
4. Un puits blindé conduisant l'eau de Louvie à la centrale de Fionnay.

5. La centrale de Fionnay, située à la cote 1490 et équipée de six groupes (deux turbines Pelton par groupe). Son débit maximum est de 45 m³/sec et sa puissance installée de 463 200 ch.
6. Un bassin de compensation de 230 000 m³, situé à Fionnay également.
7. Une deuxième galerie d'aménée de 16 km de longueur, conduisant l'eau de Fionnay à la chambre d'équilibre de Peroua.
8. Une conduite forcée suivie d'un puits blindé aboutissant à la centrale de Nendaz.
9. La centrale de Nendaz, située à la cote 478 et équipée de six groupes. Son débit maximum est de 45 m³/sec et sa puissance installée de 540 000 ch.

Les essais de mise en pression décrits dans cette publication ont porté sur la galerie d'aménée Dixence-Bagnes, indiquée sous le chiffre 3 ci-dessus.

La disposition de l'ensemble est représentée par la figure 1.

Le profil en long général est donné par la figure 2.

Les profils en travers sont donnés par la figure 3, sur laquelle deux schémas type d'injection sont également représentés.

Pour les essais, l'extrémité Chargeur a été obturée par un bouclier provisoire, l'avancement des travaux du barrage et la construction de la vanne en tête de la galerie n'ayant pas permis l'utilisation directe de l'installation définitive. Ce bouclier était suivi d'un tronçon blindé de 25 m de longueur.

L'obturation, côté Louvie, a été réalisée au moyen de la vanne de garde \varnothing 3 m du puits blindé. Cette vanne est précédée par un tronçon blindé de 188 m de longueur.

La partie médiane, non blindée et mesurant 8013 m, est revêtue sur toute sa longueur soit par du béton coffré, mais non armé (58 %), soit par du béton projeté (27 %), soit par de la gunite (15 %). Les différentes zones où ont été appliqués ces traitements ont été déterminées : a) par la nature du rocher rencontré ; b) par l'épaisseur de la couverture de rocher. Les deux extrémités (tronçons 1 et 4) ont été spécialement injectées partout où la couverture de rocher n'atteignait pas la hauteur correspondant au niveau statique maximum, soit 200 m au Chargeur et 220 m à Louvie.

Dans la partie centrale (tronçon 2), le revêtement n'a été complété en principe que par des injections de bourrage, étant admis que cette partie ne saurait donner lieu à des fuites, mais serait plutôt susceptible de fournir un apport d'eau, vu l'importante couverture de rocher.

Le tronçon 4, où le rocher rencontré s'est montré mauvais et où des venues d'eau sont apparues en cours d'exécution, a été revêtu et, aux endroits délicats, injecté.

Toutes les injections ont été faites au ciment Portland.

Pour apprécier la qualité des injections d'étanchéité réalisées, nous indiquons que l'absorption moyenne a été de 610 kg de ciment Portland par mètre courant de galerie pour l'extrémité côté Chargeur et de 1830 kg/m pour l'extrémité côté Louvie.

Les venues d'eau constatées avant le traitement par injections et après traitement complet (avant les essais) ont été les suivantes :

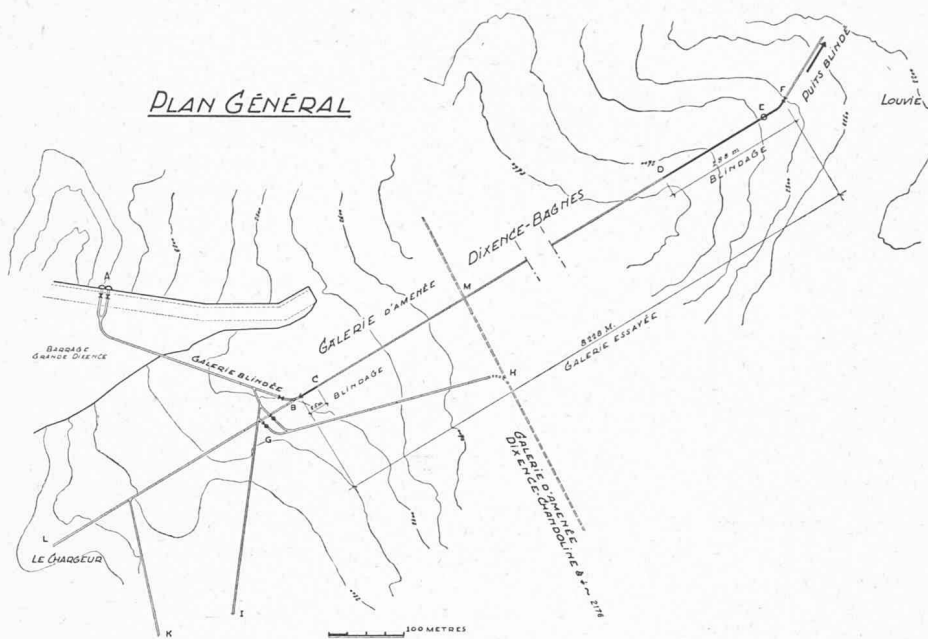


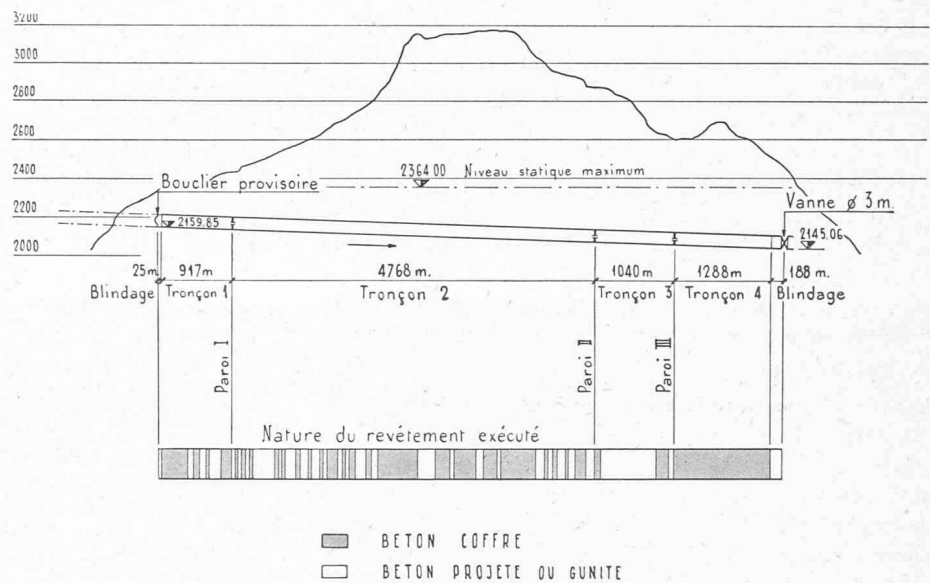
Fig. 1. — Plan d'ensemble

Etat pendant les essais :

- CD = 8013 m de galerie non blindée, pression maximum 22 atm.
- B = Bouclier provisoire.
- E = Insertion de la chambre d'équilibre munie d'un bouclier provisoire. m
- F = Vanne de garde \varnothing 3 m fermée pendant les essais.
- G = Réduction de pression pour la chute de Chandoline.
- GH = Galerie de liaison à Chandoline, exécutée sauf le raccordement H.
- A = Prise d'eau.
- AB = Galerie blindée.
- GI = Galerie de vidange principale.
- BK = Galerie d'accès.
- L = Station de pompage utilisée pour les essais.
- M = Prise d'eau dans la Galerie Dixence-Chandoline (2 tuyaux d'amenée \varnothing 300 et \varnothing 250 sur le tronçon ML)

en B et F = Emplacements des appareils de mesure.

Fig. 2. Profil en long de la galerie



PROFILS - TYPES

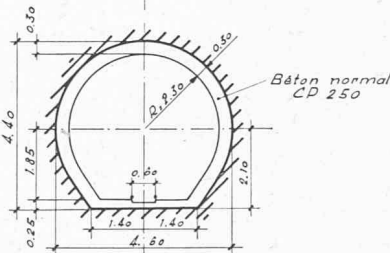
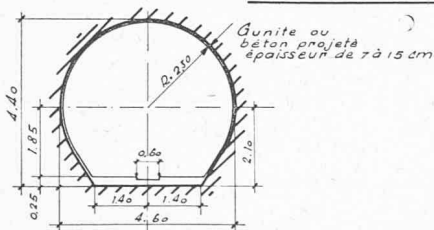
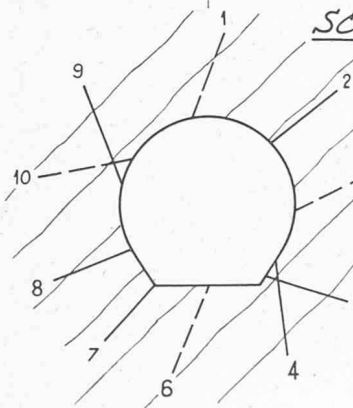


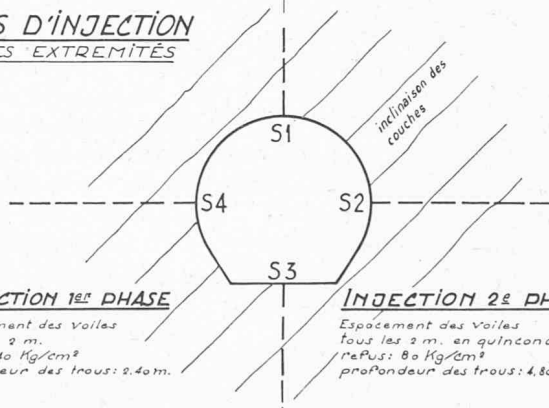
Fig. 3. Profils en travers type de la galerie et schémas d'injection

SCHÉMAS D'INJECTION DES EXTREMITÉS



INJECTION 1^{re} PHASE

Espacement des Voiles tous les 2 m.
 rePus: 40 Kg/cm²
 profondeur des trous: 2.40m.



INJECTION 2^e PHASE

Espacement des Voiles tous les 2 m. en quinconce
 rePus: 80 Kg/cm²
 profondeur des trous: 4.80m.

ESQUISSE TECTONIQUE

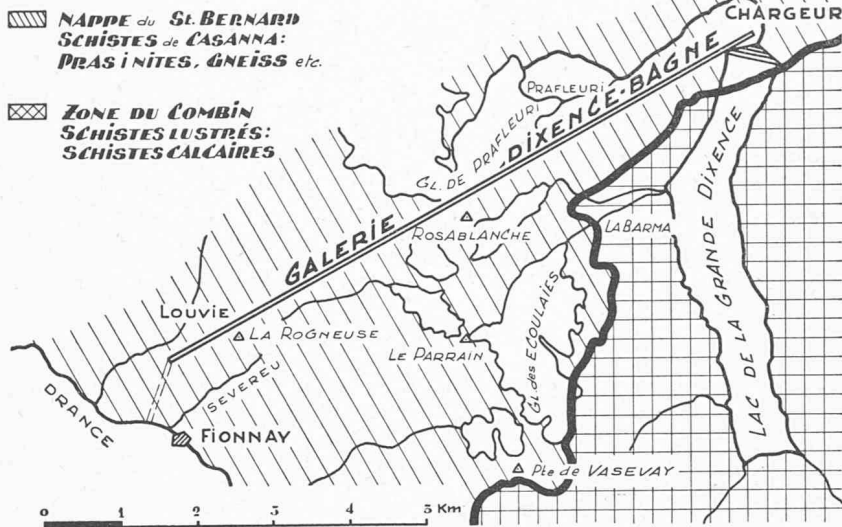


Fig. 4 — Plan géologique

Distance	Avant traitement	Après traitement
tronçon 1	environ 2 l/sec	environ 0 l/sec
» 2	80 »	75 »
» 3	30 »	14 »
» 4	10 »	9 »
Total	1221/sec	98 l/sec = 353 m ³ /h

Sur toute la longueur de la galerie, l'eau d'infiltration s'est révélée pratiquement non agressive pour le béton (PH entre 6,5 et 7, de 0 à 40 mg de SO⁴ par litre et environ 6 mg de CO² libre par litre). Au milieu de la galerie, la température du rocher mesurée a atteint un maximum de 15°, tandis que les eaux de sources en galerie n'ont jamais dépassé 9°.

Dans cet article, nous avons voulu donner un aperçu du déroulement des essais de pertes d'eau, des résultats que l'on a recherchés du point de vue pratique et sans y attacher un caractère de recherche scientifique. Par la même occasion, nous avons aussi voulu mettre en relief les difficultés d'organisation, d'installation et d'exécution qui ont été rencontrées, en particulier par le fait des délais assez courts qui nous étaient impartis et aussi par le fait que tout le travail de l'essai devait être inséré dans un programme d'autres travaux déjà très chargé.

II. Géologie (voir fig. 4)

La galerie d'amenée Dixence-Bagnes est entièrement située dans les « schistes de Casanna » de la nappe du Saint-Bernard.

Sous le nom de « schistes de Casanna » (donné au début du siècle par Theobald qui en fit la première étude) se trouve réunie une grande variété de roches. Depuis, de nombreux auteurs se sont attachés à l'étude de cette série métamorphique et ont proposé des classifications nouvelles. Malgré cela les « schistes de

Casanna » restent, du point de vue stratigraphique, un problème pour l'instant résolu en partie seulement.

Nos recherches ont porté plutôt sur leur composition pétrographique et minéralogique ainsi que sur la tenue des différents types de roche.

Comme le montre l'esquisse tectonique, le tracé de la galerie est plus ou moins parallèle à la limite sud de la nappe du Saint-Bernard. C'est la raison pour laquelle la galerie a, sur de grandes distances, cheminé non seulement dans les mêmes formations, mais souvent dans un même niveau. Lorsqu'il s'agissait d'une série de roche compacte et résistante, l'avancement s'est effectué sans éboulement ni effondrement. Tel ne fut, bien entendu, pas toujours le cas. Les zones de mauvaise tenue étaient partiellement d'origine tectonique et présentaient de nombreuses cassures et plans de charriages. La seule zone

fortement tectonisée a été rencontrée au km 3,2, côté Chargeur. La roche y était par place complètement écrasée et transformée en « mylonite ».

La direction de la plupart des accidents tectoniques était perpendiculaire à l'axe de la galerie et leur pendage subvertical. Cette circonstance fut, à tout point de vue, très favorable et permit de réduire au minimum les soutènements.

Les types de roche rencontrés lors du percement peuvent être classés en trois groupes :

- les roches vertes (prasinites, amphibolites, etc.) ;
- les phyllithes ;
- les micaschistes chloriteux (quartzites chloriteux, etc.).

Dans la galerie Dixence-Bagnes, les roches de loin les plus fréquentes appartiennent au premier groupe. Les deux autres, très subordonnées, n'étaient rencontrées qu'en intercalations restreintes aux limites diffuses. Notons encore la présence de faciès de passages entre ces divers groupes, montrant par là leur proche parenté.

En raison de leur plus faible dureté, les phyllithes ont été les seules roches à offrir quelques difficultés aux constructeurs. Les zones aquifères étaient exclusivement concentrées dans la partie aval (Louvie) de la galerie.

III. But et nature des essais

Le but des essais était de déterminer les pertes d'eau lorsque la galerie serait sous une charge correspondant au régime de l'exploitation future.

Afin de localiser ces pertes autant que possible, nous avons divisé la galerie en quatre parties (tronçons 1, 2, 3, 4). Les installations de pompage et le temps disponible ne permettant pas de procéder isolément à l'essai de chaque tronçon, ceux-ci ont été séparés par trois parois étanches (parois I, II, III), munies chacune d'un débitmètre avec transmission électrique à l'une ou l'autre extrémité de la galerie (cette installation est décrite plus en détail dans le chapitre suivant). Cette disposition pouvait indiquer immédiatement l'absorp-

tion de chacun des compartiments ainsi que les mouvements éventuels d'eau pouvant avoir lieu d'un compartiment à l'autre. Il est bien entendu qu'on pouvait ainsi mesurer seulement les pertes totales pour chaque tronçon, déduction faite des apports des sources pouvant éventuellement subsister après la mise en pression. Il n'est en effet pas possible de dissocier les pertes et les afflux d'eau existant entre deux parois successives.

La pression maximum de l'essai a été fixée à 20,2 kg/cm² au Chargeur et à 22,0 kg/cm² à Louvie, ce qui correspond à un niveau statique à la cote 2364, soit la cote maximum de la retenue, barrage terminé.

Les différentes phases prévues étaient :

1. Remplissage de la galerie.
2. Mise en pression de la galerie par les apports naturels uniquement. Ceci devait faire connaître la pression moyenne des venues d'eau en galerie.
3. Mise en pression par pompage. Périodiquement, le pompage devait être interrompu, la pression mesurée à la fin de l'interruption donnant l'état de remplissage des vides du rocher. Pompage avec débit maximum jusqu'à ce que la pression de l'eau pompée atteigne la valeur maximum fixée (20,2 kg/cm² au Chargeur).
4. Maintien de la pression à la valeur maximum (20,2 kg/cm² au Chargeur) par diminution progressive du débit pompé. Cette phase devait être poursuivie pendant une période assez longue jusqu'à ce qu'on observe que le débit pompé ait une valeur pratiquement stable. De courtes interruptions de pompages devaient également indiquer l'état de remplissage du rocher.
5. Arrêt total du pompage et observation de la diminution de la pression et des mouvements d'eau pouvant avoir lieu d'un compartiment à l'autre.
6. Fin de l'essai et vidange de la galerie.

Pour les opérations 2 à 5 ci-dessus, nous avons prévu une durée approximative d'un mois. Elles ont duré effectivement quarante-neuf jours.

IV. Description de l'installation d'essai

La figure 5 donne le schéma complet de l'installation. Sans faire donc une description d'ensemble, nous reprendrons ci-dessous quelques points particuliers méritant de plus amples commentaires.

Le problème de l'installation des divers organes nécessaires aux essais a été particulièrement compliqué par le fait du programme des travaux à observer pour l'ensemble de la galerie Dixence-Bagnes et plus spécialement pour l'extrémité côté Chargeur.

En effet, il importait de poursuivre les injections dans la galerie le plus longtemps possible avant les essais. La période située entre la fin des essais (fin mars) et la mise en eau définitive (mi-juillet 1957) devait également être utilisée à des travaux d'injection, sans perte de temps. D'autre part, les travaux des blindages entre la nouvelle prise d'eau et la vanne de garde \varnothing 3 m au Chargeur et les travaux en cours des réducteurs de pression devaient être entravés le moins possible. L'adduction d'eau de l'ensemble des chantiers Chargeur-Blava ne devait pas non plus être compromise.

Ces nécessités nous ont conduit à adopter une installation pouvant être préparée avec un minimum de répercussion sur les travaux indiqués ci-dessus.

Les parois intermédiaires furent, pour ces raisons, exécutées en construction métallique. Chacune de ces

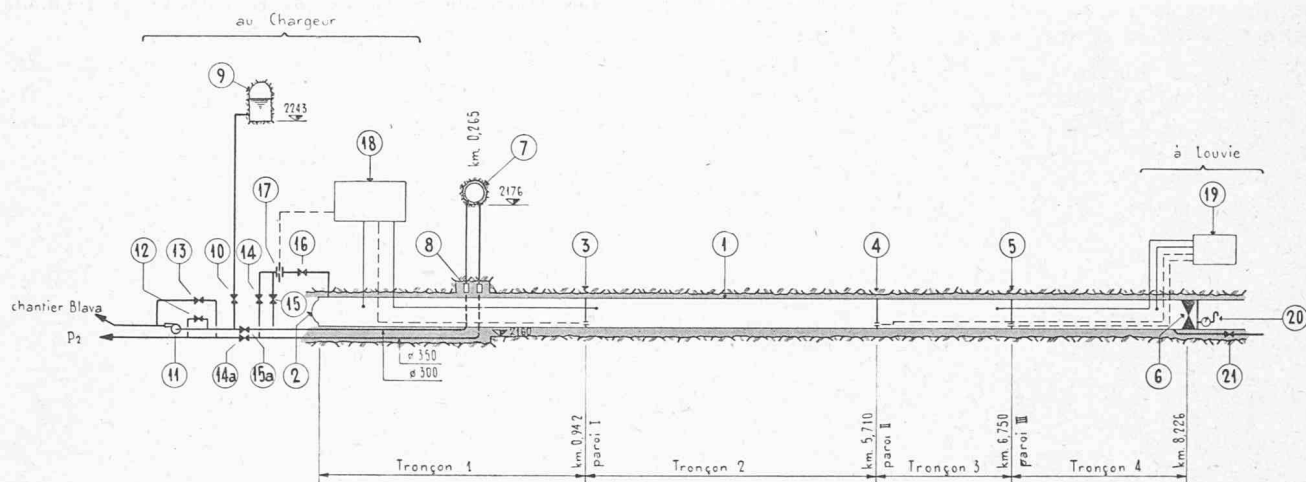


Fig. 5. — Schéma d'installation des essais

- | | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Galerie soumise à l'essai. 2. Bouclier provisoire \varnothing 3,30 m au Chargeur. 3. Paroi métallique munie d'un compteur Woltmann \varnothing 300 mm avec transmission électrique au Chargeur. 4. } Parois métalliques munies de compteurs Woltmann \varnothing 350 mm 5. } avec transmission électrique à Louvie. 6. Vanne \varnothing 3 m. 7. Galerie d'aménée Dixence-Chandoline avec prises d'eau pour l'alimentation en eau du chantier et des essais. 8. Clapets et vannes sur les conduites \varnothing 300 et \varnothing 350 mm. 9. Galerie Cleuson-Dixence avec prise d'eau \varnothing 350 mm pour l'alimentation en eau du chantier et des essais. 10. Vanne \varnothing 300. 11. Station de pompage P_1 utilisée pour les essais (la deuxième station de pompage P_2 est restée complètement affectée aux besoins du chantier pendant les essais). 12. } By-Pass \varnothing 300 avec vannes. 13. } 14. } 15. } Vannes \varnothing 300 sur dérivations. 16. } | <ol style="list-style-type: none"> 14a. } Vannes \varnothing 300 sur conduites d'alimentation du chantier. 15a. } 17. Diaphragme pour mesure du débit pompé. 18. Tableau de mesure au Chargeur comprenant les appareils suivants : <ol style="list-style-type: none"> a) un compteur débitométrique relié au diaphragme ; b) un compteur volumétrique relié au diaphragme ; c) l'enregistrement du débit pompé ; d) compteur à lecture directe du débit à travers la paroi I ; e) un manomètre branché sur les tronçons 1 ou 2 ; f) un manomètre à contact relié à un klaxon d'alarme ; g) un manographe enregistrant la pression dans les compartiments 1 ou 2 ; h) un manomètre à poids de haute précision branché sur les tronçons 1 ou 2. 19. Tableau de mesure à Louvie comprenant les appareils suivants : <ol style="list-style-type: none"> a) un manomètre pouvant être branché sur les tronçons 3 ou 4. b) un compteur à lecture directe du débit à travers la paroi II. c) un compteur à lecture directe du débit à travers la paroi III. d) un manomètre à poids branché sur les tronçons 3 ou 4. 20. Compteur d'eau indiquant les pertes de la vanne \varnothing 3 m. 21. Vidange \varnothing 300 mm. |
|---|--|

parois était munie d'un compteur Woltmann, en sorte que la pression qu'elles avaient à supporter correspondait à la perte de charge à travers ce compteur, soit au maximum 0,3 atm pour le débit prévu. Pour tenir compte d'une obstruction partielle de la grille ou du compteur, elles ont été calculées pour une pression de 0,6 atm s'exerçant sur la face amont.

La figure 6 illustre la construction d'une de ces parois. Tous ses éléments ont été montés boulonnés, sauf la cerce scellée qui a été laissée en place après les essais. La porte centrale n° 8 et le compteur ont été mis en place au dernier moment, afin de laisser aux convois la possibilité de passer jusqu'à dix jours avant le remplissage de la galerie. Le trou d'homme n° 9, que l'on pouvait ouvrir par des poignées, soit de l'amont, soit de l'aval, a permis le passage des hommes jusqu'au moment du remplissage.

Le compteur Woltmann était muni d'une petite magnéto quadripolaire donnant une tension proportionnelle au débit passant à travers le compteur. Cette tension était transmise par câble Tdc à deux conducteurs de 2,5 mm² au Chargeur pour la paroi I et à Louvie pour les parois II et III. Il faut remarquer que le câble de la paroi II comportait plus de 2,5 km de longueur. La sensibilité des appareils permettait de mesurer les débits supérieurs à 40 m³/h. Les appareils ne donnaient pas non plus directement le sens de l'écoulement : si une inversion avait lieu, elle n'était lisible que par un passage de l'aiguille sur le 0 du cadran, deux débits égaux à travers un compteur, mais de sens inverses se lisant par un même chiffre.

Une purge d'air a été prévue à l'extrémité amont (point haut) de chaque compartiment. A cet effet, on a utilisé les tuyaux d'air comprimé qui avaient servi à l'exécution de la galerie. Ces purges d'air donnaient par la même occasion les pressions de chaque tronçon, ce qui permettait de déceler une obstruction possible d'un

des compteurs signalée par une différence de pression exagérée entre deux côtés d'une paroi.

Pour les parois II et III, la pose de la porte centrale 8 et des compteurs a été particulièrement difficile puisqu'elle a dû être faite alors qu'un débit d'environ 90 l/sec s'écoulait dans la galerie.

Le bouclier provisoire, côté Chargeur, a également dû être posé en un temps très restreint. Son diamètre était de 3,30 m. Il a été amené de l'atelier en une seule pièce et soudé directement sur une bride qui avait été spécialement prévue. Un trou d'homme a permis le passage jusqu'au dernier moment et dès la vidange terminée.

L'alimentation en eau a été le problème le plus délicat des installations. Bien que les essais aient eu lieu en hiver, c'est-à-dire en dehors de la période de bétonnage du barrage, il importait de continuer à assurer un débit convenable aux besoins courants des chantiers de construction du barrage. Avant la mise en eau du nouveau barrage, toute l'eau était prélevée à la galerie d'aménée Dixence-Chandoline (Première Dixence, au point M de la figure 1 ou au point 7 de la fig. 5), les deux tuyaux d'alimentation \varnothing 300 et \varnothing 350 étant placés de M à B (fig. 1) dans la galerie Dixence-Bagnes soumise aux essais. Or ces tuyaux, posés au début du chantier, puis noyés dans le béton, n'avaient pas été prévus pour supporter une pression extérieure égale à celle engendrée par les essais. Il ne pouvait donc être question, pendant la période de mise en pression au-dessus de 10 atm, de se ravitailler en eau par ce moyen ; il fallait au contraire mettre ces tuyaux sous la même pression intérieure que celle de la galerie. C'est la raison pour laquelle, tant que la pression dans la galerie était supérieure à 10 atm, il a fallu s'alimenter entièrement par la galerie de refoulement de Cleuson à la Dixence. Ceci impliquait évidemment, pendant cette période, un pompage permanent de Cleuson à Dixence d'un débit au moins égal à 500 l/sec. Lorsque la pression dans la galerie était inférieure à 10 atm, il était de nouveau possible de soutirer de l'eau à la galerie d'aménée Dixence-Chandoline. Comme il était impossible de manœuvrer des vannes au point M (voir fig. 1, ou au point 7 de la fig. 5), il a fallu installer des clapets en ce point.

La pression de l'eau soutirée ne pouvait donc dépasser 8 atm. Pour obtenir une pression supérieure dans la galerie essayée, l'eau était reprise par une station de pompage (point L de la fig. 1 au point 11 de la fig. 5)

PAROIS INTERMÉDIAIRES

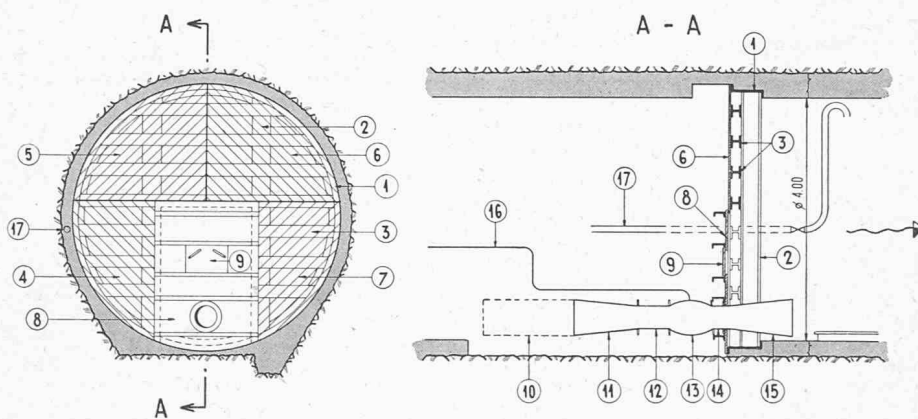


Fig. 6. — Détail d'une paroi intermédiaire

1. Cerce scellée dans le béton.
2. Montants DIN 26.
3. Traverses DIN 14.
4. } Panneaux en tôle de 8 mm boulonnés.
5. }
6. }
7. }
8. Porte en tôle de 8 mm et UPN 12.
9. Trou d'homme avec poignées manœuvrables des 2 côtés.
10. Grille \varnothing 450 mm en treillis de 1,50 m de longueur.
11. Cône de réduction.

12. Régulateur de jet.
13. Compteur Woltmann \varnothing 300 mm ou 350 mm.
14. Tronçon rectiligne.
15. Diffuseur.
16. Câble étanche Tdc à 2 conducteurs.
17. Tuyau d'air comprimé utilisé comme purge d'air et prise de pression.

Toute la construction est assemblée uniquement par boulons. L'étanchéité des joints est réalisée par bandes d'un produit à base de caoutchouc et bitume posées à chaud.

déjà installée pour les besoins du chantier du barrage. Le débit maximum prévu pour les essais de la galerie était d'environ 280 l/sec. La pression de 35 atm donnée par la station de pompage était réduite par les vannes 14, 14a et 16 (voir fig. 5). La vanne 15 était ouverte et la vanne 15a fermée, en sorte que la pression intérieure dans les deux conduites \varnothing 300 et 350 mm égalait celle de la galerie, tout risque d'écrasement des tuyaux étant écarté.

L'appareillage de mesure est spécifié dans la légende de la figure 5.

Au Chargeur, il permettait notamment : a) la lecture directe et l'enregistrement du débit total pompé dans la galerie, mesuré par diaphragme ; b) la lecture du volume pompé ; c) la lecture directe du débit à travers la paroi I ; d) la lecture des pressions par manomètre à cadran ou à poids des compartiments 1 et 2 ; e) l'enregistrement de l'une ou l'autre de ces pressions.

A Louvie, il permettait : a) la lecture directe des débits à travers les parois II et III ; b) la lecture des pressions par manomètre à poids ou à cadran des compartiments 3 et 4 ; c) la mesure des pertes de la vane-papillon \varnothing 3 m.

Les lectures des appareils ont été faites en principe toutes les heures et en même temps au Chargeur et à Louvie. Pendant la vidange de la galerie, les lectures ont été faites toutes les quatre heures.

Une liaison téléphonique était installée entre Le Chargeur et Louvie, les essais demeurant commandés depuis Le Chargeur.

Précisons tout de suite que les installations décrites ci-dessus aussi bien que l'organisation mise en place à cette occasion ont donné toute satisfaction, les quelques petits accidents imprévisibles que nous mentionnons au chapitre suivant n'ayant absolument pas faussé les essais.

V. Déroulement des essais

Les essais se sont déroulés conformément aux différentes phases prévues que nous avons indiquées dans le chapitre III (but et nature des essais).

La figure 7 donne la suite des opérations avec toutes les mesures effectuées, dès la fin du remplissage de la galerie.

Sur ce diagramme, nous avons reporté principalement : 1° le débit total introduit dans la galerie au Chargeur ; 2° le débit à travers chacune des trois parois intermédiaires. La différence de débit entre deux parois successives donne le débit absorbé par le compartiment compris entre ces deux parois (raisonnement évidemment valable aussi pour le compartiment 1 compris entre l'origine de la galerie et la paroi I, ainsi que pour le compartiment 4 compris entre la paroi III et la vanne \varnothing 3 m à Louvie) ; 3° la pression mesurée dans la galerie côté Chargeur ; les pressions dans chacun des compartiments 2, 3 et 4 n'ont pas été reportées, car, à la différence de niveau près, elles ont été pratiquement semblables à celle mesurée dans le compartiment n° 1.

Nous donnons ci-dessous quelques commentaires sur chacune des différentes phases opératoires.

A. Remplissage de la galerie.

Il s'est effectué simultanément de deux manières : par l'apport naturel des sources (au total 98 l/sec, débit jaugé initialement par déversoir à Louvie) et par introduction d'eau au Chargeur provenant de la galerie Dixence-Chandoline, sans pompage, jusqu'à concurrence de 500 l/sec, débit maximum pouvant être supporté par le compteur Woltmann \varnothing 300 mm de la paroi I.

Les opérations de remplissage ont donné lieu à divers petits imprévus inévitables dans une opération de ce genre : soit, entre autres, une connexion du câble de transmission d'un des compteurs a lâché au dernier moment et, bien que la galerie ait été soigneusement nettoyée, deux des comp-

teurs ont été obstrués par des corps étrangers, principalement de la laine de bois. Une interruption du remplissage a donc dû être faite pour procéder aux réparations. Ce dernier travail n'a certes pas été facile, étant donné que la hauteur d'eau atteignait plus de 1,60 m à l'amont d'une des portes et nous avons même dû recourir à un scaphandrier.

Il est évident que la phase de remplissage et, dans une moindre mesure, celle de vidange de la galerie, étaient les plus délicates quant aux risques éventuels d'obstruction des filtres en treillis et des compteurs. Le fort courant d'eau s'écoulant pendant ces deux périodes dans le fond de la galerie alors qu'elle n'est pas complètement pleine suffit pour entraîner des matériaux qui restent en place dans d'autres conditions.

Par le fait de ces divers incidents, le remplissage a duré trois semaines.

Nous avons eu la certitude qu'il était complet lorsque les purges d'air disposées au point haut de chaque compartiment et débouchant soit au Chargeur, soit à Louvie ont débité régulièrement de l'eau. Dès ce moment ces mêmes conduites ont pu indiquer la pression dans chaque tronçon.

L'eau introduite dans la galerie était naturelle, sans adjonction de fluorescéine ou autre produit de coloration. Il en a été de même pour la durée des essais.

B. Mise en pression par l'apport naturel des sources.

Lorsque le remplissage complet a été vérifié, nous avons isolé complètement la galerie en interrompant toute entrée d'eau au Chargeur. Nous devons ainsi mesurer la pression maximum que les apports naturels pouvaient engendrer et, accessoirement, la rapidité de l'augmentation de cette pression.

Les mesures ont commencé le 18 janvier et ont été poursuivies jusqu'au 26, soit pendant huit jours. Le second jour, la pression a augmenté de 0,4 atm en vingt-quatre heures, tandis que le huitième jour cette augmentation a été de 0,3 atm, la valeur atteinte étant de 3,1 atm (mesurée au Chargeur.)

Cet essai ayant une importance moindre que la mesure des pertes proprement dites, nous l'avons interrompu pour consacrer davantage de temps à la suite des mesures.

Pendant cet essai, les compteurs des parois intermédiaires n'ont fourni aucune indication, ce qui laisse supposer que les débits à travers ces parois ont toujours été inférieurs à 40 m³/h (11,1 l/sec). Il n'est donc pas possible de préciser l'apport ou les fuites de chacun des compartiments et seule la pression moyenne a été mesurée.

C. Mise en pression par pompage.

Dès le 27 janvier, nous avons commencé la mise en pression de la galerie par pompage. Au début de cette phase, nous avons introduit dans la galerie le débit maximum permis par les installations, soit en moyenne 850 m³/h avec des pointes de 1000 m³/h.

Le pompage avec débit maximum a été poursuivi jusqu'au 14 février (soit pendant vingt jours), date à laquelle la pression maximum que nous nous étions fixée (20,2 kg/cm² au Chargeur) a été atteinte. Pendant cette période, nous nous sommes efforcés de pomper un débit constant, mais des raisons pratiques (en particulier l'influence des besoins du chantier sur le débit disponible pour la galerie) n'ont pas permis d'observer complètement cette règle. L'augmentation journalière de la pression a cependant peu varié : de 0,5 à 0,7 atm.

Pendant la période où l'on a refoulé de l'eau dans la galerie, de courtes interruptions de pompages ont été faites à intervalles variables de deux à cinq jours. Ces interruptions d'une durée moyenne d'environ une heure, permettaient en quelque sorte d'ausculter le massif rocheux traversé par la galerie, de connaître son état de remplissage. La chute de la pression mesurée pendant l'un de ces arrêts correspond à la charge nécessaire pour créer le passage de l'eau à travers les fissures de la roche.

Durant cette première étape, la répartition des pertes d'eau (visibles sur le graphique) dans les différents tronçons a peu varié. Lorsque la pression de pompage, sous un débit moyen de 850 m³/h, a atteint 20,2 kg/cm² au Chargeur, les absorptions étaient les suivantes :

Compartiment 1 :	environ	100	m ³ /h
»	2 :	»	430 »
»	3 :	»	250 »
»	4 :	»	70 »

Dès le 14 février jusqu'au 4 mars, soit pendant dix-huit jours, le débit à l'entrée de la galerie a été constamment

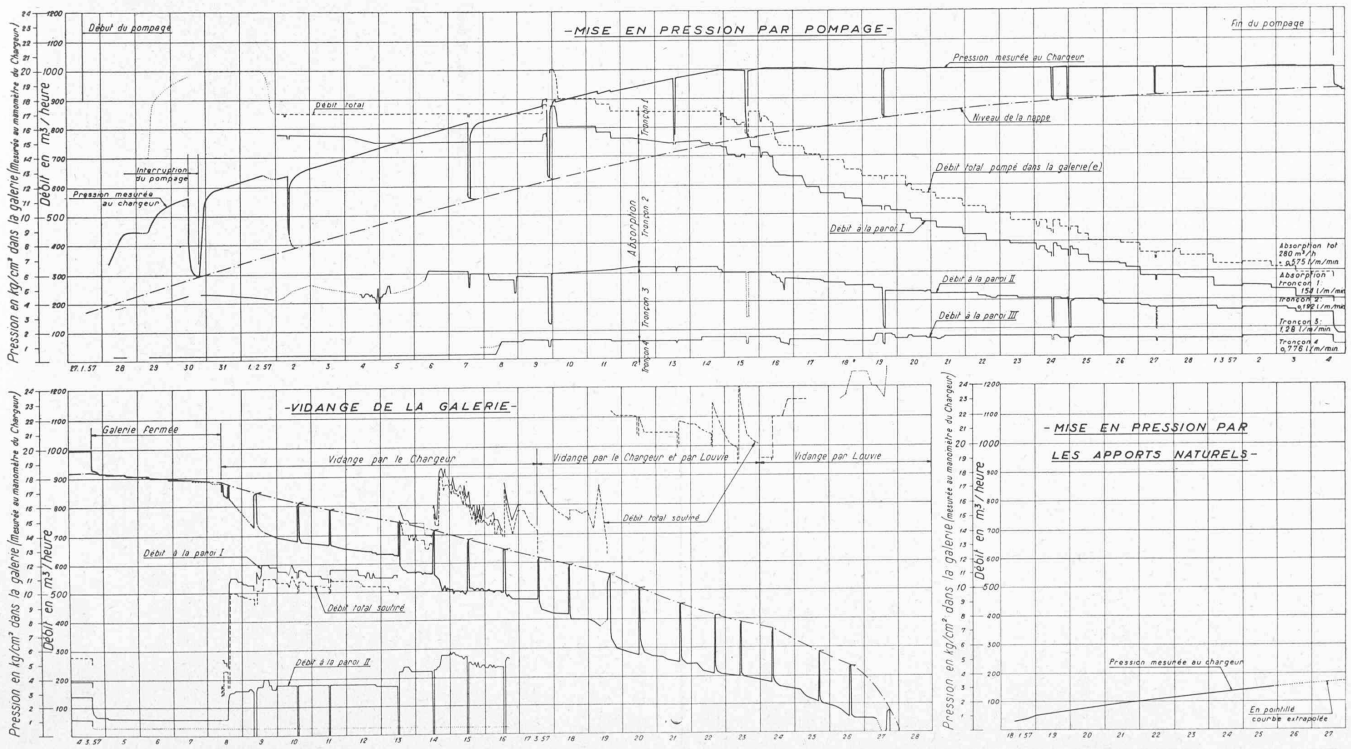


Fig. 7. — Déroulement des essais

réglé à la main, de manière à ce que, pendant le pompage, la pression mesurée au Chargeur soit égale à 20,2 atm (en fait les manomètres étaient situés à 4 m au-dessus de l'axe de la galerie, c'est pourquoi le graphique indique la valeur moyenne d'environ 19,8 atm au lieu de 20,2 atm). Les variations de pression étant lentes, jamais le klaxon d'alarme, se mettant en marche pour un écart de 1 atm par rapport à la pression nominale (20,2 atm), n'a eu à fonctionner.

Pendant cette phase, les mêmes coupures de pompage que précédemment ont été faites. On en profitait d'ailleurs pour faire différents travaux sur le réseau d'alimentation en eau.

Si les absorptions des tronçons 1 et 4 ont peu diminué, par contre celles du tronçon 3 et principalement celles du tronçon 2 se sont fortement réduites, d'une manière régulière. A la fin du pompage, elles n'atteignaient plus que les valeurs suivantes :

- Tronçon 1 85 m³/h,
soit 1,54 litre par minute et par m de galerie
 - Tronçon 2 55 m³/h,
soit 0,192 litre par minute et par m de galerie.
 - Tronçon 3 80 m³/h,
soit 1,28 litre par minute et par m de galerie.
 - Tronçon 4 60 m³/h,
soit 0,776 litre par minute et par m de galerie.
- Absorption totale 280 m³/h, soit 0,575 litre par minute et par m de galerie.

Etant donné ces résultats très favorables et le fait que les pertes ne diminuaient plus que lentement, il a été décidé d'arrêter le pompage à ce moment-là.

Pendant cet essai, les fuites extérieures ont été l'objet d'une surveillance très attentive. On peut, à ce propos, relever que :

- a) lorsque la pression de pompage a atteint 16 kg/cm², des suintements sont apparus dans la région des appareils de mesure au Chargeur ;
- b) lorsque la pression de pompage a atteint 18,5 kg/cm², une fuite de 2 l/sec a eu lieu par un tuyau de construction insuffisamment obturé à Louvie ;
- c) lorsque la pression de pompage a atteint 19,5 kg/cm², une fuite de 0,3 l/sec a été constatée à la sortie des blindages à Louvie et au sommet de ceux-ci (donc injections béton-rocher à compléter après les essais) ;
- d) à la pression maximum, les pertes de la vanne \varnothing 3 m à Louvie étaient de 0,1 l/sec ;
- e) les venues d'eau dans la galerie de liaison à Chandoline (tronçon GH de la figure 1, spécialement à proximité du point H) ont atteint, avec la pression maximum d'essai, la valeur de 10 l/sec, tandis qu'avant le remplissage de la galerie Dixence-Bagnes, on ne constatait que 3 l/sec. L'augmentation était donc de 7 l/sec ;
- f) aucune fuite appréciable n'a pu être constatée ni dans le vallon de Praffleuri-Dixence, ni sur le flanc de la montagne côté Louvie.

Le total des pertes constatées et désignées sous les lettres a) à e) était donc de 10 l/sec. Comme cette eau apparaissait en des endroits bien déterminés et que l'on peut supposer avoir pratiquement supprimé ces écoulements, par des injections appropriées, avant la mise en eau définitive, la perte totale de la galerie Dixence-Bagnes se trouve réduite à 67,7 l/sec, ce qui, pour 8013 m de galerie non blindée, correspond à 0,500 l/min/mètre. Ce chiffre ne tient évidemment pas compte de l'effet des autres injections que celles indiquées ci-dessus et pouvant encore être faites dès la fin des essais jusqu'à la mise en service de la galerie (du 15 avril au 15 juillet 1957).

A titre documentaire, ajoutons encore que le remplissage de la galerie a nécessité environ 140 000 m³ d'eau, tandis que la mise en pression en a demandé 561 000 m³.

D. Galerie complètement fermée.

Dès le 4 mars, soit dès la fin du pompage, la galerie a été complètement isolée, conformément au programme prévu. Si l'alimentation de la galerie était interrompue, les observations ont cependant été poursuivies.

Aussitôt que le pompage dans la galerie a été arrêté, la pression est descendue de 19,9 atm (mesure au niveau des appareils) à 18,6 atm dans l'intervalle d'une heure. Ensuite, elle a diminué d'une manière presque constante pour atteindre la valeur de 17,6 atm au 8 mars, date à laquelle nous avons commencé la vidange de la galerie.

Pendant cette période, seul le compteur de la paroi II a donné une indication : le débit s'écoulant du compartiment n° 2 dans le compartiment n° 3 était constamment de 60 m³/heure.

E. Vidange de la galerie.

Pour la vidange de la galerie, certaines précautions étaient à prendre pour éviter un décollement du revêtement, spécialement du béton projeté et de la gunite. En effet, lorsqu'on soutire à un moment donné de l'eau à la galerie, il se produit une baisse rapide de la pression, laquelle se stabilise ensuite pour un débit constant. C'est le phénomène inverse de ce qui se produisait pendant les arrêts de pompage lors du remplissage de la galerie. Cette baisse de pression correspond à une perte de charge due à l'écoulement de l'eau dans les fissures du rocher et au travers du revêtement. Le fait que cet écoulement est concentrique en direction de la galerie laisse croire que ces pertes de charge sont de plus en plus fortes à mesure qu'on se rapproche de la galerie, puisque la vitesse de l'eau augmente également dans cette direction. On peut admettre que le revêtement participe pour une part importante à cette perte de charge, ce qui veut dire que, localement, il peut être soumis à une pression d'eau venant du rocher et égale à une fraction importante de la brusque baisse de pression enregistrée lors du début du soutirage.

Pour éviter des conséquences nuisibles de ce fait, nous avons fixé comme règle que cet écart de pression, dans l'intervalle approximatif d'une heure, ne devait pas dépasser 4 kg/cm². Il est évident que cette diminution de la charge au début du soutirage est équivalente à l'augmentation de pression lorsqu'on arrête brusquement le soutirage. C'est la raison pour laquelle, presque chaque jour pendant la vidange de la galerie, nous avons procédé à un arrêt du soutirage. La courbe reliant les points de pression ainsi obtenues donnait en même temps l'état du sommet de la nappe d'eau dans le rocher. Cette condition imposait le débit maximum que l'on pouvait soutirer à la galerie.

Du 8 au 17 mars, la vidange a été faite uniquement par Le Chargeur, en utilisant les eaux pour les besoins normaux du chantier du barrage. Il importait en effet d'éviter autant que possible la vidange par Louvie où l'eau ne pouvait être récupérée que sur la chute Fionnay-Champsec, ce qui n'était pas avantageux financièrement parlant. Dès le 17 mars, le débit du Chargeur devenant insuffisant et le temps de vidange risquant d'être trop important, la vanne de purge côté Louvie a été ouverte à son tour. Cette vidange par les deux extrémités s'est poursuivie jusqu'au 23 mars. A cette date, ce sont 193 000 m³ d'eau qui ont ainsi pu être récupérés par Le Chargeur.

En date du 24 mars, la pression dans la galerie, par un débit de vidange de 960 m³/h, avait diminué à 3,7 kg/cm² (mesuré au Chargeur), en sorte qu'il n'était plus possible d'obtenir un débit appréciable au Chargeur. Dès ce moment, la vidange a été faite uniquement par Louvie. La première entrée d'air, côté Chargeur, a eu lieu le 27 mars et le 29 on pouvait ouvrir le trou d'homme au Chargeur.

A partir de ce moment, la galerie étant encore partiellement pleine, les mêmes difficultés que lors du remplissage sont apparues. Par le fait que tout l'écoulement avait lieu dans le fond de la galerie, quelques matériaux ont pu être entraînés et ont partiellement obstrué les grilles devant les compteurs. C'est ainsi que le compartiment 3 a mis plusieurs jours à se vider complètement.

Pendant la vidange de ce compartiment 3, le compartiment 4 était vide, mais il ne nous a pas été possible d'accéder à la paroi III (pour procéder à son ouverture depuis l'aval), pour une cause tout à fait imprévue. En effet, au lieu d'air pur introduit de l'extérieur, nous avons trouvé des « bouchons » de gaz carbonique et d'oxyde de carbone : les lampes à carbure s'éteignaient, les hommes avaient des nausées et des vertiges. La durée des appareils à oxygène à disposition (40 minutes) ne permettait pas non plus d'accéder au fond du tronçon, depuis Louvie. Ce n'est qu'à force de souffler de l'air comprimé par l'aération de ce tronçon que ces « bouchons » ont fini par se dissiper. Pendant ce temps la vidange du compartiment 3 s'est effectuée et, le 15 avril, on pouvait traverser la galerie.

La vidange avait duré 40 jours. Nous n'avons jamais pu expliquer la formation de ces bouchons de gaz.

Les mesures des différents appareils ont été faites pendant toute la durée de la vidange. Bien que présentant un intérêt limité du point de vue de l'essai proprement dit, elles n'en ont pas moins donné des renseignements utiles sur le déroulement des opérations de vidange.

VI. Interprétation des résultats

Pour l'analyse, nous reprendrons d'abord séparément chacune des phases décrites dans le déroulement des essais.

a) Mise en pression par les seuls apports naturels

L'examen du graphique de la pression enregistrée en fonction du temps et une extrapolation de la courbe permettent d'affirmer que la pression moyenne que l'on aurait pu atteindre par un essai prolongé aurait en tout cas été de 5 kg/cm² mesurée au Chargeur (niveau statique correspondant 2216). Rien ne permet cependant d'affirmer qu'elle n'aurait pas été encore plus élevée (ainsi que le démontrent les essais complémentaires faits ultérieurement; voir note 1, page 32).

Pendant l'exécution de la galerie, on a mesuré des pressions très basses, exceptionnellement 6 à 8 kg/cm², mais il faut relever que, lorsqu'on obture une source pour en mesurer la pression, presque toujours des résurgences apparaissent en d'autres endroits. En fait, nous ne pouvons pas déduire de ces mesures préliminaires la pression moyenne des apports naturels.

Le débit à travers les compteurs de chacune des parois intermédiaires n'étant pas suffisant pour fournir une indication, aucun mouvement d'eau d'un tronçon à l'autre ne peut être décelé.

b) Pompage d'eau dans la galerie jusqu'à ce que la pression de refoulement atteigne 20 atm

L'élévation de la pression ne s'est opérée régulièrement qu'à partir du 2 février. On peut observer que les courtes interruptions de pompage — d'ailleurs volontaires — n'ont pratiquement pas eu d'influence sur l'allure générale de la courbe des pressions.

Deux courbes de pression sont à distinguer: 1^o les pressions effectivement mesurées dans la galerie pendant le pompage avec un débit moyen de 850 m³/heure; 2^o la courbe reliant les points correspondant à la baisse de pression pendant les arrêts de pompage. Cette dernière courbe donne l'état d'imprégnation du rocher, c'est-à-dire approximativement le niveau maximum de la nappe dans la montagne à proximité de la galerie. La roche se remplit progressivement et fait office d'accumulation. Le niveau de la nappe d'eau atteint son maximum dans la région centrale de la galerie et s'abaisse aux extrémités.

La différence de pression entre les deux courbes correspond à la perte de charge engendrée par le passage de l'eau à travers les fissures du rocher et le revêtement.

Entre le début du pompage et le moment où la pression de 20 kg/cm² a été atteinte, cette différence de pression n'a pas sensiblement varié: pour le débit approximativement constant de 850 m³/h, elle se situe autour de 5,1 kg/cm². Le débit absorbé ne dépend pratiquement que de la pression de pompage, car l'influence de l'état de remplissage du rocher (hauteur de la nappe d'eau) n'apparaît pas. Ceci laisse d'ailleurs encore une fois supposer que ces pertes de charge ont lieu dans le voisinage de la galerie principalement (en confirmation de l'hypothèse énoncée à l'occasion de la vidange de la galerie, chapitre V, lettre E).

Les 31 janvier et 1^{er} février, le débit pompé a été de 1000 m³/h et la perte de charge correspondante peut être estimée, d'après le graphique, à 5,8 kg/cm² environ.

Les pertes de charges observées pour les débits de 1000 et 850 m³/h sont donc, grosso-modo, proportionnelles au débit, ce qui confirme l'hypothèse d'un écoulement laminaire prépondérant dans les fissures du rocher.

En ce qui concerne les pertes d'eau, on peut aussi observer qu'elles sont assez régulières pour chaque tronçon. On remarque bien, le 4 février, un accroissement des pertes du tronçon 1, qui passent de 75 m³/h à 100 m³/h. Cette variation n'a pas eu de répercussion visible sur la pression.

Les pertes des 2^e et 3^e tronçons se sont montrées pendant cette première phase assez constantes. En fait, il ne s'agit pas de pertes, mais plutôt d'absorption du rocher qui joue le rôle de réservoir. Les observations des phases suivantes le démontrent d'ailleurs.

Les pertes du 4^e tronçon n'ont pu être observées qu'à partir du 8 février, où elles ont atteint 60 m³/h sous environ 17 atm. Pour les pressions inférieures, ces pertes ont certainement dû augmenter progressivement, le manque de mesure incombant aux appareils trop peu sensibles. Les compteurs des parois I et II n'ont d'ailleurs pas accusé une brusque variation de débit à cette date.

c) Pompage à pression constante de 20 kg/cm²

Si la courbe de la pression de pompage est horizontale, la courbe de saturation relative du rocher s'élève progressivement jusqu'à la valeur de 18,3 kg/cm².

Là encore, la perte de charge correspondant à l'écart entre les deux lignes de pression est à peu près proportionnelle au débit, comme le montre le tableau ci-dessous:

Débit pompé	Perte de charge observée	Perte de charge calculée proportionnelle
850 m ³ /h	5,1 kg/cm ²	5,1 kg/cm ²
700 »	4,2 »	4,2 »
550 »	3,1 »	3,3 »
400 »	2,3 »	2,4 »
280 »	1,7 »	1,7 »

Si les pertes des tronçons d'extrémité ne varient pas d'une manière sensible en fonction du temps, il n'en est pas de même pour les tronçons 2 et 3. Ceux-ci, spécialement le tronçon 2, accusent une diminution très marquée de leurs absorptions. Il s'agit manifestement non pas de pertes proprement dites pour les deux tronçons centraux, mais d'un remplissage lent du rocher jouant le rôle de réservoir, ainsi que le démontre le reflux d'eau pendant l'abaissement de la pression dans la galerie. A la fin du pompage, le 2^e tronçon absorbait 55 m³/h ou bien 0,192 l par minute et par mètre de galerie, ce qui est exceptionnellement bas. Il est permis de supposer que si le pompage avait été poursuivi plus longtemps, cette absorption se serait transformée en apport d'eaux provenant des infiltrations.

Les tronçons d'extrémité, bien que traités spécialement du point de vue étanchéité, laissent s'écouler un débit de fuite, tandis que les tronçons centraux, spécialement le tronçon 2, font office d'accumulation, ayant même une possibilité d'apport. En service, l'accumulation d'eau dans ce massif central variera annuellement en fonction du niveau de retenue du lac de la

Grande Dixence. Comme ces variations seront beaucoup plus lentes que lors de la mise en pression durant les essais, la courbe de pression dans la galerie sera très proche de la courbe de saturation du rocher.

d) Galerie fermée

La baisse de pression, galerie fermée, a été, pour les 5, 6 et 7 mars, de 0,6 atm (de 18,3 à 17,7 atm). Ce résultat peut être comparé à celui de la mise en pression par les apports naturels où pendant les 23, 24 et 25 janvier, on a constaté un accroissement de pression de 0,8 kg/cm². L'asymptote horizontale vers laquelle ces deux courbes doivent tendre donnerait la pression hydrostatique moyenne naturelle dans la montagne. Nous ne connaissons cependant que la première partie de ces courbes et ne pouvons pas en tirer une conclusion valable.

e) Vidange de la galerie

Pendant la période où l'on a vidé par Le Chargeur uniquement, on peut constater que tous les compteurs installés aux parois intermédiaires, sauf le compteur III qui ne fournit pas d'indications lisibles, sont traversés par un écoulement dans le sens Louvie-Le Chargeur.

Le débit du compteur I est supérieur au débit soutiré au Chargeur, c'est-à-dire que le tronçon 1 continue à perdre, ce qui est normal. Les pertes cependant diminuent avec la pression.

Les tronçons 2 et 3, au contraire, donnent un apport d'eau : le massif central se vide. Du 8 au 27 mars, le volume global d'eau rendu par la montagne sur toute la longueur de la galerie peut être estimé à 370 000 m³.

La valeur des pointes de pression pendant un arrêt de la vidange n'ont plus, pour un débit soutiré, donné le même coefficient de proportionnalité que lors de la mise en pression, car la galerie se vide à la fois par Le Chargeur et par le rocher.

Dès le 13 mars, la vidange s'est déroulée d'une façon trop irrégulière pour pouvoir en tirer des conclusions utiles.

Résultats généraux

De ce qui précède, on peut déduire que l'écoulement à travers le revêtement et le rocher est principalement laminaire, c'est-à-dire que la charge nécessaire à l'écoulement de l'eau dans les fissures est à peu près proportionnelle au débit.

Afin d'être fixé autant que possible sur ce qui se passera effectivement lorsque l'aménagement sera en service, on peut essayer d'établir une courbe des pertes en fonction de la pression dans la galerie.

Pour clarifier les idées, indiquons que le débit quittant la galerie, c'est-à-dire les pertes apparentes P_a , se subdivise d'une part en un débit P_i imbibant le rocher et un débit P_r correspondant aux pertes réelles.

$$P_a = P_i + P_r.$$

La proportion P_i/P_r est variable dans le temps avec l'état de remplissage du rocher.

Les pertes de charges engendrées par le passage de P_a sont données par la différence de pression existant entre la courbe de pression p de pompage et la courbe de remplissage du rocher p_r ; nous les appellerons H'_r .

Les pertes réelles P_r sont nulles (pertes compensées par les apports) pour la pression engendrée par les seuls

apports naturels (sources). Nous appellerons cette pression p_s .

Si l'on appelle H''_r les pertes de charge correspondant à P_r , H''_r est donné par la différence entre p_s et la courbe de l'état d'imbibition du rocher désignée par p_r .

La figure 8 donne une représentation qualitative des relations ci-dessus. Si le débit pompé dans la galerie, c'est-à-dire les pertes apparentes P_a sont fonction de la pression p régnant effectivement dans la galerie, les pertes réelles P_r ne sont fonction que de p_r .

Un premier point de la courbe $P_r = f(p_r)$ est donné par la perte totale à la fin du pompage : $P_a =$ environ P_r . Sous la pression $p = 19,9$ atm (mesurée au Chargeur), nous avons observé $P_a = 280$ m³/heure (nous avons déjà vu que ce résultat doit être rectifié; nous en tiendrons compte plus loin). Une extrapolation de la courbe pour le cas où le pompage aurait été prolongé permet d'estimer les valeurs correspondantes suivantes (la pression zéro correspond à un niveau de charge à la cote 2166) :

$$p = 19,9 \text{ atm (mesuré au Chargeur).}$$

$$\text{Plan de charge correspondant à } p : 2365.$$

$$p_r = 18,7 \text{ atm.}$$

$$\text{Plan de charge correspondant à } p_r : 2353.$$

$$P_a = P_r = 250 \text{ m}^3/\text{h.}$$

Ce dernier chiffre doit être considéré comme une limite supérieure, car il est possible que le tronçon 2 ait un effet plus favorable encore.

Un deuxième point serait donné par la pression engendrée par les apports naturels des sources uniquement, pour laquelle les apports compensent les pertes, donc $P_r =$ zéro. Nous ne connaissons cependant pas encore ce point.

Des points intermédiaires peuvent être établis sur la base du raisonnement suivant :

Entre deux moments quelconques de l'essai, on peut dire, par intégration des courbes de débit, le volume que l'on a introduit (V_i) ou soutiré à la galerie (V_s), mais on ne peut dissocier ce qui a été emmagasiné ($P_i \times$ intervalle de temps) de ce qui a été perdu (V_r). Un moyen d'éliminer le volume mis en réserve est de considérer l'intervalle compris entre l'instant correspondant à une valeur fixée arbitrairement sur la courbe p_r (remplissage du rocher) dans la phase de pompage et l'instant correspondant à la même valeur de p_r dans la phase de vidange. Au début et à la fin de l'intervalle considéré, l'état d'imbibition du rocher est approximativement le même, il n'y a plus qu'à chercher le volume d'eau absorbé et la pression moyenne. Il est évident que ce raisonnement peut être appliqué sur une partie seulement de la phase de remplissage comprise entre deux valeurs choisies p_{r1} et p_{r2} et sur la partie de la phase de vidange comprise entre les mêmes valeurs p_{r1} et p_{r2} .

Nous en donnons ci-dessous un calcul à titre d'exemple.

$$p_{r1} = 14 \text{ atm}$$

$$p_{r2} = 16 \text{ atm.}$$

Au remplissage : P_r moy = 15,1 atm
durée : du 13.II à 3 h au 18.II à 7 h :
124 h
 $V_i = 96\ 650 \text{ m}^3$

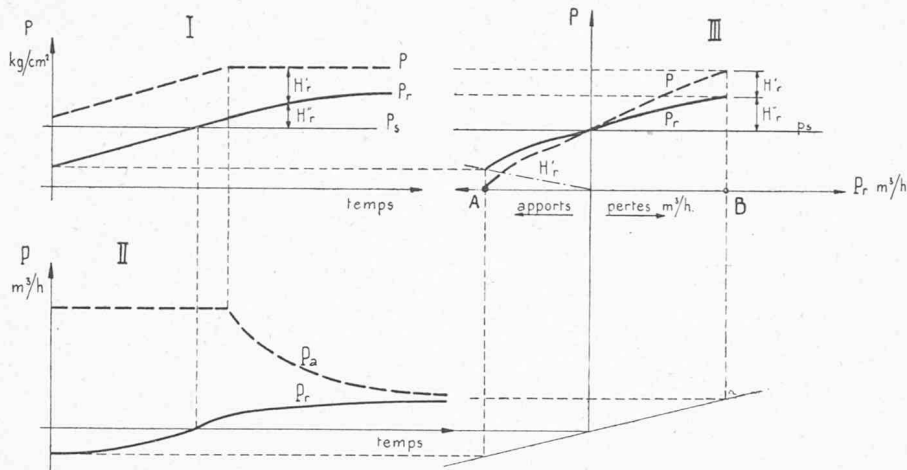


Fig. 8.

- I. Pression dans la galerie (p) et hauteur de la nappe (p_r) pendant l'essai, en fonction du temps.
- II. Pertes apparentes (P_a) et réelles ($P_r = p_r$ moins amenées) pendant l'essai, en fonction du temps.
- III. Pertes réelles ou apports en fonction de la pression dans la galerie (p) ou du niveau maximum de la nappe (p_r); $A =$ apports naturels dans la galerie avant les essais, la galerie étant vide; $B =$ pertes réelles (fuites-amenées) pour la charge maximum. Ce graphique suppose pour chaque point une pression permanente et invariable dans la galerie.

A la vidange : p_r moy. = 15,25 atm
 durée du 10. III à 22 h au 14. III à 24 h :
 98 h
 $V_s = 57\,300 \text{ m}^3$

Total : $V_r = V_i - V_s = 39\,350 \text{ m}^3$
 durée totale : 222 h
 $P_r = \frac{39\,350 \text{ m}^3}{222 \text{ h}} = 177 \text{ m}^3/\text{h}$
 p_r moy. : 15,16 atm.

Nous avons répété l'opération et trouvé ainsi plusieurs points qui sont reportés sur la figure 9. On obtient alors le débit de perte P_r en fonction du niveau maximum de la nappe d'eau dans le rocher (p_r). Le point pour lequel le débit de perte est nul donne la pression naturelle des apports pour laquelle la galerie reçoit autant d'eau qu'elle en perd. Cette pression est de 7,6 atm environ, ce qui correspond à la cote 2242.

Sur le même graphique, nous avons reporté également les pertes en fonction de la pression dans la galerie (ou du niveau de retenue du lac). La différence de pression donnée par les deux courbes est, pour un même débit P_r , égale à H'_r calculé précédemment. Elle varie à peu près linéairement en fonction du débit. Cette dernière courbe est établie pour un régime permanent à chaque pression considérée. En fait, il faut encore tenir compte du débit P_i (imbibition du rocher) s'ajoutant à P_r lorsque le niveau de retenue s'élève ou se retranchant de P_r lorsque ce niveau s'abaisse, les pertes de charges H_r variant dans les mêmes proportions. Il n'est cependant pas possible d'établir cette ligne cyclique, car on ne peut prévoir à l'avance les variations annuelles exactes du niveau du lac. La courbe indiquée du débit de pertes réelle P_r en fonction de la pression dans la galerie n'est donc qu'une moyenne des courbes correspondant à la montée et à la descente du lac, en supposant de plus que le niveau de la nappe a le temps de suivre les variations de la retenue. Cette supposition est légitime puisqu'il ne s'agit que d'un cycle annuel de cette variation de niveau, tandis que pendant les essais, le cycle a duré environ deux mois et demi.

Il est bien entendu que ce graphique des pertes réelles en fonction de la pression ne peut avoir la prétention d'une exactitude rigoureuse, car il est basé sur la courbe de remplissage du rocher qui n'a pas pu être fixée avec une précision certaine. Il aurait fallu procéder à des interruptions de pompage ou de vidange

plus rapprochées et surtout plus longues. Elle donne cependant un ordre de grandeur utile pour l'exploitation.

Bien que l'écoulement laminaire ait été vérifié dans ses grandes lignes, on constate qu'il s'agit d'une courbe et non d'une droite, c'est-à-dire que les pertes réelles P_r ne sont pas tout à fait proportionnelles à la pression, mais augmentent plus rapidement. Ceci est explicable par le fait qu'il est normal que, lorsque la nappe s'élève, l'eau trouve des sorties nouvelles.

Sur la même figure 9, nous avons aussi reporté, pour mémoire, une courbe des apports en fonction du niveau maximum de la nappe et de la pression dans la galerie. Il ne s'agit cependant que d'un rappel, car seuls les deux points extrêmes ont pu être établis : le point pour lequel le débit est nul, donné par la courbe des pertes réelles, et le point correspondant aux apports constatés de $353 \text{ m}^3/\text{h}$ avant les essais, par galerie vide depuis longtemps. Entre ces deux points, la précision insuffisante de la courbe d'imbibition du rocher, surtout dans la phase de vidange, ne permet pas de trouver des valeurs sûres du débit d'apports (par le procédé de calcul utilisé précédemment).

D'autre part, nous avons vu que les pertes qui ont pu être localisées à leurs points de sortie atteignaient, sous la pression maximum, 10 l/sec , soit $36 \text{ m}^3/\text{h}$. On peut admettre que ces pertes ont pu être arrêtées par les injections ayant eu lieu entre la fin des essais et la mise en eau définitive, ce qui ramène les pertes réelles maximums de 250 à $214 \text{ m}^3/\text{h}$. En réalité, les travaux d'injection qui ont été poussés le plus possible aux deux extrémités pendant le temps disponible auront certainement pu ramener ces pertes à une valeur notablement inférieure. Elles décroissent linéairement pour être nulles lorsque la cote de retenue est de 2242 environ¹.

¹ Cette cote de 2242 est celle qui découle des essais faits en janvier, février et mars 1957. Il est cependant fort possible qu'elle soit variable au cours de l'année. En effet, pendant l'automne 1957, après la mise en eau définitive, des essais de mesure de la pression ont été refaits, galerie fermée aux deux extrémités. Cette fois, la cote de 2255 a été atteinte ($8,9 \text{ kg/cm}^2$ de pression mesurée au Chargeur à la cote 2166). Au début, l'accroissement journalier de la pression était également plus fort au cours de ce deuxième essai qu'en janvier 1957. Ces faits peuvent être expliqués par deux raisons : a) principalement l'effet des injections exécutées entre le 15 avril et le 15 juillet 1957 (mise en eau définitive) qui a certainement renforcé l'étanchéité des tronçons d'extrémité; b) les apports naturels qui peuvent être un peu plus importants en été qu'en hiver. Chacun de ces deux facteurs peut contribuer à une élévation de la pression moyenne engendrée par les apports naturels.

Pour terminer, il est intéressant d'apprécier la capacité du réservoir constitué par le massif rocheux que traverse la galerie. Elle est donnée par la différence entre le volume pompé et le volume calculé par l'intégration des pertes réelles P_r (déjà trouvées en fonction de la pression) entre deux instants dont on connaît le niveau maximum de la nappe correspondant. Ce calcul se fait sur le graphique 7. C'est ainsi que l'on peut trouver que pour faire passer le haut de la nappe de la cote 2242 à la cote 2350, (maximum atteint pendant les essais) le rocher doit absorber un volume approximatif de 117.000 m³ d'eau.

VII. Conclusions

De l'exposé qui précède, on peut dégager en conclusion les points principaux suivants :

1. Les installations d'essai telles qu'elles ont été conçues et exécutées, ont donné toute satisfaction. L'essai simultané de plusieurs tronçons de la galerie, rendu possible par l'installation des parois intermédiaires munies de compteurs avec transmission à distance, a permis d'économiser un temps précieux. Il a aussi permis d'ausculter la galerie considérée dans son ensemble, sous les mêmes conditions que pendant l'exploitation.
2. Les essais se sont déroulés normalement, selon les prévisions. Pour faire apparaître des pertes réelles se rapprochant d'un régime permanent, il a fallu pomper à pression constante pendant 18 jours à partir du moment où la pression maximum a été atteinte dans la galerie. La vidange de la galerie a duré quarante jours, par le fait de divers imprévus. Grâce aux précautions prises, le revêtement de la galerie a été retrouvé intact après les essais.

3. A la pression d'essai correspondant à la cote de retenue maximum du lac, les pertes réelles ont été d'environ 250 m³/h. En fait, les travaux d'injection exécutés entre la fin des essais et la mise en eau auront certainement permis de les ramener à une valeur notablement inférieure.
4. Les mesures effectuées ont permis de déterminer que la pression approximative engendrée dans la galerie par les apports naturels seuls s'établissait à 7,6 kg/cm² (mesurée au Chargeur) au début de l'année 1957. Les observations faites en automne 1957 ont montré que cette pression a atteint 8,9 kg/cm². Cette amélioration est également due en grande partie aux injections exécutées entre temps.
5. Les hypothèses faites par les ingénieurs responsables de la construction de la galerie ont été confirmées : les pertes se localisent principalement à chaque extrémité, tandis que la partie centrale de la galerie se comporte plutôt comme un réservoir. Il est possible que cette partie centrale fournisse un apport d'eau, même lorsque la galerie est soumise à sa pression de service maximum.

Ces résultats sont pleinement satisfaisants et, suivant les données en notre connaissance, cette galerie d'amenée peut être classée parmi les meilleures, compte tenu de la haute pression à laquelle elle est soumise.

Ajoutons enfin que ces essais ont pu être menés à bien grâce au dévouement le plus complet de tout le personnel ayant participé à ces travaux. Sans ce dévouement et sans l'intérêt porté par chacun à l'expérience, il est certain que la réussite de l'opération n'aurait pas été si complète.

Fig. 9.
Pertes réelles en fonction du niveau maximum de la nappe dans le rocher (en trait plein) et de la pression dans la galerie (en pointillé); correspond avec le niveau de retenue du lac.

Ce graphique suppose une variation très lente du niveau de retenue. Les courbes d'apport ne sont indiquées que pour mémoire.

