Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 82 (1964)

Heft: 2

Artikel: Observation des mouvements d'une nappe d'eau souterraine entourant une galerie d'adduction d'eau en rocher

Autor: Wilhelm, Jules

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-67425

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.01.2026

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

ORGAN DES SCHWEIZERISCHEN INGENIEUR- UND ARCHITEKTEN-VEREINS S.I.A. UND DER GESELLSCHAFT EHEMALIGER STUDIERENDER DER EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE G.E.P.

Observation des mouvements d'une nappe d'eau souterraine entourant une galerie d'adduction d'eau en rocher

DK 627.842.004

Par **Jules Wilhelm**, ingénieur à la Société Générale pour l'Industrie, succursale de Lausanne

I. Introduction

La présence d'eau entourant les galeries d'adduction percées dans les milieux rocheux soulève, en règle générale, un certain nombre de problèmes qui sont en relation directe ou indirecte avec l'entretien et le bon fonctionnement de l'ouvrage. Les problèmes peuvent se poser d'une manière particulièrement aigüe, lorsque l'on se trouve en présence d'une galerie sous pression d'un aménagement hydro-électrique, le plus souvent de section circulaire, dont certains tronçons doivent être renforcés ou rendus étanches. L'exactitude du dimensionnement d'un tel revêtement dépend dans une large mesure d'une connaissance exacte des charges, l'une étant précisément la poussée de l'eau souterraine s'exerçant depuis l'extérieur sur le revêtement étanche.

Dans les paragraphes qui vont suivre, nous allons décrire les expériences qui ont été faites dans ce domaine, dans un secteur de la galerie d'amenée de Nendaz de l'aménagement hydro-électrique de la Grande Dixence S. A. Il s'agit du compte rendu de près de 4 ans d'observations et de mesures, au terme desquelles l'équilibre des eaux souterraines peut être considéré aujourd'hui comme presque entièrement rétabli. Outre la connaissance de la valeur réelle de la pression d'eau extérieure, les installations et les instruments mis en place pendant les travaux ont permis d'obtenir quelques renseignements intéressants sur le mouvement des eaux en question.

II. Description générale de l'ouvrage qui a fait l'objet des observations

Les eaux de la Grande Dixence S. A., accumulées dans le lac artificiel du Val des Dix, sont utilisées en deux paliers comportant chacun une galerie d'amenée sous pression et une conduite forcée conduisant les eaux aux centrales de turbinage respectives [1]).

[1]) Voir à ce sujet l'article de M. Jacques Desmeules, directeur de la Grande Dixcence S. A., paru dans «Le Génie Civil» du 1. novembre 1957.

La galerie d'amenée de Nendaz fait partie du palier inférieur qui relie le bassin compensateur de Fionnay à la conduite forcée de la centrale de Nendaz, construite dans la vallée du Rhône. Le long de son parcours de plus de 16 km, la galerie traverse une très grande variété de zones géologiques dont les schistes de Casanna, ainsi que plusieurs complexes de roches schisteuses (schistes de Nendaz, Verrucano, roches appartenant toutes à la nappe du Gd. St. Bernard). Passant ensuite par un secteur de roches triasiques (calcaires, quartzites, anhydrites, etc.) la galerie franchit, sur les 2,5 derniers km de son traçé des roches carbonifères et aboutit à l'endroit dit Péroua, sur le versant gauche de la vallée du Rhône. Au cours de l'exploitation normale, la galerie est soumise à une pression statique maximum de 8 kg/cm² environ.

Le percement a été effectué en 8 attaques, à partir de 3 fenêtres intermédiaires (une à Sarreyer et deux à Isérables), ainsi que depuis Péroua, l'extrémité aval du tunnel, et de Fionnay (puits vertical).

Le profil en long de la fig. 1 montre, entre autres, la répartition des différentes zones géologiques rencontrées à partir de Péroua sur les premiers 600 m envrion. Il s'agit essentiellement de schistes carbonifères, plus ou moins mylonitisées, et de grès argileux, assez fracturés. Cette masse de carbonifères est séparée en deux par une couche de roches triasiques, composée principalement de gypse, d'anhydrite et de quartzites. L'inclinaison des couches, par rapport au plan horizontal, varie entre 30° et 40° environ, avec pendage descendant en direction de l'avancement. La direction des couches est sensiblement perpendiculaire à l'axe de la galerie. (Cette position n'a été troublée qu'au contact aval entre carbonifères et trias, où le pendage des couches tendait davantage vers la verticale).

Après quelques dizaines de mètres d'avancement en galerie relativement sèche, où la tenue du rocher était cependant médiocre (la fig. 2 montre le soutènement nécessité au carrefour C), des venues d'eau assez importantes ont

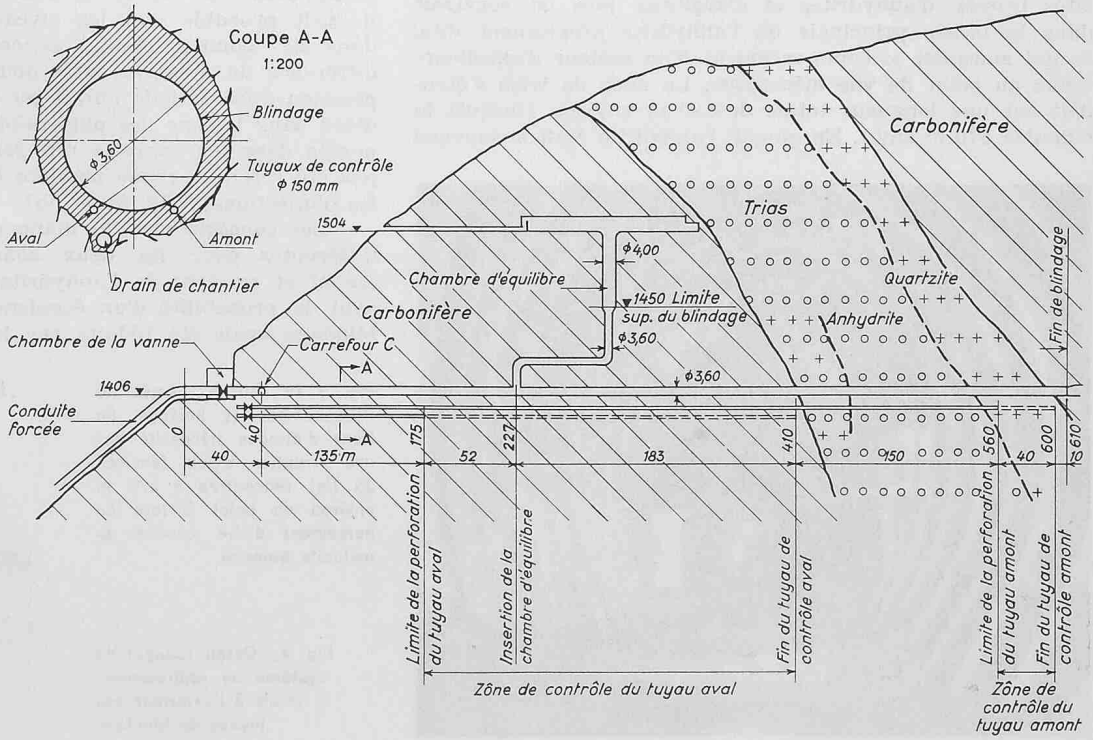


Fig. 1. Galerie d'amenée de Nendaz. Profil en long du secteur des tuyaux de contrôle extérieur à Péroua

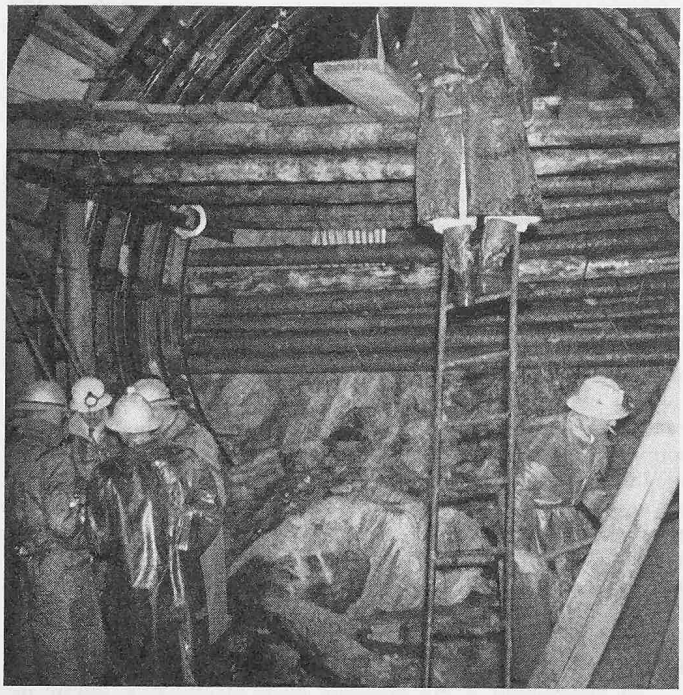


Fig. 2. Vue d'un tronçon de la galerie excavée avec étayage, au droit du carrefour «C» (intersection fenêtre — galerie)

été soudainement rencontrées en perçant une couche de roches mylonitisées, rendue imperméable par son caractère argileux. Cette mylonite faisait écran étanche et retenait en amont de l'eau emmagasinée dans la roche. Ce phénomène s'est produit à plusieurs reprises et chaque fois d'importantes venues d'eau ont surgi après le percement des couches étanches. Les quantités d'eau rencontrées attaignaient souvent 20 à 30 l/s, nécessitant l'arrêt de l'avancement et le boisage du front d'attaque (fig. 3). La majeure partie de l'eau accumulée entre deux couches de roches étanches s'évacuait en un ou deux jours, après quoi les travaux d'avancement pouvaient être repris. Cependant, jusqu'à la fin des travaux, des sources d'eau ont jailli en plusieurs de ces endroits.

C'est dans ces conditions qu'a été atteint, à 415 m du point «C» (carrefour fenêtre-galerie), le début de l'écharde triasique. Les premiers trente mètres de cette zone étaient constitués par une succession de couches de gypse, de quartzites broyés, d'anhydrites et d'argilites, puis on pénétrait dans la masse principale de l'anhydrite proprement dite, ce qui marquait le commencement d'un secteur d'excellente tenue au point de vue mécanique. La zone de trias s'étendait sur une longueur totale de 120 m environ (jusqu'à la cumulée 570 m env.). En amont, l'anhydrite était à nouveau séparée de la masse principale de carbonifères par une zone de quartzites d'une vingtaine de mètres d'épaisseur. Si l'anhydrite même, roche compacte sans faille ni fissure était complètement sèche, il n'en était pas de même des quartzites encadrant l'anhydrite en aval et en amont. Le même phénomène que celui décrit plus haut (vidange de la nappe d'eau) a été constaté en amont du trias, l'anhydrite compacte constituant une couche étanche par excellence.

L'équilibre naturel des eaux souterraines ainsi compromis par les travaux, il importait de savoir dans quelle mesure ce déséquilibre risquait de porter préjudice à la stabilité et au bon fonctionnement de l'ouvrage terminé. Pour parer à ces inconvénients, nous avons été amenés à prévoir des installations particulières permettant le contrôle et, en quelque sorte, la «régularisation» des nappes souterraines.

III. Revêtement (blindage) et travaux d'étanchement de la galerie, à Péroua, en relation avec la situation créée par les travaux

La galerie d'amenée, bétonnée sur toute sa longueur, est de section circulaire avec un diamètre intérieur de 4,30 m. Elle se termine à Péroua par un tronçon blindé de 600 m de long environ.

Entre le point C et l'insertion de la chambre d'équilibre située à 187 m en amont de ce point, le blingage posé a 3,60 m de diamètre. Les tôles utilisées sont en acier normal (nuance Ac. 37) d'une épaisseur de 14 mm. Les tuyaux sont munis de raidissements circulaires formés de ½ profils I 240, soudés tous les mètres à l'extérieur des viroles (fig. 4). Ce tronçon de blindage sert au renforcement de la galerie dans la partie de faible couverture où — en plus de cela — des surpressions se produisent à la suite des manœuvres des turbines.

Etant donné le comportement dangereux de l'anhydrite au contact de l'eau (dissolution et éventuellement gonflement), le blindage mentionné ci-dessus a été prolongé sur une longueur de 300 m environ au-delà de la cheminée d'équilibre, jusqu'à l'extrémité amont du trias. Il forme ainsi un manchon étanche traversant la roche. Le contact direct entre celle-ci et l'eau sous pression de la galerie a ainsi été évité, mais la présence de l'eau interstitielle posait précisément les problèmes dont il a été question ci-dessus.

Il était clair, en effet, que les différentes nappes d'eau emmagasinées entre chaque couche étanche et en charge avant les travaux se retrouveraient de nouveau sous pression, lorsque l'effet drainant de la galerie aura été supprimé par la pose d'un blindage. Etant donné la proximité de la surface du terrain et considérant la pente de celui-ci, il était probable que les niveaux d'eau soient différents dans les «compartiments» successifs, d'où résulterait une différence de pression entre deux réservoirs voisins. Cette pression différentielle aurait pu provoquer des écoulements d'eau dans le sens des plus faibles pressions si les «trous» percés dans les «parois» des réservoirs naturels n'avaient pas été refermés d'une manière étanche (par exemple: voiles d'injections) (fig. 5a et 5b).

Les conséquences du manque d'étanchéité auraient été différentes pour les deux zones principales situées en amont et en aval de l'anhydrite étanche. Dans le secteur aval, la probabilité d'un écoulement autour des tuyaux de blindage avait été réduite par la présence du puits verti-

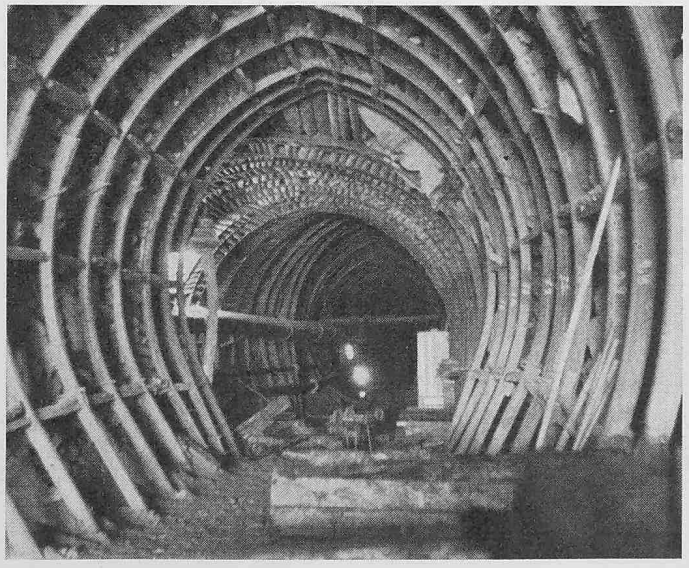


Fig. 3 (à gauche). Arrêt de l'avancement et boisage du front d'attaque nécessité par une irruption d'eau (environ 25 l/s) rencontrée à 270 m environ du point C lors du percement d'une couche de mylonite étanche

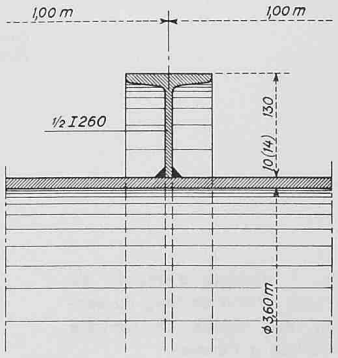


Fig. 4. Détail (coupe) du système de raidissement soudé à l'extérieur des tuyaux de blindage

cal de la chambre d'équilibre, blindée jusqu'à la cote 1450,00 m et qui formait une sorte de drain vertical, limitant la remontée de la nappe d'eau naturelle. D'autre part, de faibles quantités d'eau pouvant éventuellement passer d'un compartiment à l'autre ne présenteraient pas d'inconvénients majeurs.

La situation est cependant différente en ce qui concerne d'éventuels cheminements d'eau, longeant la galerie dans la traversée de l'anhydrite. Ici le danger est d'autant plus grave, que la pression en amont de l'anhydrite peut être beaucoup plus forte qu'en aval. Le niveau maximum que la nappe d'eau atteindra à cet endroit pouvait être estimé égal, dans le cas le plus défavorable, à la hauteur du terrain, ce qui représente environ 200 m (nous verrons par la suite que ce sont environ les ⅔ de cette hauteur que le niveau de la nappe d'eau reconstituée aura atteint).

Or, la circulation d'eau à travers l'anhydrite devait être évitée à tout prix à cause du danger de délavage et la formation de vides, voire de cavernes, dans cette roche vulnérable.

En amont de l'anhydrite, on a ainsi exécuté, à l'aide d'injections systématiques, une gaîne étanche entourant le blindage jusqu'à l'extrémité amont de celui-ci (à 560 m environ du point C). En outre, plusieurs voiles d'injections ont été créés au contact anhydrite-quartzites ainsi qu'à l'extrémité du blindage.

D'autre part, il a été décidé de noyer dans le béton entourant le blindage, des tuyaux métalliques perforés, permettant le contrôle et, en cas de besoin, le réglage de la pression des eaux extérieures.

IV. Conception et fonctionnement des tuyaux de contrôle métalliques

Afin de permettre le contrôle des pressions dans les deux secteurs situés en amont et en aval du trias, on a procédé de la manière suivante:

Deux tuyaux métalliques de 6″ chacun, percés tous les 4 m le long des secteurs respctifs à contrôler, ont été noyés dans le béton entourant le blindage, selon la disposition générale représentée sur la fig. 1. Le tuyau du secteur aval, qui se prolonge jusqu'à la cumulée 410 m, est perforé entre 175 et 410 m. L'autre tuyau traverse le trias, se partage en deux à 560 m et ces deux branches seules sont perforées jusqu'à l'extrémité des tuyaux se trouvant à 600 m, 10 m avant la fin du blindage de la galerie.

Afin d'empêcher le coulis de ciment de pénétrer par les trous à l'intérieur des drains, ces derniers n'ont été percés qu'après l'exécution des différentes phases d'injections: bourrage et haute pression. Le percement s'est fait à partir de l'intérieur de la galerie par des ouvertures préparées à l'avance dans le blindage et a été poursuivi chaque fois jusqu'au rocher. Les ouvertures du blindage ont ensuite été fermées par soudure (fig. 6). Chacun des deux tuyaux a été muni d'une vanne de garde à son extrémité située dans la fenêtre d'accès.

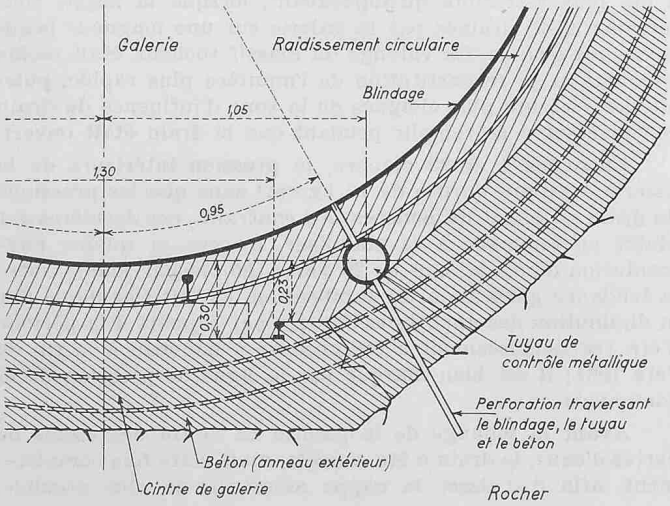


Fig. 6. Détail de la situation et de la perforation du tuyau de contrôle métallique

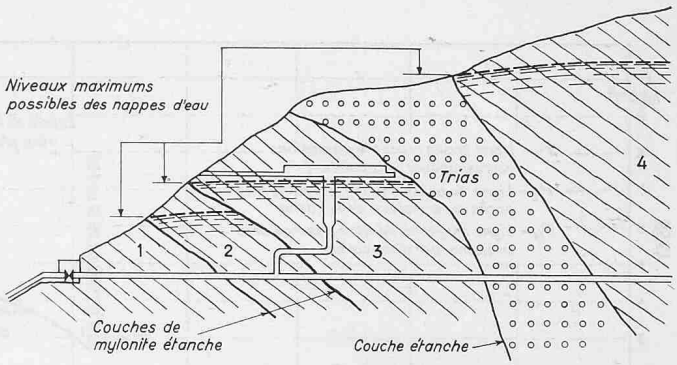


Fig. 5a. Nappes d'eau souterraines renfermées entre les couches de roches étanches

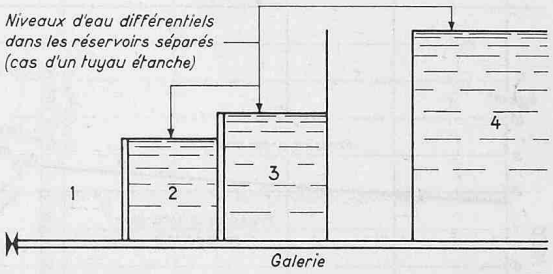


Fig. 5b. Représentation schématique du phénomène de la figure 5a: Réservoirs remplis d'eau à différents niveaux traversés par un tuyau étanche empêchant la communication

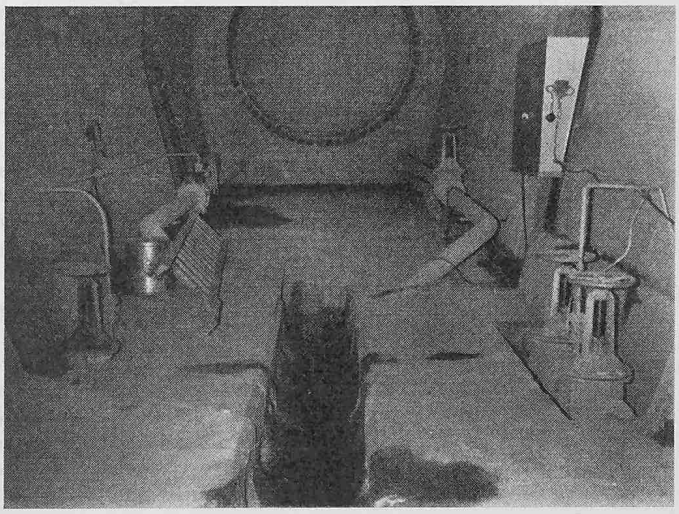
La figure 7 montre l'ensemble des installations extérieures de contrôle situé dans la fenêtre bétonnée. On distingue au fond le bouclier métallique fermant l'embranchement du blindage prévu dans la fenêtre comme principale voie d'accès dans la galerie.

La pose des tuyaux de blindage et des drains de contrôle a débuté le 15 septembre 1958. Le travail a duré 7 mois et le bétonnage du dernier tuyau au carrefour a été terminé au début du mois de février 1959. Le percement des trous des drains à travers les tuyaux métalliques s'est effectué pendant les mois de février et mars de la même année. Les vannes de garde ont été montées dans le courant du mois d'avril, marquant la fin de la mise en place du système de contrôle. Notons que lors du percement des drains, d'importantes venues d'eau ont été enregistrées à la sortie des tuyaux. La fermeture des trous percés dans le blindage de la galerire a permis dès lors la mise en service du système de contrôle.

V. Résultats des observations

L'exploitation normale de la galerie ne devait commencer qu'au mois de décembre 1959 après avoir été soumise

Fig. 7. Vue d'ensemble des installations de contrôle dans la fenêtre d'accès, y compris les sorties des tuyaux de contrôle munis de vannes. A droite, contre la paroi, on distingue l'armoire métallique renfermant les instruments de mesure.



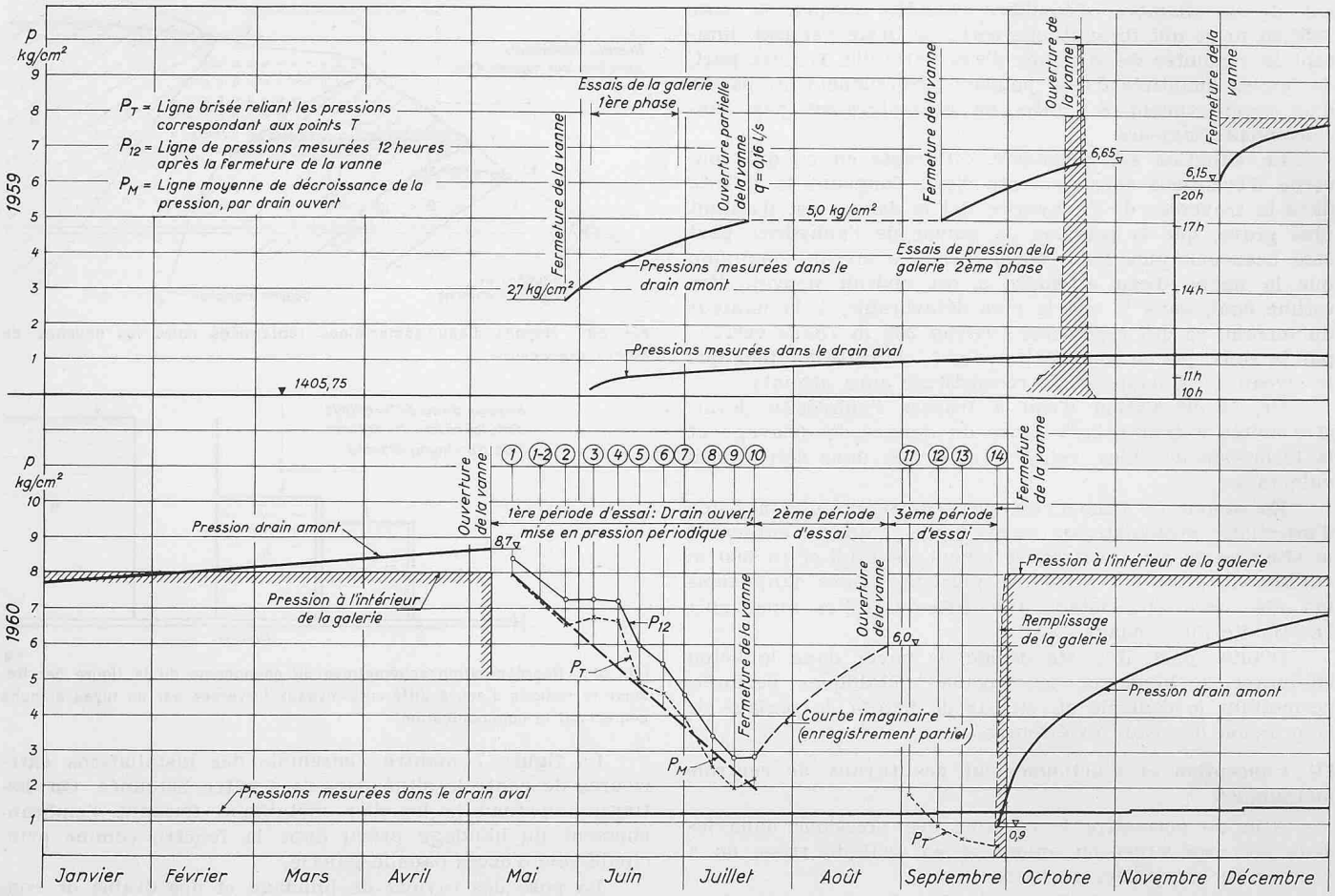


Fig. 8a. Evolution des pressions de la nappe d'eau souterraine entourant le tronçon blindé de Péroua

aux essais de pression et de pertes d'eau. Il nous a paru cependant intéressant de commencer le contrôle des eaux extérieures le plus tôt possible afin de nous réserver la possibilité d'améliorer ou modifier, en cas de besoin, le système monté.

A. Secteur situé à l'amont du Trias

1. Observations entre le 27 mai 1959 et le 6 mai 1960

Les 3 vannes de garde furent fermées le 25 mai 1959 à 9 h 30, une semaine avant le début des essais de mise en charge de la galerie et après branchement des manomètres sur les drains. Immédiatement, la pression du drain amont se mit à monter et à 16 h. 30 — 7 heures après la fermeture du drain — elle atteignait déjà 2,7 kg/cm² (fig. 8a). Ensuite, l'augmentation de la pression fut moins accentuée, l'allure ascendante fléchissant dans le temps, mais ne restant pas moins marquée. C'est ainsi que, pendant les dernières semaines de cette période, l'augmentation journalière de la pression était de 25 cm CE environ. Notons, en passant, que les essais de pression de la galerie, poursuivis entre les 3 et 28 mai, n'ont nullement influencé l'évolution des pressions, ceci malgré une pression intérieure de 8 kg/cm². La pression du drain amont avait atteint 5 kg/cm² le 23 juillet et, à ce moment, il fut décidé de la maintenir à cette valeur en ouvrant partiellement la vanne de garde correspondante. L'ouverture de celle-ci a été réglée de manière que le débit d'eau s'écoulant du drain soit égal aux apports de la nappe souterraine. On a trouvé ainsi un débit approximatif de 0,16 l/s.

Ces chiffres permettent le calcul de la section libre d'un réservoir fictif alimenté par les eaux souterraines. Il s'agirait, en l'occurence, d'un puits d'env. 35 m² de section, correspondant à l'espace vide du rocher, 50 m au-dessus de la galerie. Il serait tentant d'admettre un coefficient de porosité du terrain et de calculer à l'altitude du niveau hydrostatique, l'étendue de la surface souterraine effectivement remplie d'eau. Cependant, le résultat que l'on pourrait en tirer serait peu significatif, non seulement à cause de l'incertitude du coefficient de porosité admis, mais surtout en raison de l'hétérogénéité de la roche dans la région examinée (écran étanche d'anhydrite, couches de quartzites perturbées), introduisant de ce fait une discontinuité dans le mouvement des eaux.

Le 11 septembre 1959, soit env. 50 jours après leur fermeture partielle, les vannes de garde furent complètement refermées afin de permettre à la pression de poursuivre son évolution. Celle-ci se mit immédiatement à monter et le 4 octobre, jour du début de la deuxième phase des essais de pression de la galerie, elle atteignait déjà 6,2 kg/cm², ce qui représente une augmentation de 1,2 kg/cm², soit 50 cm par jour.

Cette augmentation plus accentuée de la pression semble due au fait que cette fois la zone influencée par le drain a été plus restreinte qu'auparavant, lorsque la nappe souterraine a été drainée par la galerie sur une longueur beaucoup plus grande. La vidange du massif rocheux était moins complète et la reconstitution de l'aquifère plus rapide, puisque les secteurs plus éloignés de la zone d'influence du drain continuaient à se remplir pendant que le drain était ouvert.

Entre les 4 et 25 octobre, la pression intérieure de la galerie a atteint l'ordre de 10 kg/cm² sans que les pressions du drain en soient influencées. Au contraire, ces dernières ont plutôt eu tendance à se stabiliser, n'accusant qu'une augmentation de 0,5 kg/cm² en 20 jours (25 cm par jour). Outre la tendance générale à la stabilisation, ce fait s'explique par la diminution des apports extérieurs par rapport à la période d'été (ce fléchissement a été observé à nouveau à la fin de l'été 1961; il est bien marqué sur la ligne de pression de la zone aval).

Avant la vidange de la galerie (à la fin des essais de pertes d'eau), le drain a été rouvert, mais cette fois complètement, afin d'abaisser la nappe extérieure le plus possible.

La vanne est restée ouverte jusqu'au 30 novembre (soit environ pendant 1 mois), jour précédant le remplissage de

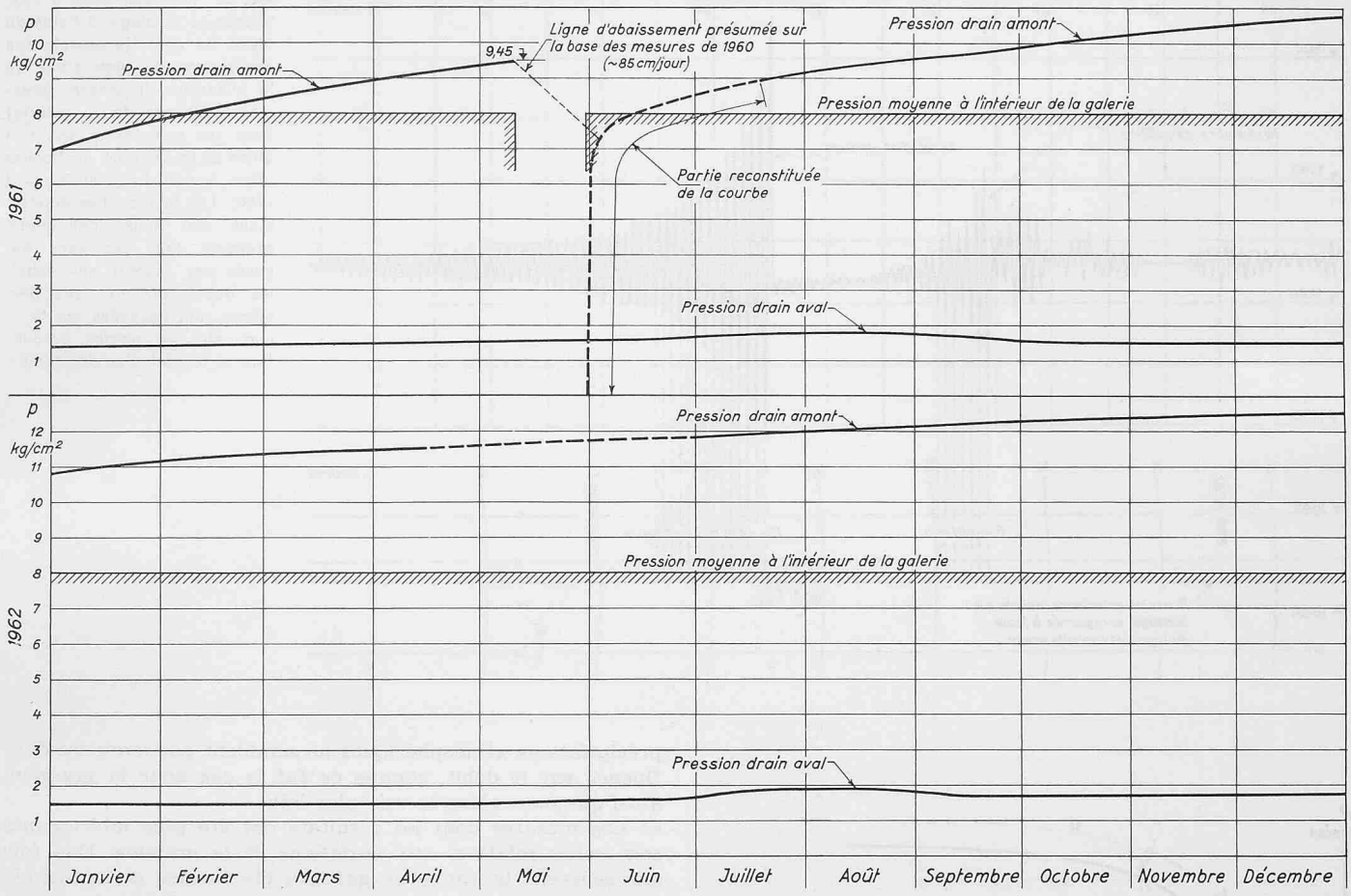


Fig. 8b. Suite de la fig. 8a

la galerie en vue de l'exploitation normale. Un contrôle intermédiaire, effectué le 17 novembre, a montré qu'en 10 heures la pression est remontée à 5,8 kg/cm².

A partir du 30 novembre, jour de fermeture du drain, la pression a été enregistrée à l'aide d'un manographe. En 3 h. ½, la pression atteignait 6,15 kg/cm² (à 0 h. le 1er décembre), 3 jours plus tard 6,75 kg/cm² (2 m par jour) et 7,15 kg/cm² 8 jours après (80 cm par jour).

Le 12 janvier 1960, la pression a atteint la valeur de 7,8 kg/cm². Malheureusement, le lendemain l'instrument a été endommagé par le gel et ce n'est que le 10 avril que les mesures ont pu être reprises. Jusqu'à ce jour, la pression n'avait pas dépassé 8,5 kg/cm², circonstance qui peut s'expliquer par l'absence presque totale des apports extérieurs pendant l'hiver (on avait vu que la présence de l'eau dans la galerie n'influençait aucunement l'évolution de la pression extérieure).

Dès la reprise de l'enregistrement, un phénomène inattendu a été observé sur la bande d'enregistrement. En effet, de faibles oscillations de la pression ont été enregistrées sur la bande, dont certaines caractéristiques se sont révélées semblables à celles enregistrées à l'intérieur de la galerie, ces dernières étant dues au réglage des turbines de la centrale de Nendaz. Les amplitudes des oscillations de la pression observées dans le drain étaient beaucoup moins prononcées que celles mesurées à l'intérieur du tunnel, mais leur périodicité correspondait exactement. Il n'y avait aucun doute que l'on enregistrait dans le drain les ondes de surpressions transmises élastiquement à la masse rocheuse. Nous avons reproduit sur la fig. 9, une partie de ces oscillations à l'intérieur de la galerie, causées par l'arrêt d'un groupe (le 29 avril 1960 à minuit) de l'usine de Nendaz, en regard avec celles enregistrées dans le drain. Il est à noter qu'après le mois d'avril de cette année, ces oscillations ne se sont plus jamais reproduites sur la bande d'enregistrement.

En poursuivant son ascension, la pression a atteint 8,7 kg/cm² le 6 mai. A ce moment, le drain fut ouvert afin

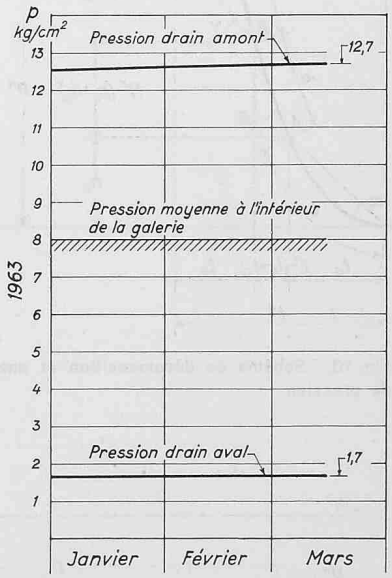


Fig. 8c. Suite de la fig. 8b

d'abaisser le niveau de la nappe phréatique et de diminuer ainsi la pression extérieure en vue de la vidange de la galerie qui était prévue pour la fin du mois.

2. Observations et essais entre le 6 mai et le 27 septembre 1960

Le drain est resté ouvert pendant l'été 1960, durant une période de 5 mois environ, ce qui nous a permis — moyennant quelques manœuvres périodiques — de suivre les mouvements de la nappe d'eau souterraine et d'en tirer quelques conclusions. Pendant ce temps on a mesuré a) le *débit d'eau* s'écoulant du drain, et b) la *résistivité* de l'eau.

Ces mesures ont démontré, d'une part, que l'on avait à faire à une eau très séléniteuse, ce qui n'était pas inattendu, et d'autre part, que le débit accusait un certaine variation pendant les différentes saisons de l'année. Toutefois, les

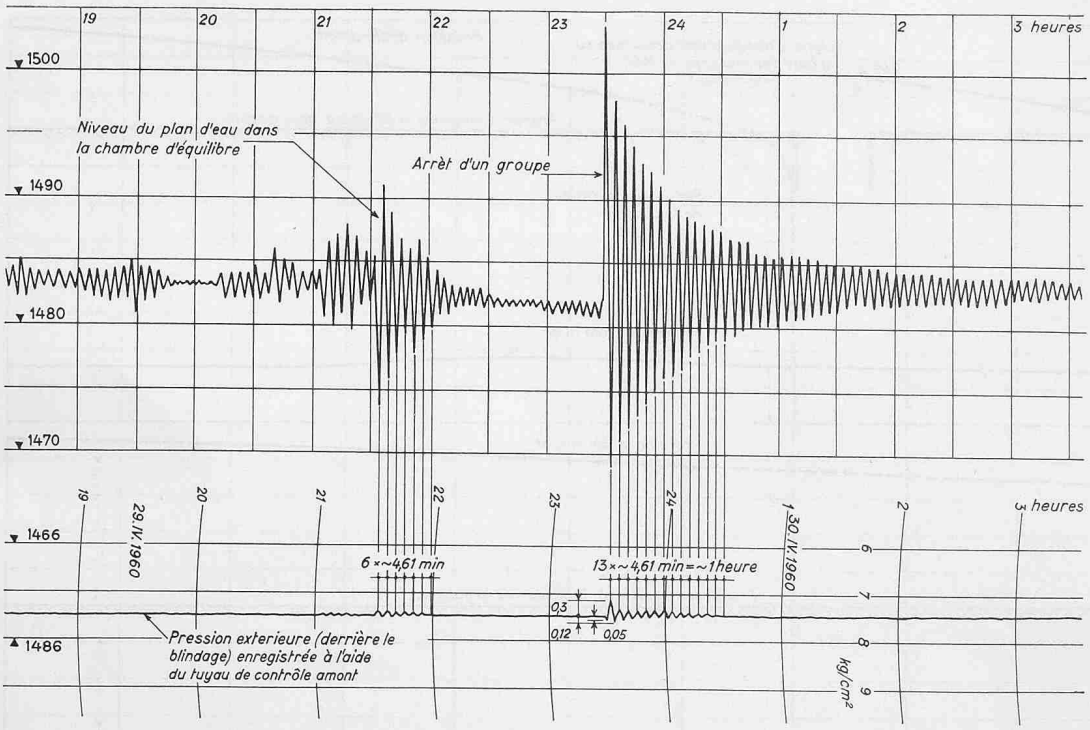


Fig. 9. Enregistrement à l'extérieur du blindage, à l'aide du tuyau de contrôle amont, des oscillations du plan d'eau de la chambre d'équilibre (pression intérieure de la galerie) dues aux manœuvres des turbines de la Centrale de Nendaz (dans la nuit du 29 au 30 avril 1960). Les bandes d'enregistrement des deux instruments avançant dans des sens opposés par rapport aux échelles des pressions, ces dernières sont opposées sur la figure afin de garder parallèlement les échelles des temps

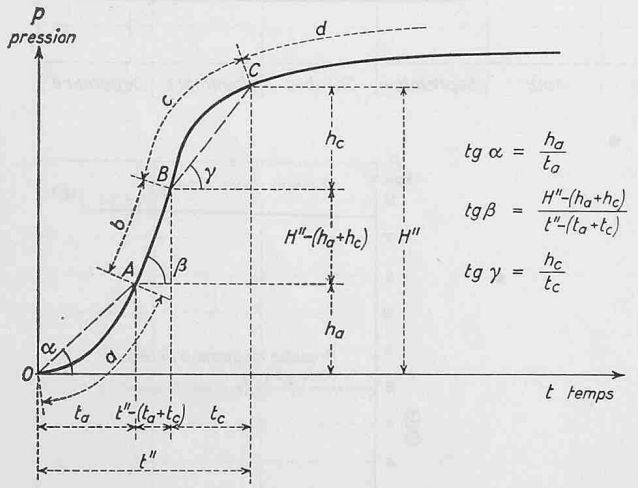


Fig. 10. Schéma de décomposition et analyse des courbes de remontée de pression

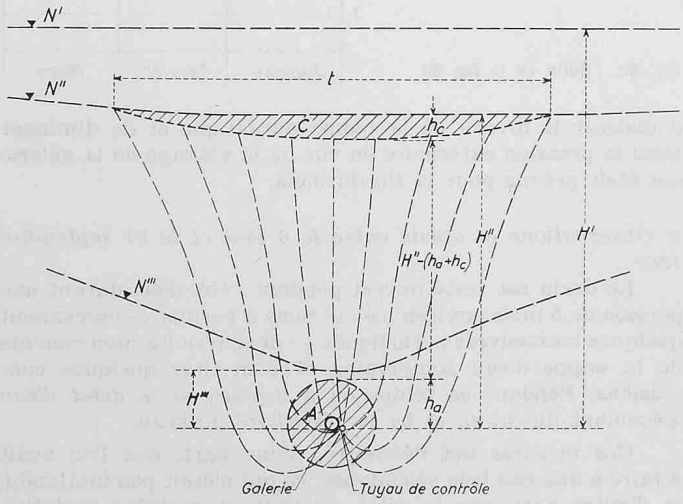


Fig. 11. Variations du niveau de la nappe d'eau souterraine

précipitations atmosphériques ne semblent pas avoir eu d'influence sur le débit, comme ce fut le cas pour la pression, ainsi que nous alons le voir plus loin.

c) Les mesures dont les résultats ont été plus intéressants sont celles relatives aux *variations de la pression.* Une fois par semaine, la vanne de garde a été fermée et la montée de la pression dans le drain enregistrée à l'aide du manographe. Nous avons ainsi obtenu une série de courbes, dont chacune possédait, d'une manière plus ou moins prononcée, les éléments suivants:

Après chaque fermeture de la vanne, 10 min. env. s'écoulaient avant le début de la mise en pression (temps nécessaire pour le remplissage du drain). Ensuite, les lignes de pression décrivirent des courbes de formes caractéristiques composées de 4 parties essentielles, à savoir (fig. 10):

α) portion de courbe concave entre le point de départ (pression 0) et la «droite» de raccordement;

β) «droite» de raccordement, plus ou moins redressée vers la verticale;

γ) portion de courbe convexe entre la droite β), et la ligne des «pressions stabilisées» de la nappe phréatique;

δ) courbe de pression de la nappe phréatique, ligne modérément ascendante.

Nous tenterons d'expliquer ci-dessus la signification de chacun des éléments.

3. *Essai d'interprétation de la forme des courbes de remontée de pression* (fig. 11)

Admettons que, dans l'état naturel, le niveau moyen de la nappe souterraine correspond à N'. Lors du percement de la galerie, les eaux emmagasinées dans le massif rocheux seront évacuées par ce drain, et le niveau de la nappe

H': Pression hydrostatique moyenne au niveau du tuyau de contrôle dans l'état initial de la nappe d'eau (avant les travaux)

H'': Pressions hydrostatiques au niveau du tuyau de contrôle mesurées après achèvement et étanchéisation de la galerie

H''': Pression hydrostatique de la nappe d'eau abaissée

h_a: Hauteur de la zone de soulagement A, au-dessus du tuyau de contrôle

h_c: Abaissement localisé du niveau de la nappe phréatique

N': Niveau moyen de la nappe phréatique dans son état initial, avant le début des travaux

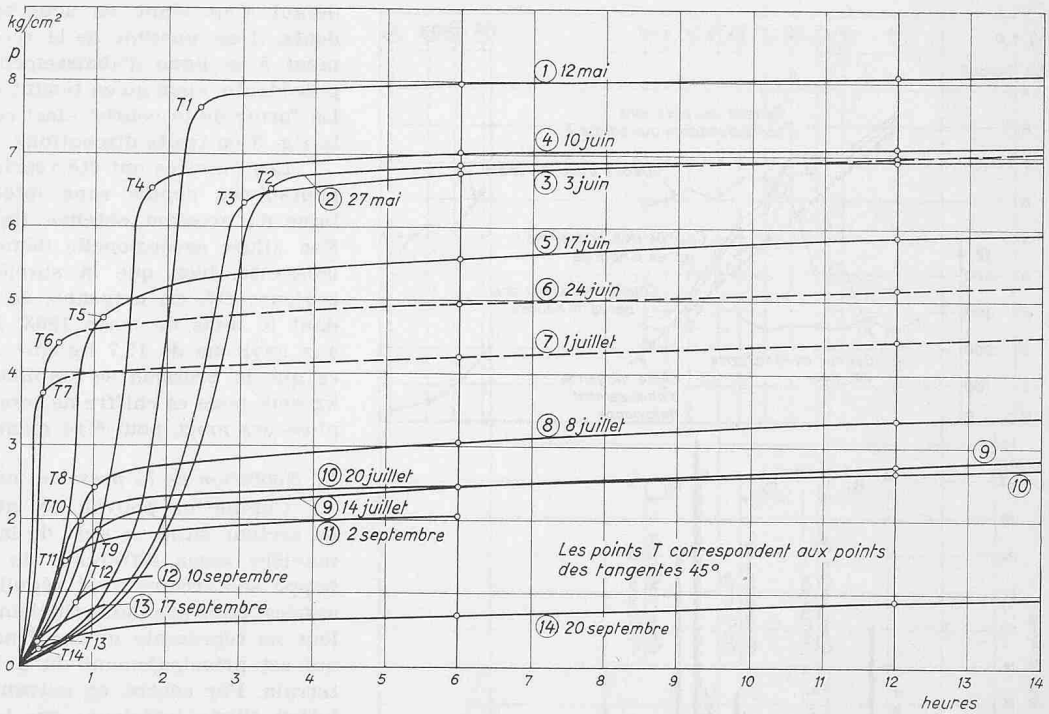
N'': Niveau de la nappe phréatique à un stade intermédiaire de sa reconstitution

N''': Niveau de la nappe phréatique après l'achèvement des travaux souterrains et étanchéisation de la galerie

A: Zone de soulagement autour du tuyau de contrôle

C: Zone de largeur **t** influencée par l'ouverture temporaire de la vanne du tuyau de contrôle

Fig. 12. Courbes de remontée des pressions extérieures amonts lors des contrôles périodiques effectués pendant l'été 1960



s'abaisse pour atteindre la forme représentée par la ligne N'''.

Dès la fin des travaux et étanchement de la galerie (blindage, injections) le niveau de la nappe d'eau souterraine, alimenté par les apports extérieurs, reprend son ascension et atteindra, après un certain temps, le niveau N'. Vu la forme évasée de la ligne de niveau N''', l'allure caractérisant la remontée de la nappe sera une courbe ascendante, dont les tangentes successives s'applatiront dans le temps et atteindront, dans le stade final, une asymptote horizontale représentée par le niveau N'.

Les pressions hydrostatiques régnant à l'intérieur de la montagne correspondent, par rapport au niveau du tuyau de contrôle, aux valeurs H' pour N' et H''' pour N'''. Les pressions mesurées ne sont pas nécessairement égales aux valeurs H étant donné les pertes de charge, fonction de la porosité de la roche et en raison des tensions capillaires dues au réseau interstitiel (fissuration fine). Les mesures fournissent ainsi des valeurs fictives des niveaux d'eau, mais l'influence des facteurs ci-dessus peut être négligée dans la pratique, le but recherché étant précisément de connaître l'importance des pressions.

Considérons maintenant, au cours de sa remontée, un état intermédiaire du niveau d'eau, indiqué par N'' sur la fig. 11. En cas d'ouverture de la vanne du tuyau de contrôle, un mouvement des eaux souterraines se dirigeant vers le tuyau se manifestera, provoquant l'abaissement du niveau N''. L'effet d'abaissement se fera sentir sur une surface dont une dimension pourrait être caractérisée par t. Nous indiquerons par h_c la hauteur de l'abaissement provoqué par une ouverture temporaire de la vanne. Sitôt la vanne refermée, la pression remontera selon une certaine loi pour atteindre sa valeur initiale.

Dans leurs parties inférieures, les courbes accusent une allure parabolique plus ou moins prononcée (portion de courbe a de la fig. 10). Ceci incite à croire qu'il existe autour de la galerie une *zone de soulagement* (A sur la fig. 11) qui se vidange plus rapidement que la masse principale du rocher. Un certain temps serait alors nécessaire pour que les apports d'eau provenant de réserves plus éloignées la remplissent à nouveau. Le phénomène pourrait s'expliquer par l'existence de vides ou de fissures situés dans le voisinage de la galerie et dus à la détente de la masse rocheuse, provoquée par l'excavation de la galerie.

Les quatre portions de courbes de la fig. 10 pourraient donc trouver leur signification comme suit:

La portion a correspond au remplissage de la zone de soulagement A, dont la hauteur fictive serait h_a. A partir de ce point, la pression monte rapidement jusqu'à la hauteur $H'' - (h_a + h_c)$, représentée par la portion de courbe b, quasi droite. Suit le remplissage du volume C (portion de courbe c) puis avec d la ligne rejoindra la courbe générale des pressions.

Notons encore que, pour chaque courbe, l'importance et l'inclinaison des cordes OA, AB et BC, ainsi que les rapports entre ces différentes valeurs ont des significations caractéristiques dont l'analyse et l'interprétation demanderaient une étude plus approfondie en tenant compte d'autres facteurs extérieurs. Nous nous bornerons à examiner ici uniquement les quelques points suivants.

4. Comparaison des courbes de pression et analyse de l'influence des apports d'eau extérieurs

Les courbes de pression enregistrées sont reportées sur une seule abaque (fig. 12), ce qui permet de les comparer directement. Il s'agit de 14 courbes (numérotées de 1 à 14) dont la répartition chronologique figure également sur la fig. 8. Plus explicatives sont encore les abaques comparatives de la fig. 13 où sont représentées les lignes donnant l'évolution dans le temps de quelques valeurs caractéristiques: débits des drains, lignes reliant les points T (pressions correspondant aux tangentes 45° des portions de courbe c), ligne des pressions après 12 heures d'ascension, etc.

On remarque immédiatement la nette tendance des pressions à la diminution. Ce phénomène de soulagement indique la vidange de la nappe phréatique et prouve par là même l'efficacité du système de drainage. On voit également que, malgré les variations saisonnières et l'année 1960, très pluvieuse, il est possible, avec l'aide de cette installation, d'abaisser notablement le niveau de la nappe phréatique. L'indice général de l'abaissement est pratiquement linéaire et correspond à la cadence de 2,5 kg/cm² environ par mois pour cette période d'observation.

L'allure descendante, pratiquement linéaire des lignes P est interrompue à 3 reprises par des redressements de la courbe reliant les points P_T, ceci lors des mesures 3—4, 6—7 et 10, indiquant un certain effet de «freinage» de la vidange. Nous trouvons son explication en observant les graphiques de précipitations de l'époque correspondante où nous retrouvons 3 périodes de pluies intenses débutant respectivement le 15 mai, le 7 juin et le 6 juillet, et précédant de 15 à 18 jours chacun des redressements des courbes P (fig. 13). D'après ces observations, il semblerait que les périodes de fortes précipitations ont influencé la ligne des pressions avec un décalage de 2½ semaines environ. Etant donné la hauteur de recouvrement du terrain au-dessus de la nappe souterraine, qui est de l'ordre de 200 m, la vitesse moyenne d'infiltration des eaux extérieures serait de 12 m par jour en chiffre rond.

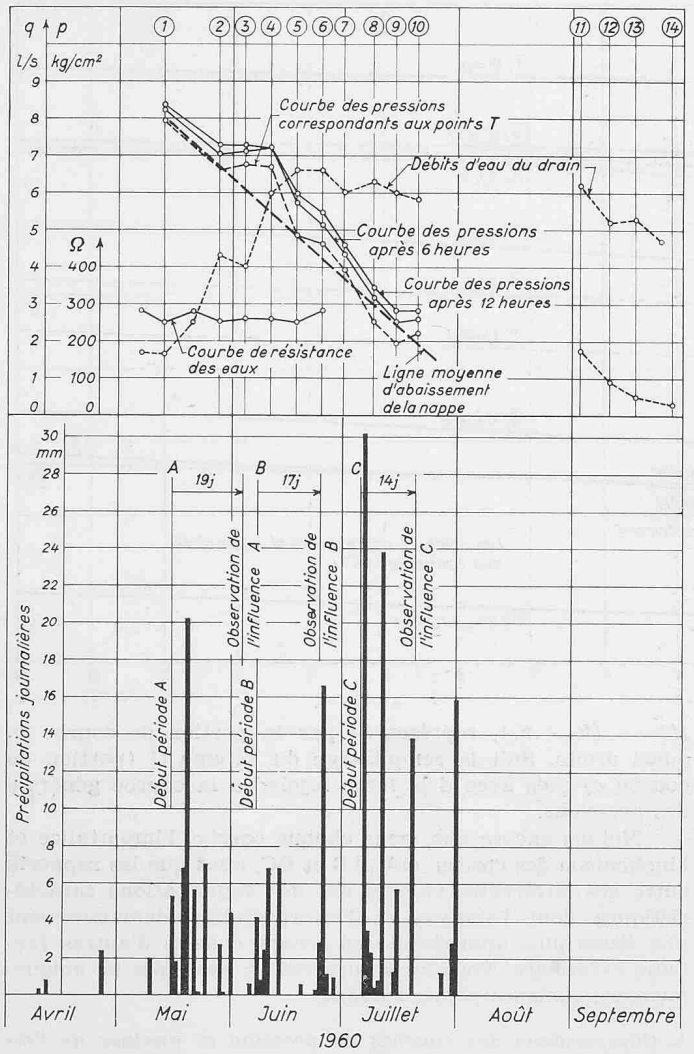


Fig. 13. Influence des précipitations atmosphériques sur la courbe d'abaissement du niveau de la nappe d'eau souterraine

Entre le 20 juillet et le 27 août, le drain est resté fermé pour permettre la réparation du canal d'évacuation extérieur. Ceci nous a permis d'observer pendant une période plus longue la remontée du niveau de la nappe phréatique. Celle-ci avait atteint 60 m, 38 jours après la fermeture de la vanne, soit une différence de pression de 3,2 kg/cm², ce qui donne une augmentation journalière moyenne de 84 cm environ (voir fig. 8).

Le 27 août, après réouverture de la vanne de garde, la vidange de la nappe s'est poursuivie avec 3 opérations de fermeture intermédiaire. A la fin de cette période, la valeur du point P_T était descendue jusqu'à 0,3 kg/cm², la pression après 12 heures étant de 0,9 kg/cm², chiffres mesurés les 27 et 28 septembre. Ce dernier jour marquait la fin de cette période d'essai; la galerie a été remplie en vue de l'exploitation de la centrale de Nendaz et la vanne de garde du drain fut également fermée.

5. Période d'observations comprise entre fin septembre 1960 et mars 1963

Trois phases distinctes caractérisent cette période qui s'étend sur près de 2½ ans.

a) Vannes de garde fermées jusqu'au 10 mai 1961, augmentation de la pression selon la ligne correspondante de la fig. 8, pour atteindre la valeur de 9,45 kg/cm² environ.

b) Le 10 mai 1961, la galerie fut vidangée. Elle est restée vide pendant 20 jours environ. Le drain de contrôle fut également ouvert pendant ce laps de temps. Lors d'un contrôle interdédiaire effectué le 18 mai, la pression a atteint 6 kg/cm², 1 heure après la fermeture de la vanne.

c) Malgré la fermeture du drain le 30 mai, les mesures systématiques n'ont pu être reprises avant la mi-juillet 1961, de sorte que l'enregistrement du début de la courbe nous fait défaut. Cependant, en nous basant sur les résultats précédents, il est possible de la reconstituer en recourant notamment à la ligne d'abaissement de la nappe définie l'année précédente, ainsi qu'en tenant compte de la durée de vidange. La forme de la courbe ainsi reconstituée est représentée sur la fig. 8 en traits discontinus.

Les mesures ont été reprises le 12 juillet 1961 et ont été poursuivies depuis sans interruption jusqu'à ce jour. La ligne de pression obtenue figure entièrement sur la fig. 8. Son allure ascensionelle démontre une nette tendance fléchissante, bien que la surélévation journalière ait encore toujours été, en moyenne, de l'ordre de 3 cm environ, pendant le mois de mars 1963. La pression était alors située aux environs de 12,7 kg/cm². On peut toutefois s'attendre à ce que la pression se stabilise autour d'une valeur de 13,5 kg/cm², mais ce chiffre ne sera probablement atteint qu'après plusieurs mois, peut-être même plusieurs années.

B. Evolution de la pression mesurée par le drain aval

Comme on pouvait s'y attendre, la pression extérieure du secteur situé en aval de la zone de Trias a évolué d'une manière assez différente de celle mesurée en amont. La nappe souterraine s'est régulièrement remplie au cours des années, pour atteindre finalement 1,7 à 1,8 kg/cm². Cette valeur ne représente qu'une fraction de la pression amont, ce qui est principalement dû à la proximité de la surface du terrain. Par contre, en suivant la courbe représentant l'évolution (ligne inférieure sur la figure 8), on remarque que chaque année une augmentation relative de la pression se situe entre les mois de juillet et août. Ce même phénomène se retrouve aussi, mais d'une manière moins marquée, pendant les mois de juillet — août 1961, sur la courbe supérieure. Du reste, sa tendance à la stabilisation est moins marquée, ce qui laisse prévoir pour l'avenir une augmentation proportionnellement supérieure à celle de la pression amont.

VI. Résumé des principaux résultats

A. Zone située en amont du Trias

1. Hauteur de la nappe d'eau souterraine au-dessus de la galerie après une durée de reconstitution de près de 4 ans (46 mois): [2] *127 m*
2. Hauteur maximum probable de la nappe (hauteur de stabilisation) entre *130 et 140 m*
3. Vitesse d'abaissement de la nappe en cas de soutirage par le drain [3]): environ *85 cm/jour*
4. Vitesse d'écoulement vertical des eaux de surface à l'intérieur du massif rocheux environ *10 m/jour*

B. Zone située en aval du Trias

1. Hauteur du plan d'eau après 46 mois: environ *17 m*
2. Hauteur maximum probable environ *30 m* (?)

VII. Conclusion

Dans ce qui précède, nous nous sommes limités à la description des observations et de leurs résultats sans entrer dans des considérations quant aux répercussions pratiques qu'ils pourraient avoir sur la construction proprement dite (résistance mécanique, fonctionnement futur, consignes d'exploitation, etc.).

Bien que définis d'une manière assez précise, les chiffres cités ne peuvent avoir de valeur absolue que dans les conditions qui ont permis leur définition. Ils pourraient cependant être d'une certaine utilité dans des cas semblables, en servant de base à des estimations par analogie.

Nous remercions finalement la Direction de la Grande Dixence S. A. de l'autorisation qu'elle a bien voulu nous accorder pour la publication de ce travail qui, espérons-le, sera une contribution utile à l'étude des mouvement d'eau souterraine.

Adresse de l'auteur: Lausanne, 12, place de la Gare.

[2]) Sans tenir compte du freinage dû aux soutirages temporaires et en négligeant les effets secondaires, comme pertes de charge, tension capillaire, etc., pour substituer la dimension «hauteur» à celle des pressions.

[3]) Un soulagement immédiat de la zone entourant la galerie peut cependant être obtenu dès le début du soutirage, son étendue restant toutefois incertaine.