

# La méthode d'injection des terrains à l'avancement dans les cas difficiles de percement d'ouvrages souterrains

## Preliminary Grouting Method for Difficult Cases of Tunnel Driving

par J. CAILLE, directeur de la Société Chérifienne de Sondages, Injections, Forages, Entreprise P. Bachy, Casablanca, et R. BARBEDETTE, ingénieur des Ecoles Nationales des Arts et Métiers, chef du Bureau d'Etudes de la Société de Sondages, Injections, Forages à Paris, Entreprise P. Bachy, 11, avenue du Colonel-Bonnet, Paris-XVI<sup>e</sup>, France

### Sommaire

Le percement des galeries, dans les cas difficiles, peut souvent être considérablement facilité par l'injection préalable du terrain à l'avancement, sous forme de «parapluies» successifs; il ne peut même parfois être poursuivi qu'avec l'aide de cette méthode.

Deux exemples typiques actuels:

Galerie Ait Ouarda-Afourer (aménagement de l'Oued El Abid), Maroc: L'attaque aval, totalement stoppée par des arrivées d'eau de 200 l/sec sous 15 kg/cm<sup>2</sup> a pu être reprise sous la protection de parapluies successifs d'injection de 90 m de longueur unitaire; actuellement, plus de 1100 m ont pu être ainsi percés à une cadence qui a pu atteindre 4 m par jour, dans certains tronçons.

Percement du Lac d'Issarlès (aménagement de la chute de Montpezat, Ardèche): La galerie de prise a été également stoppée, à 80 m environ du lac, par des venues d'eau atteignant 200 l/sec; la méthode des injections à l'avancement est actuellement utilisée avec plein succès; adaptée judicieusement au cas particulier, elle doit permettre l'approche convenable du lac en vue du débouchage.

### Introduction

Il arrive fréquemment que des galeries ou tunnels rencontrent des terrains aquifères ou de très mauvaise tenue. La traversée de ces zones difficiles nécessite l'emploi de méthodes de percement qui retardent toujours l'avancement; celui-ci est même quelquefois totalement stoppé lorsque les venues d'eau sont abondantes et sous forte pression, ou lorsque le terrain est incohérent.

La méthode d'injection des terrains à l'avancement peut très souvent, dans de tels cas, être appliquée avec succès; le principe en est simple; il consiste à injecter des «parapluies» ou «auréoles» formés de forages exécutés à partir du front d'attaque sur une plus ou moins grande longueur, l'avancement se faisant ensuite à l'abri de ces injections.

Cette méthode a déjà été employée à plusieurs reprises dans

### Summary

The driving of tunnels may often be facilitated in difficult cases by grouting of the soil ahead of the work, in the shape of successive "umbrellas"; sometimes, work cannot proceed at all without using this method.

Two typical current examples:

Ait Ouarda-Afourer tunnel (Oued El Abid project, Morocco): The downstream attack, totally stopped by water in-rush of 200 l/sec under pressure of 15 kg/cm<sup>2</sup>, could be resumed under the protection of successive grouting umbrellas each 90 m in length. At the present time, more than 1,100 m are being driven in this manner at a rate which reached 4 m per day in certain sections.

Intake tunnel of the lac d'Issarlès (Montpezat Falls project, Ardèche, France): Work on the intake tunnel was also stopped, at approximately 80 m from the lake, by in-rush of water up to 200 l/sec. The preliminary grouting method is being used with complete success; judiciously adapted to the case in question, it will make it possible to come near enough to the lake for blasting out.

le monde. Au Japon, en 1924, le tunnel du Chemin de Fer de Tanna avait rencontré une faille aquifère qui n'avait pu être traversée que par de telles injections. – Plus récemment, en 1947-48, la méthode fut utilisée en Algérie dans la galerie de 3 m<sup>2</sup> d'Acif el Hamman, et, en France, dans la galerie de 10 m<sup>2</sup> de Pralognan (*Rivière et Roger, 1950*) sur des longueurs respectives d'une quarantaine et d'une centaine de mètres.

Dans les deux exemples qui sont décrits plus loin, la méthode a été mise en œuvre sur une échelle jusqu'ici inusitée; utilisant les techniques les plus modernes de forage et d'injection, on a pu, grâce à une adaptation soignée de ces techniques aux conditions particulières de chaque problème et à une étude poussée des installations et organisations de chantier, transformer en véritable procédé rationnel d'exécution de souterrains une

méthode qui faisait auparavant figure de procédé de secours. Avant de décrire ces deux exemples, nous exposerons le principe général de la méthode.

### Principe général de la méthode

**Généralités.** La méthode des injections à l'avancement consiste à effectuer le percement de la galerie à l'abri d'une succession de «parapluies» (ou «auréoles»), chaque parapluie étant constitué par un nombre convenable de forages injectés au moyen de coulis généralement à base de ciment. La longueur de ces parapluies est déterminée en fonction des conditions particulières existantes ou imposées et inhérentes aux caractéristiques du terrain et de l'ouvrage et au chantier; elle est en tout cas supérieure à la longueur de percement des tronçons correspondants, de façon à assurer une protection suffisante en avant de chacun d'eux. L'épaisseur de la gaine étanche et consolidée à réaliser autour du gabarit de percement est également variable selon les cas, et dépend aussi de la qualité du terrain, et de la situation et du type de l'ouvrage; c'est ainsi qu'il peut être nécessaire, on le verra, de prévoir, pour un même tronçon, plusieurs parapluies s'emboîtant les uns dans les autres.

L'exécution des travaux d'injection à l'avancement comprend généralement deux phases essentielles (Fig. 1):

Une phase de démarrage, comportant des travaux préparatoires visant à établir dans l'ouvrage une «base de départ» résistante et étanche immédiatement avant la zone mauvaise.

Des phases successives et analogues dans leur principe, pendant lesquelles alternent la réalisation des parapluies de protection, et les abatages.

**Phase de démarrage.** Elle comporte habituellement la confection d'un bouchon contre le front de taille stoppé.

Si ce front de taille se trouve encore dans une zone à peu près saine, on peut se contenter d'un simple masque en béton collé contre la paroi frontale; mais ce n'est généralement pas le cas, et il est la plupart du temps nécessaire de le reporter en arrière, l'espace vide étant comblé par du béton; ce béton peut d'ailleurs avantageusement être réalisé par injection de mortier activé (procédé «Haute Turbulence») dans un squelette de cailloux convenables.

Le bouchon doit être établi de façon à permettre une injection efficace sous pression suffisante immédiatement devant lui, sans risques de reflux de coulis vers l'arrière. Aussi doit-il être complété par un traitement sérieux de collage au terrain, et par l'exécution de voiles dans ce dernier; une «auréole» de départ est même habituellement prévue, coiffant la première auréole principale ultérieurement exécutée. En outre, il est recommandé de raccorder le revêtement normal de la galerie au bouchon.

**Phases successives normales.** Leur constitution et leur exé-

cution dépendent de chaque cas particulier, nous ne donnerons ici que des idées générales.

Remarquons d'abord que la méthode des auréoles à l'avancement permet une grande souplesse et une grande progressivité dans le traitement. Celui-ci est poussé au maximum au départ qui est le point délicat; il est ensuite constamment adapté aux caractéristiques du terrain et de ses accidents. C'est ainsi que, dans les cas délicats où une consolidation sérieuse du terrain est nécessaire, ou lorsque des déperditions importantes de produits sont à craindre, une ou plusieurs auréoles extérieures peuvent être prévues en vue de constituer un premier gainage à l'abri duquel est réalisé le parapluie principal; ce dernier peut alors être injecté à pression plus élevée (jusqu'à 100 kg/cm<sup>2</sup>), facteur favorable à l'efficacité du traitement et permettant de réduire au minimum la densité des forages.

Bien entendu, cette densité doit être choisie avec soin pour chaque auréole, en fonction du diamètre de l'ouvrage, des conditions locales, et du rôle exact que doit jouer cette auréole.

Lorsque le diamètre de la galerie le permet, il est préférable d'exécuter 2, 3 ou 4 forages simultanément de façon à ce que les accidents rencontrés se trouvent injectés en même temps: il vaut mieux, par exemple, stopper une sondeuse en attendant que les autres aient atteint la même faille, et être ainsi certain que cette faille est parfaitement injectée. Cette façon de procéder présente en outre l'avantage de faciliter les lavages des cassures, l'eau étant injectée dans un forage et ressortant par le ou les voisins.

**Exécution des injections.** Elle doit aussi être minutieusement adaptée à chaque cas particulier. Il est préférable d'exécuter les injections par tranches successives au fur et à mesure de l'approfondissement des sondages, de façon à ce qu'elles progressent dans le sens de l'avancement, derrière les injections précédentes. La longueur des tranches est variable; en principe, chaque accident important révélé par le carottage et les venues d'eau doit faire l'objet d'un traitement séparé; le maximum de longueur des tranches ne doit pas dépasser autant que possible 5 m. Les produits, leur dosage et leur temps de prise doivent être choisis en fonction de la nature du terrain, des caractéristiques des vides rencontrés, des conditions hydrauliques du milieu (pression de l'eau, présence ou non de circulations, qualité de l'eau, etc...) et des différentes conditions locales.

Dans les cas courants, le ciment est généralement le produit de base; il peut être additionné d'autres produits visant à améliorer les qualités des coulis ou à économiser le liant (coulis binaires et ternaires); il faut cependant veiller à l'obtention d'une résistance mécanique suffisante. On s'attachera à une préparation soignée des coulis, et on donnera la préférence aux procédés modernes d'activation (malaxage à «Haute Turbulence») de la Société S.I.F. par exemple) en raison des propriétés particulièrement précieuses qu'ils confèrent à ces coulis:

stabilité, homogénéité,  $\frac{C}{E}$  élevé, résistance au délavage, etc...

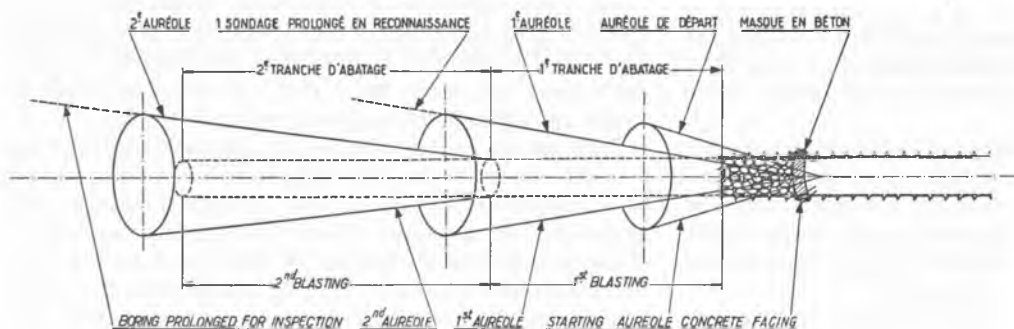


Fig. 1 Schéma de principe des injections d'étanchement à l'avancement  
Scheme of Preliminary Waterseal Grouting in Front of the Heading

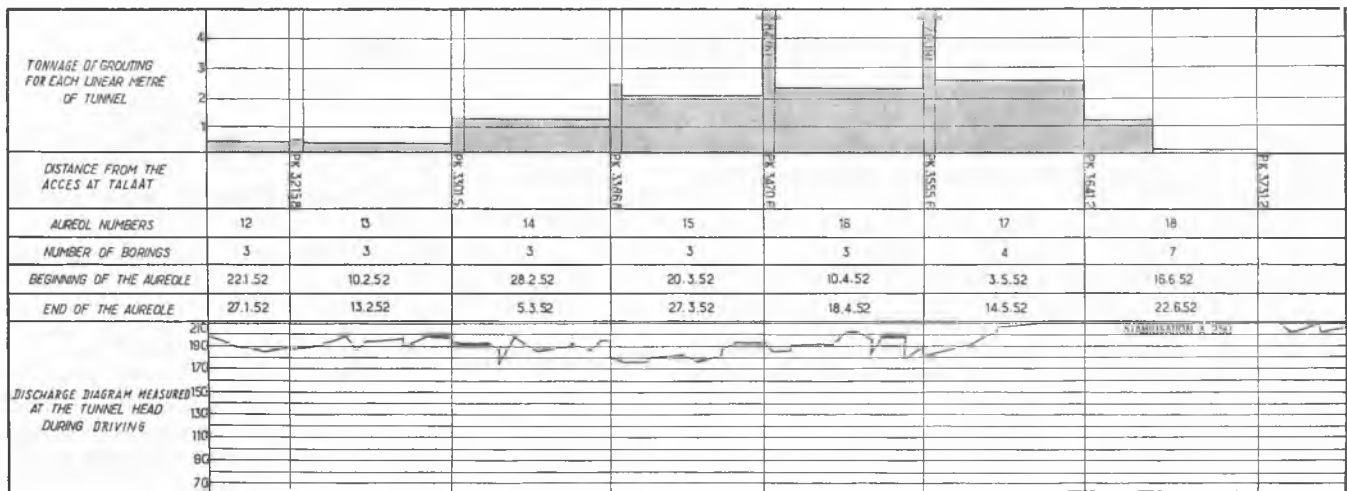
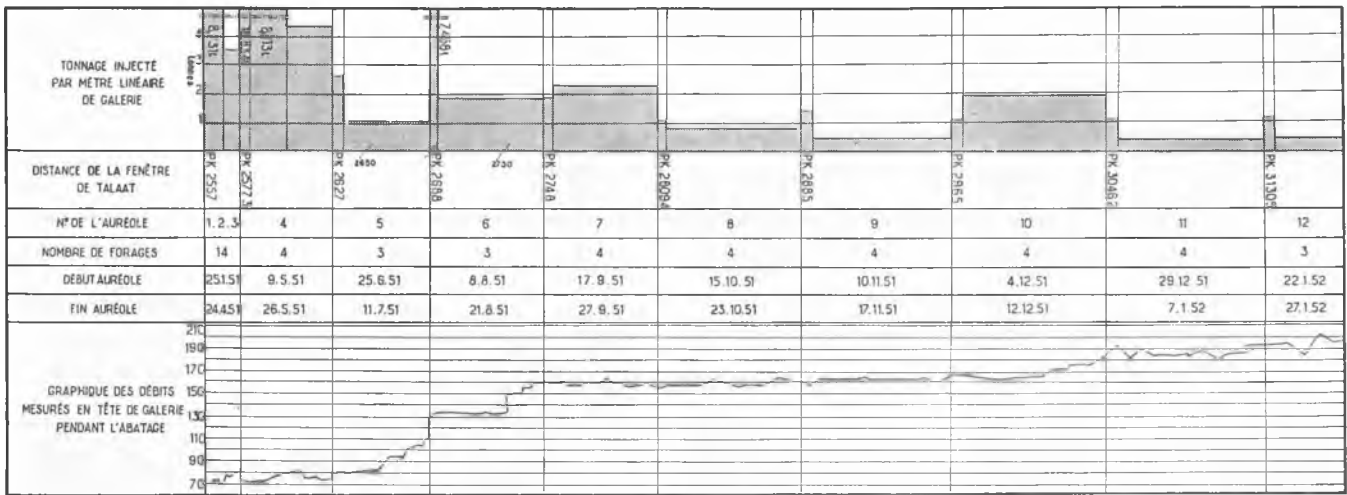


Fig. 2 Galerie d'Afourer – Tunnel «A». Injections d'étanchement à l'avancement. Schéma d'ensemble Afourer Tunnel "Attack A". Preliminary Waterseal Grouting in Front of the Heading. General Scheme

Les produits spéciaux (silicate, etc...) ne sont employés que lorsque le ciment ne peut pas pénétrer convenablement (passages de quartzites broyés par exemple).

### Galerie Ait Ouarda–Afourer (Maroc)

**Situation du problème.** Les aménagements de l'Oued El Abid comprennent notamment, entre le barrage de prise d'Ait Ouarda et l'usine d'Afourer, une galerie d'amenée longue de 10.570 m et de 25 m<sup>2</sup> de section traversant le massif calcaire du Djebel Tazerkount (Moyen Atlas). Au P.K. 2506 de l'attaque principale de Talaat N' Tadout, la galerie pénétra dans des calcaires dolomitiques du lias inférieur, aquifères au point de stopper complètement l'avancement à pleine section au P.K. 2557 et une reconnaissance à section réduite au P.K. 2570. A ce moment, le débit des venues d'eau atteignait 200 l/sec, sous une pression (qui resta pratiquement constante pendant toute la durée des travaux) de 15 kg/cm<sup>2</sup>. La méthode des injections à l'avancement fut alors proposée et appliquée.

**Exécution des travaux.** La phase de démarrage, particulièrement délicate, comporta après bétonnage de la galerie de reconnaissance et exécution du masque, le forage et l'injection d'un groupe de 3 parapluies emboîtés ayant respectivement 10, 25 et 45 m de longueur. Les phases suivantes ne comportèrent

qu'une seule auréole constituée par 3 à 4 forages suivant le terrain et injectée sous une pression de 80 à 100 kg/cm<sup>2</sup>. Tous les efforts furent portés sur l'accroissement de la cadence d'exécution des auréoles qui atteignirent finalement 90 m ce qui permit des tranches d'abatage de 85 m. Le traitement fut arrêté à la 18<sup>e</sup> auréole, au P.K. 3731, par suite de la rentrée dans les marnes étanches. La Fig. 2 représente l'ensemble des injections sur toute la longueur de la partie traitée, avec les caractéristiques principales de chaque auréole, et la Fig. 3 reproduit une auréole complète avec toutes les observations faites.

**Mode opératoire et organisation du chantier.** Les forages furent exécutés au moyen de sondeuses sensitives rotatives légères à diamants (S.I.F., constructeur) particulièrement bien adaptées à ce genre de travaux. Les injections furent effectuées à la presse jusqu'à des pressions de refus de 100 kg/cm<sup>2</sup>. A chaque sondeuse était affecté un ensemble d'injection doté d'un malaxeur à Haute Turbulence. Les sondeuses (3 ou 4 suivant le nombre de forages par auréole) étaient installées sur un échafaudage tubulaire spécialement étudié leur permettant de travailler simultanément. L'ensemble des ateliers de perforation et d'injection était acheminé et replié au moyen d'un train spécial. L'organisation du chantier était prévue dans ses moindres détails de façon à réduire au minimum les temps morts entre les phases d'étanchement et d'abatage, et à utiliser au

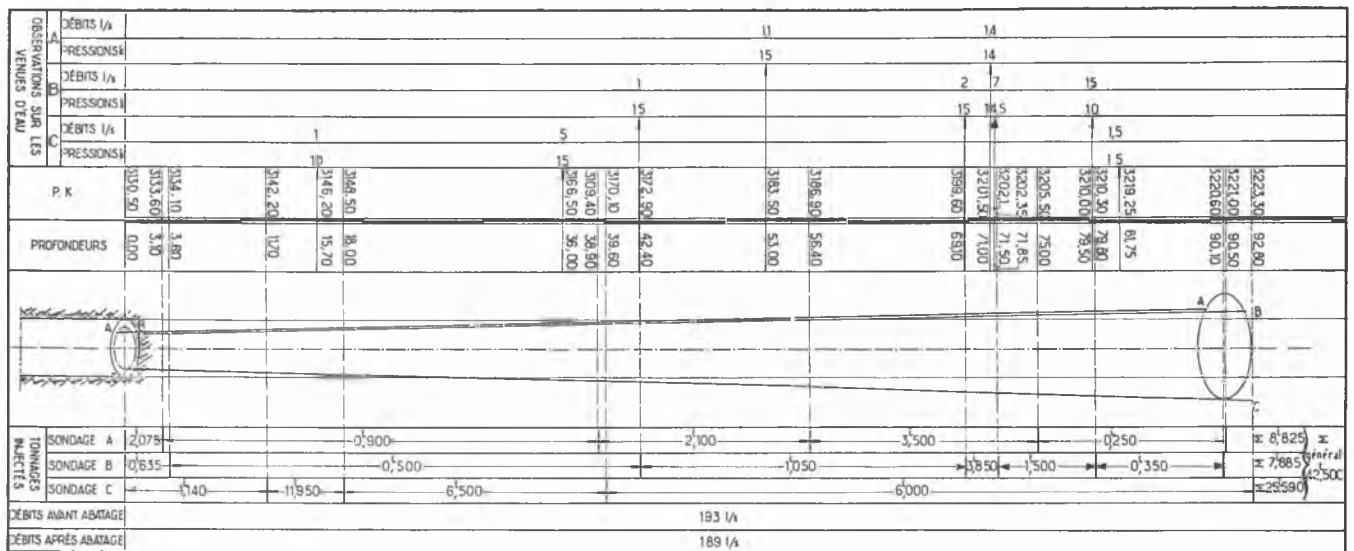


Fig. 3 Galerie d'Afourer – Tunnel «A». Injections d'étanchement à l'avancement. Schéma de la 12<sup>e</sup> auréole Afourer Tunnel "Attack A". Preliminary Waterseal Grouting. Twelfth Aureole Scheme

mieux les équipes de traitement pendant le percement (injections de collage derrière les revêtements déjà exécutés par exemple).

**Résultats.** Si l'on excepte la phase préparatoire et de démarrage, la cadence moyenne générale a atteint 90 m par mois, traitements et abattements compris; la cadence de 120 m par mois a été réalisée sur les 600 derniers mètres, et sur certains tronçons, on a pu dépasser 5 m par jour. La méthode a été appliquée sur près de 1200 m de galerie, avec une absorption moyenne de ciment qui n'a pas dépassé la tonne par mètre linéaire d'ouvrage (phase de démarrage exclue).

Maître de l'œuvre: Energie Electrique du Maroc

Ingenieur conseil: Société d'Etudes Electriques et Hydrauliques au Maroc

Entreprise générale: Entreprise Fougerolle pour Travaux Publics

Entreprise d'étanchement: Société Chérifienne de Sondages, Injections, Forages.

#### Percement du Lac d'Issarlès

**Situation du problème.** La chute de Montpezat (Ardèche, France) est un aménagement complexe comportant, notamment, l'utilisation d'un lac de montagne occupant un ancien

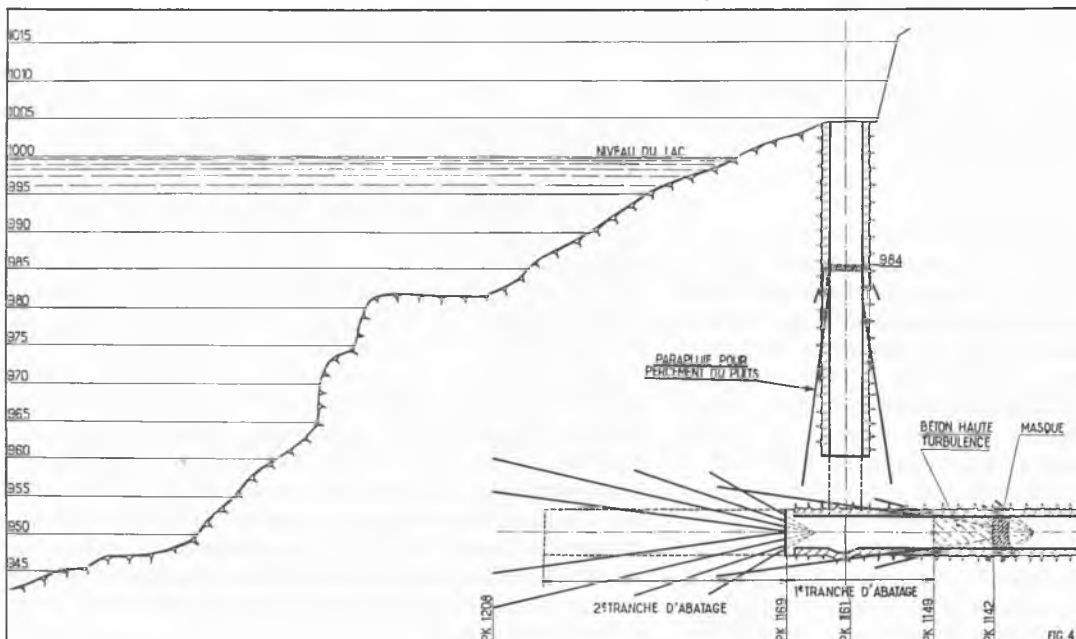
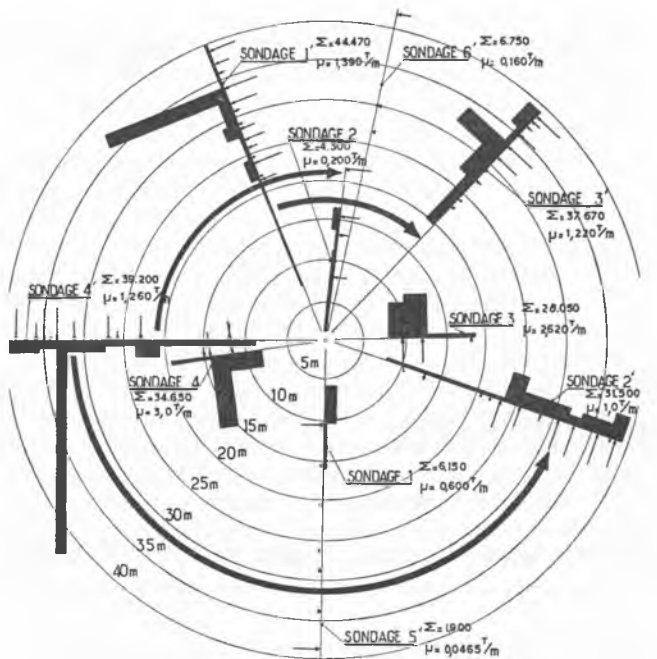


Fig. 4 Lac d'Issarlès. Injections d'étanchement à l'avancement. Schéma général du traitement de la galerie et du puits. Situation au début de la 2<sup>e</sup> tranche d'abatage Lac d'Issarlès. Preliminary Waterseal Grouting in Front of the Heading. General Grouting Scheme of the Tunnel and the Shaft. Situation at the Beginning of the 2nd Section



LÉGENDE.		--NOTICE--	
Σ	ABSORPTION TOTALE DU FORAGE	Σ	TOTAL ABSORPTION OF THE BORING
μ	ABSORPTION MOYENNE GÉNÉRALE DU FORAGE	μ	AVERAGE ABSORPTION OF THE BORING
■	PROPORTIONNEL A L'ABSORPTION MOYENNE DE LA TRANCHE 1cm:10 %	○	RING
→	VENUES D'EAU 1cm:20 %	→	WATER INLET 1cm:20 %
↔	COMMUNICATIONS	↔	COMMUNICATIONS

Fig. 5 Galerie du Lac d'Issarlès. Injections d'étanchement à l'avancement. Diagramme de traitement du 1<sup>er</sup> tronçon de 25 m Lac d'Issarlès Tunnel. Preliminary Waterseal Grouting. Grouting Diagram of the 1st Section

cratère d'explosion et qui fonctionnera comme réservoir avec une capacité utile de 34 millions de mètres cube. Le débouchage de ce lac doit s'effectuer au moyen d'une galerie s'avancant vers lui et située à 50 m environ sous le niveau de l'eau. A 80 m environ du lac, l'avancement de cette galerie s'est trouvé stoppé, par une arrivée d'eau brutale de 200 l/sec. Là aussi, un programme d'étanchement à l'avancement fut proposé par le spécialiste.

**Exécution des travaux.** On exécuta d'abord un bouchon composé d'un masque reporté en arrière et d'un béton de rem-

plissage réalisé par le procédé « Haute Turbulence », puis une auréole de départ et enfin une auréole principale (voir Fig. 4). Le percement put alors être repris sur 20 m dans le rocher, sans arrivées d'eau notables (quelques litres/seconde seulement).

Pour la seconde phase des travaux, l'approche du lac, l'altération plus marquée de la roche décelée par sondages, et la présence dans les cassures de remplissages sablo-argileux difficiles à éliminer complètement, incitèrent à prévoir un gainage plus épais réalisé au moyen de quatre auréoles emboîtées: trois auréoles « extérieures » de 10, 20 et 40 m de longueur, et une auréole « intérieure » de 40 m également (4 forages par auréole). Les auréoles extérieures furent injectées sous 40 kg/cm<sup>2</sup> environ, tandis que pour l'auréole intérieure, on poussa la pression à 80 kg/cm<sup>2</sup>.

**Particularités.** La présence de remplissage argileux dans les cassures et fissures posa le double problème des lavages et de l'adhérence des coulis aux matériaux argileux non totalement éliminés par ces lavages. Une amélioration remarquable de cette adhérence a été obtenue par l'emploi de coulis binaires argile-ciment à faible teneur en argile. Il fut enfin décidé d'adjoindre des colorants de diverses teintes afin de retrouver, au moment du percement, les cheminements des coulis provenant des différentes auréoles ou parties d'auréoles.

**Résultats.** La Fig. 5 représente le diagramme de traitement de la première phase.

Actuellement (décembre 1952), les travaux d'injection relatifs à la seconde phase sont sur le point d'être terminés. Le percement du tronçon ainsi protégé va être entrepris incessamment, et, en principe, poussé jusqu'à une trentaine de mètres du lac.

Par ailleurs, le puits représenté sur la Fig. 4 vient de déboucher dans la galerie; on remarquera qu'il a également été réalisé à l'abri d'un parapluie qui en a notablement facilité l'exécution.

Maître de l'œuvre: Electricité de France, Région d'Équipement Hydraulique, Massif Central II

Entreprise générale: Société Générale d'Entreprise

Entreprise d'étanchement: Société de Sondages, Injections, Forages (S. I. F.).

#### Référence

Rivière, J. et Roger, R. (1950): Aménagement de la Chute de Pralognan. «Travaux», Décembre, No 194, p. 765-775.