Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 87 (1961)
Heft: 19

Artikel: L'injection et ses problèmes
Autor: Cambefort, H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-65048

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: 13.07.2025

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

87e année Lausanne, 23 septembre 1961 N° 19

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'EPUL (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: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève
Membres:
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Grosgurin, arch.; E. Martin, arch.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.; M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION
de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: D. Bonnard, ing.
Membres: M. Bridel; J. Favre, arch.; R. Neeser, ing.; A. Robert, ing.; J. P. Stucky, ing.
Adresse: Avenue de la Gare 10, Lausanne

RÉDACTION
Vacat
Rédaction et Editions de la S. A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Avenue de Cour 27, Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 28.—	Etranger	Fr. 32.—
Sociétaires	»	» 23.—	»	» 28.—
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. 320.—
1/2 »	» 165.—
1/4 »	» 85.—
1/8 »	» 42.50

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

SOMMAIRE

L'injection et ses problèmes, par H. Cambefort, ingénieur civil de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
Bibliographie. — Les congrès.
Communiqué. — Documentation générale. — Nouveautés. Informations diverses.
Supplément : « Bulletin S.I.A. », n° 29.

L'INJECTION ET SES PROBLÈMES

par H. CAMBEFORT, ingénieur civil de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
Professeur à l'Ecole spéciale des Travaux publics. Directeur technique de SOLETANCHE

L'injection utilisée comme procédé de construction a pour but d'étancher ou de consolider les corps solides poreux et perméables tels que les roches fissurées, les sables et graviers ou alluvions et les maçonneries défectueuses.

Pour arriver à ce résultat, on remplit les vides du milieu avec un produit liquide qui se solidifie plus ou moins dans le temps. On recherche une solidification plus poussée pour une consolidation que pour un étanchement.

Ce liquide est appelé coulis. Pour le faire pénétrer, on l'envoie sous pression dans des forages qui traversent les vides à injecter.

Intérêt des injections

Suivant l'implantation des forages, on réalise des écrans étanches ou des massifs injectés plus ou moins importants.

La figure 1 montre par exemple un *écran d'étanchéité* réalisé autour du barrage-voûte de la Chaudanne, sur le Verdon, en France. La disposition des forages, qui est très variable, dépend de l'orientation des fissures du rocher et des possibilités d'implantation.

Dans les alluvions, les forages sont en général verticaux, et sauf exception les écrans étanches comportent au moins deux lignes de forages parallèles. A Serre-Ponçon, sur la Durance, la partie supérieure de la coupure (fig. 2) a nécessité une douzaine de lignes pour que l'écoulement à travers l'écran et au contact du noyau du barrage ait un gradient relativement faible et fixé à priori par les ingénieurs-conseils.

Les injections ne servent pas que pour les barrages. C'est ainsi que pour l'exécution du tunnel routier de Dartford, passant sous la Tamise dans les environs de Londres, le tunnel pilote de 3.60 m de diamètre foncé à l'air comprimé a traversé une couche alluvionnaire de sables et graviers occasionnant des fuites d'air de 80 m³/min. Après l'exécution par injection de deux écrans étanches encadrant le futur tunnel (fig. 3), on a pu foncer celui-ci en 9 m de diamètre avec des fuites de seulement 13 m³/min, alors que celles-ci auraient dû être d'environ 150 m³/min.

Pour la Centrale thermique de Strasbourg, l'injection des alluvions du Rhin a permis de réaliser un fond étanche à une enceinte de palplanches (fig. 4 et 5). La fouille a alors été creusée à sec et les bétons réalisés dans d'excellentes conditions. Une étude économique faite par E.D.F. après l'exécution des travaux a montré que cette solution avait été nettement plus économique que celles qui prévoyaient un fond en béton coulé sous

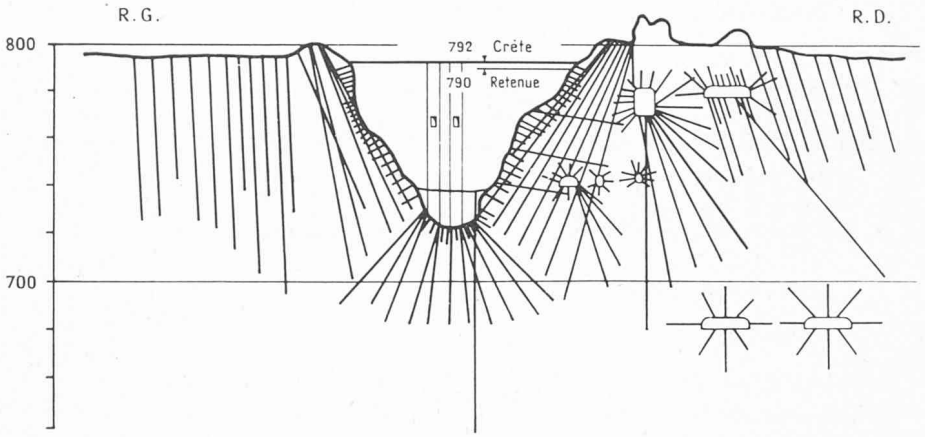


Fig. 1.

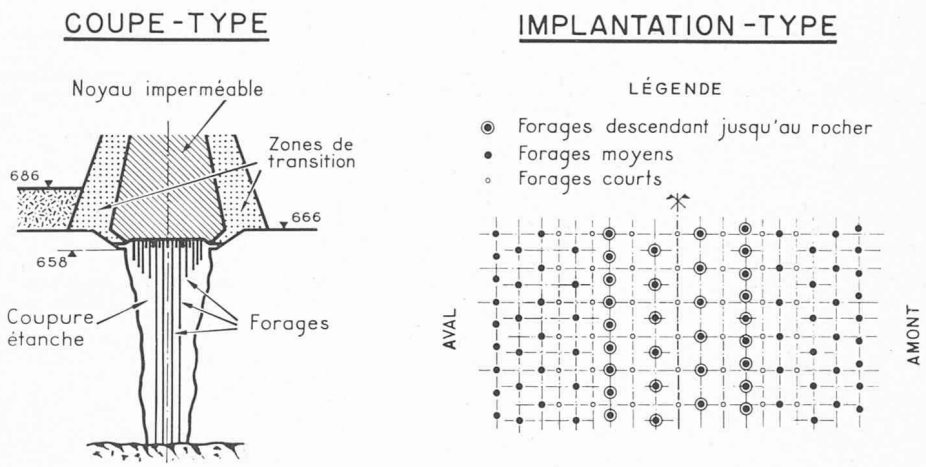


Fig. 2.

l'eau. Cette constatation est très intéressante, car elle va à l'encontre de l'opinion assez bien établie qui veut que les travaux réalisés par injections conduisent toujours à des dépassements de crédits.

Enfin, pour en terminer avec les écrans étanches, signalons les fouilles des Usines du Rhin, en Alsace, pour lesquelles on a réalisé des cuvettes étanches (fig. 6). C'est à Fessenheim que, pour la première fois, on a osé faire un fond étanche. Le débit d'épuisement de ces cuvettes était voisin de 100 l/sec, alors que dans les fouilles des écluses, beaucoup moins profondes, on pompait de 2 à 4 m³/sec.

La *consolidation* par injection est beaucoup plus rare que l'étanchement. Nous rappellerons, pour mémoire, la consolidation de l'épaule rive droite du barrage-voûte de Castillon, sur le Verdon, de 100 m de haut. Ce barrage, dont l'exécution avait été retardée pendant vingt ans à cause de la mauvaise qualité de cet appui, a pu, après ces injections, être mis en eau avec succès.

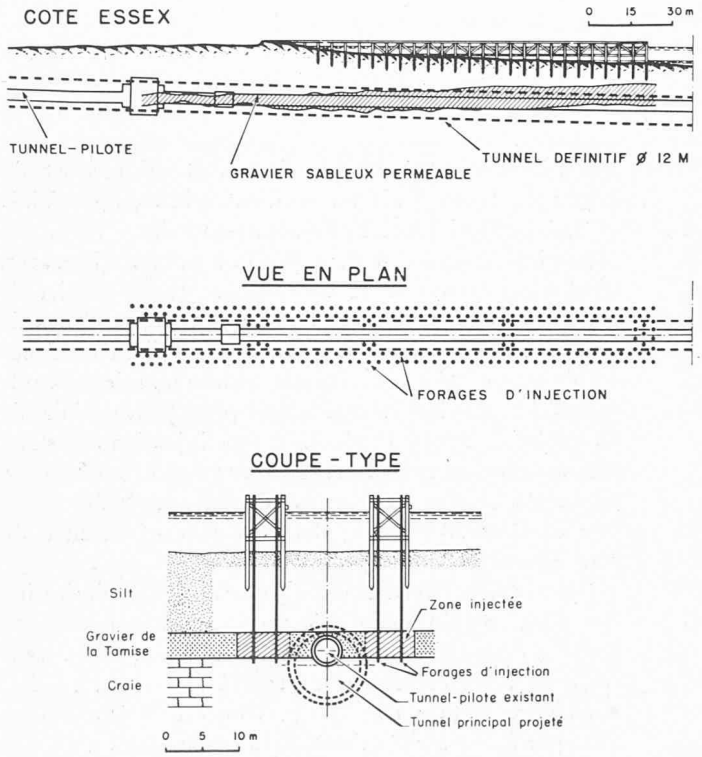


Fig. 3.

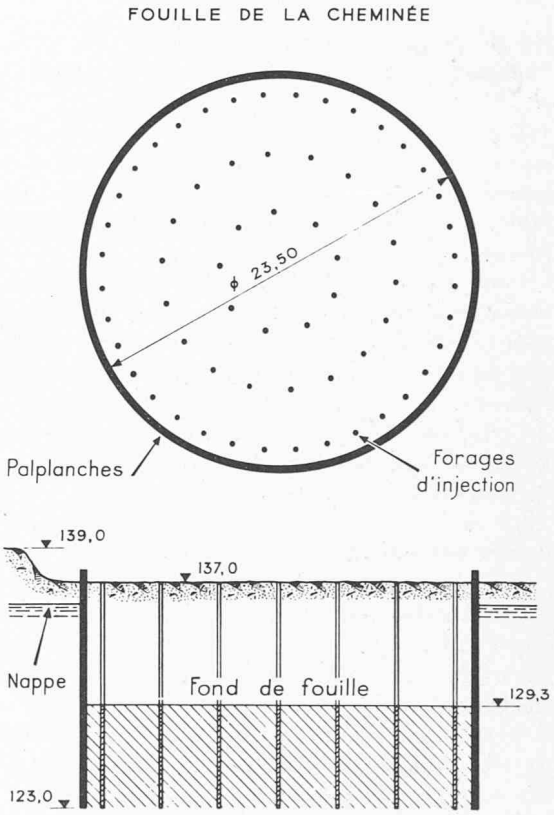


Fig. 4.

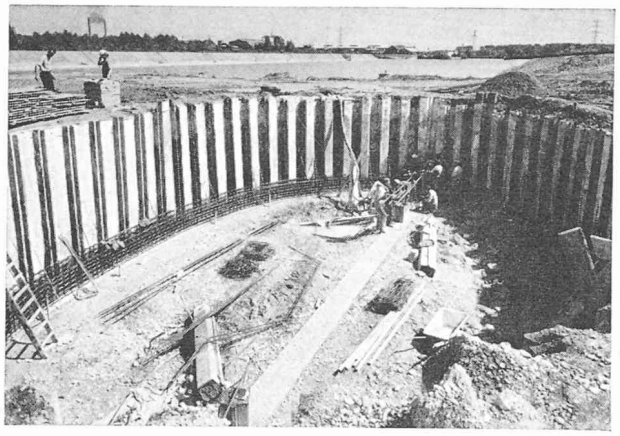


Fig. 5.

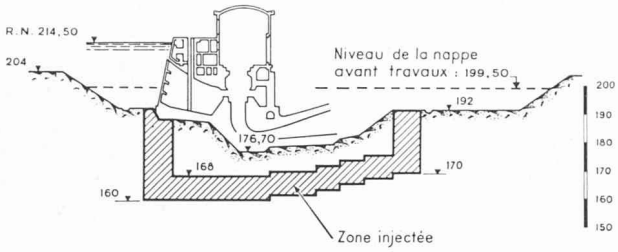


Fig. 6.

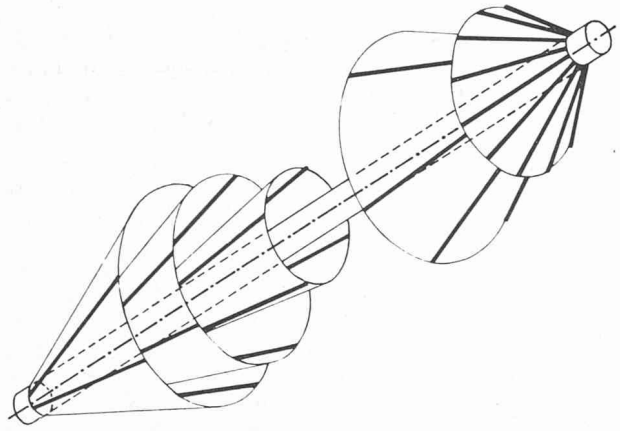


Fig. 8.

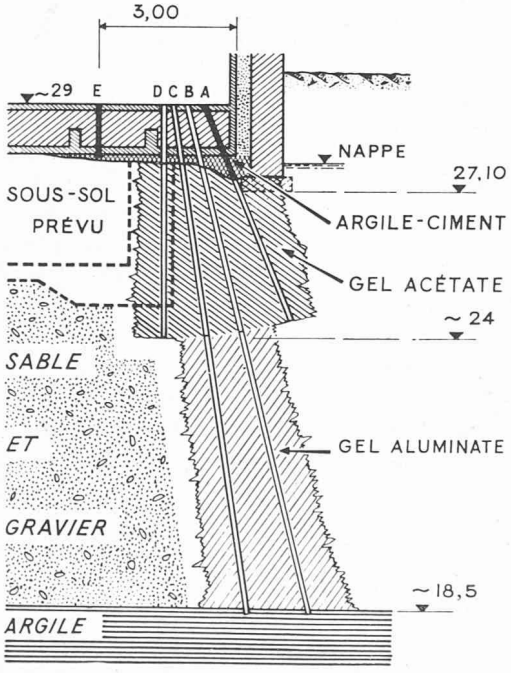


Fig. 9.

Un autre cas de consolidation, beaucoup plus modeste, est celui de la fondation de la pile rive gauche du pont suspendu de Boussens, sur la Garonne (fig. 7). Au dernier moment, alors que rien ne permettait de le prévoir, on a découvert une caverne de plusieurs mètres cubes juste à l'aplomb de cette pile. Après l'avoir nettoyée puis plus ou moins bien remplie de béton, des injections de ciment ont consolidé ce mauvais rocher, rendant ainsi superflus les dispositifs de redressement du pylône qui avaient été prévus.

Nous ne parlerons pas de la consolidation des mauvais rochers traversés par les galeries. Un autre exposé lui est consacré. Signalons que les premiers travaux de ce genre ont été faits en Italie dans la galerie du lac d'Idro, puis en Algérie pour la galerie d'Acif-el-Hammam. Les forages sont alors disposés en auréoles, ou plutôt en faisceaux (fig. 8).

Les sables et graviers constituant en général un très bon terrain de fondation, on ne prévoit leur consolidation que dans des cas bien particuliers. C'est par exemple le cas de la réalisation d'une fouille descendant en dessous des fondations des constructions voisines.

L'exécution de la fouille du poste de transformation du métro, située rue Monttessuy, en plein Paris, correspond à ce genre de travaux (fig. 9 et 10). La partie profonde du traitement correspond à un simple étanchement avec un gel au silicate ordinaire. Au contraire, la partie supérieure a été consolidée par l'injection d'un gel dur à l'acétate. Il est intéressant de remarquer que l'injection des alluvions n'impose pas obligatoirement des forages verticaux. Cependant toutes les fois que c'est possible, il vaut mieux éviter les forages trop inclinés.

Méthodes d'injection

Les méthodes d'injection diffèrent suivant qu'il s'agit d'injecter une roche fissurée ou un massif alluvionnaire. Deux causes en sont la raison :

— dans une roche fissurée, même très fortement, on peut toujours réaliser un forage à découvert, ne serait-ce

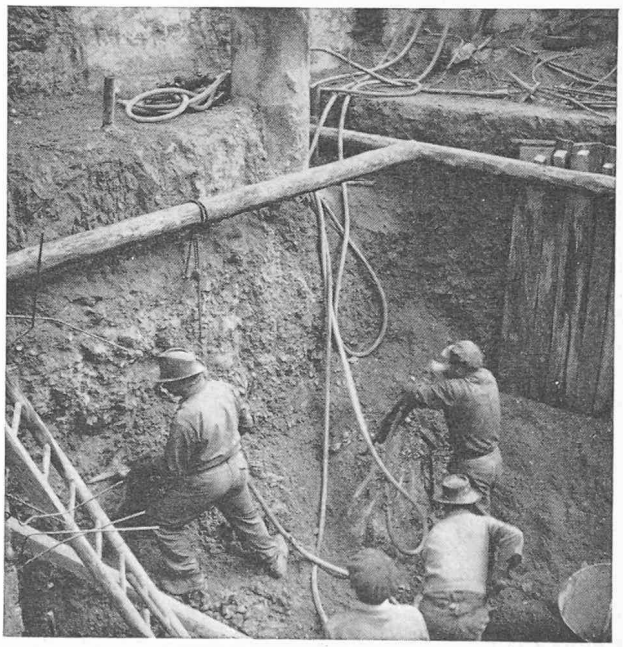


Fig. 10.

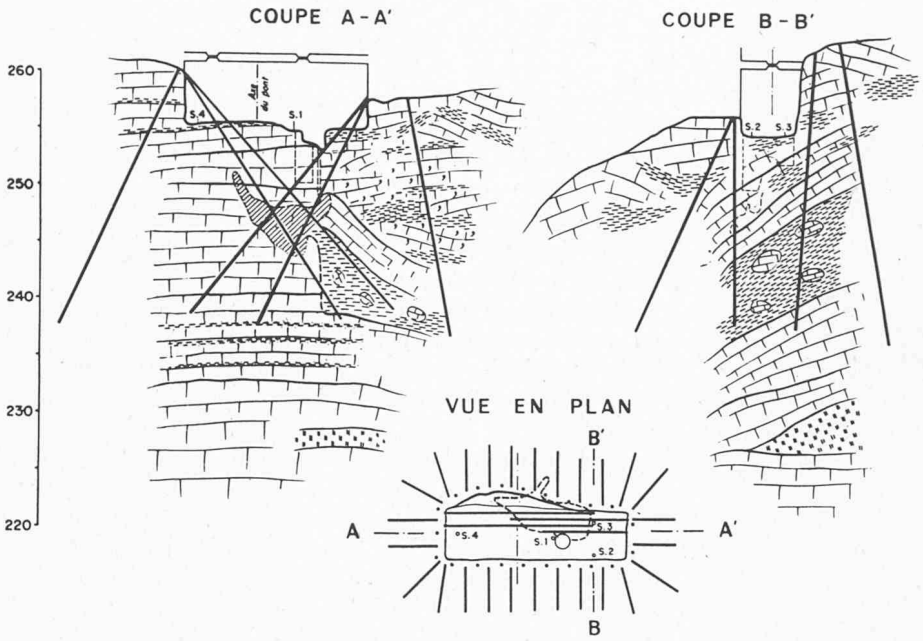


Fig. 7.

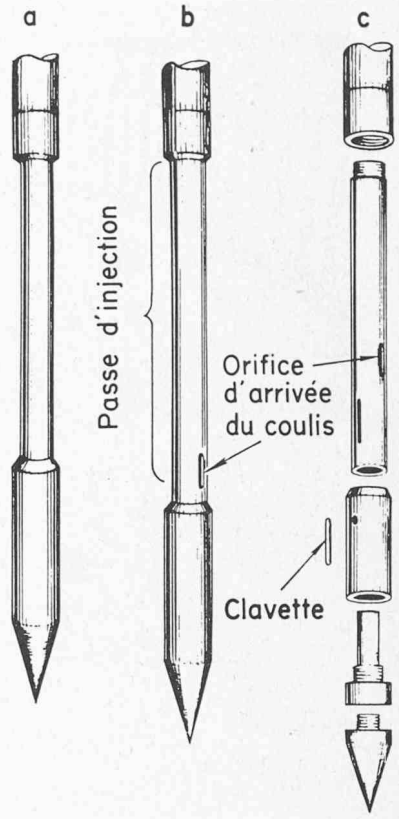


Fig. 12.

Fig. 11.

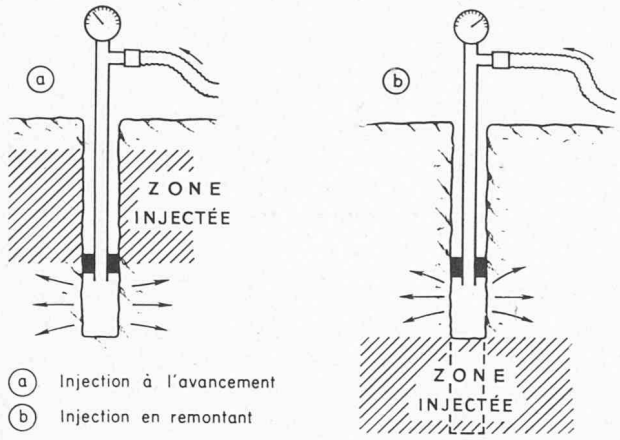
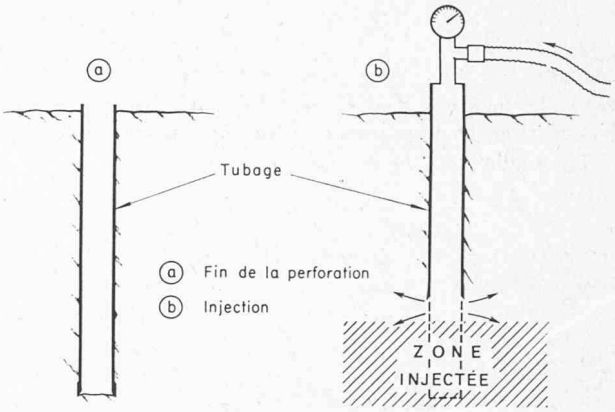


Fig. 13.



que sur un ou deux mètres de long, alors que cela est très difficile dans les sables et graviers ;

— d'autre part, les vides à remplir ne sont pas les mêmes. Alors que l'on peut estimer qu'une fissure a une ouverture sensiblement constante, les vides des sols pulvérulents sont très tourmentés et successivement grands et petits. Les mêmes coulis ne peuvent pas être utilisés.

C'est cette différence dans la forme des vides qui fait que l'injection des alluvions est totalement différente de celle des roches fissurées. On ne l'a d'ailleurs résolu d'une manière économique que très longtemps après celle des fissures.

Forages

Les forages se tenant à découvert dans le *rocher*, il est possible de mettre en place des obturateurs, afin de limiter l'injection à des passes de 3 à 5 m de long. Injecter le forage sur toute sa longueur à la fois est une mauvaise opération, car on ne peut pas adapter la composition du coulis à la dimension des fissures, indiquées par un essai d'eau préliminaire.

On peut ainsi injecter à l'avancement ou en remontant (fig. 11).

Dans le premier cas, on peut à la rigueur disposer toujours l'obturateur en tête du forage, puisque seule la dernière passe perforée n'a pas été injectée. Mais l'injection en remontant ne peut se faire que si la roche n'est pas trop fissurée. Sinon l'obturateur est court-circuité par le coulis et cimenté dans le forage.

Les deux méthodes donnent pratiquement le même résultat. L'injection en remontant présente cependant un très grand avantage économique, car elle permet de séparer les chantiers de perforation et d'injection.

Dans les *alluvions*, les forages doivent être obligatoirement tubés. Différentes méthodes sont possibles :

Pour les injections superficielles, toujours très difficiles à réaliser, on bat au marteau des pointes d'injection très rapprochées les unes des autres (fig. 12). L'injection se fait en retirant la pointe.

On peut aussi réaliser un forage tubé et procéder à l'injection après avoir remonté le tubage par fractions successives de 20 à 30 cm de long (fig. 13).

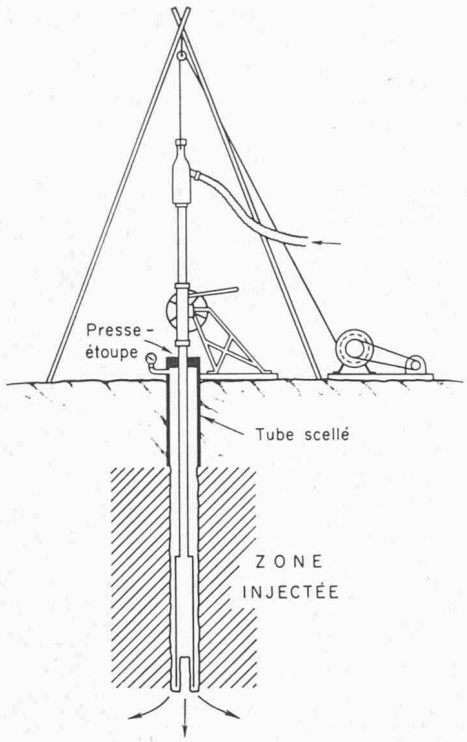


Fig. 14.

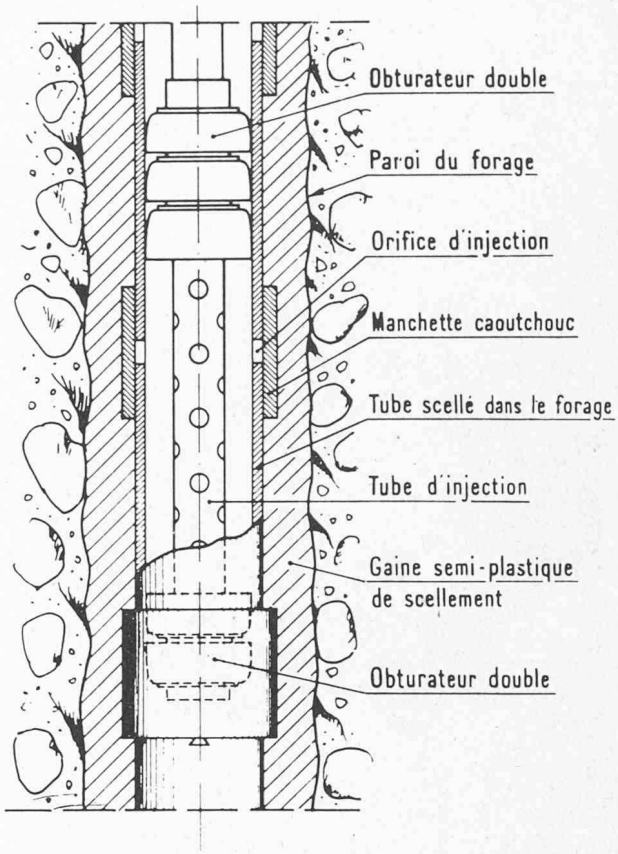


Fig. 15.

On peut également, ce qui est avantageux lorsqu'il y a de gros blocs, faire un forage à la rotation avec un carottier à peine plus gros que les tiges (fig. 14). Après avoir perforé une petite longueur, on remonte un peu le carottier et l'on injecte. Puis on recommence.

La meilleure solution consiste, sans aucun doute, à réaliser le forage sur toute sa longueur et à y sceller un tube à manchettes (fig. 15). Nous n'insisterons pas sur les avantages de cette méthode, décrite par ailleurs de très nombreuses fois.

Coulis

Il existe à l'heure actuelle une très grande variété de coulis, et tout l'art de l'injecteur consiste à savoir choisir convenablement le type de coulis le mieux adapté pour obtenir le résultat recherché sans compromettre l'économie du projet. Ce n'est pas toujours facile.

Les grandes classes de coulis sont indiquées par le tableau suivant :

Dénomination	Composition
Coulis instables	Suspension de ciment dans l'eau (+ éventuellement sable fin)
Coulis stables	Eau-ciment-argile colloïdale (+ éventuellement sable fin) (leur décantation est négligeable) Argile traitée
Produits chimiques	Silicate de soude + réactif donnant un gel Produits hydrocarbonés (pour mémoire) Résines organiques

Les *coulis instables* ne permettent de faire que du remblayage hydraulique. Ce sont eux qui sont utilisés pour l'injection des fissures. Quand celles-ci sont très fines, ce qui est indiqué par les faibles absorptions de l'essai d'eau préliminaire, on injecte des coulis très dilués : $\frac{C}{E} = \frac{1}{10}$, par exemple. A cet égard, il est intéressant de noter que les cimentations de puits de mines faites vers 1925 étaient commencées avec des coulis dilués au 1/50. A l'heure actuelle, on a abandonné ces très faibles dilutions. C'est sans doute un tort, si l'on se place au point de vue technique pure.

A l'autre extrémité de l'échelle des concentrations, on utilise les coulis à 1/1, ou à la rigueur à 1,5/1. Si ces forts dosages ne suffisent pas, il faut changer de nature de coulis, en commençant par des coulis stables.

Pour ces coulis instables, la pression d'injection a une très grande importance, car c'est elle qui, en ouvrant les fissures, favorise l'injection. Nous reviendrons plus loin sur ce point.

Sauf cas vraiment très exceptionnels et difficilement prévisibles, ces coulis ne conviennent pas pour injecter les sables et graviers. Si les grains de ceux-ci sont trop fins, inférieurs à 1 ou 2 mm par exemple, le ciment ne pénètre pas dans les vides, et s'ils sont plus gros il se dépose tout de suite, en donnant à l'injection un rayon d'action ridiculement faible (fig. 16).

Les *coulis stables* sont, par suite de leur absence de sédimentation pendant la durée de l'injection, de véritables fluides que l'on pourrait pomper indéfiniment si la prise du ciment, augmentant leur viscosité, ne faisait croître abusivement la pression d'injection.

Avec eux, il faut toujours limiter à priori les quantités injectées. On peut le faire sans crainte, car leur

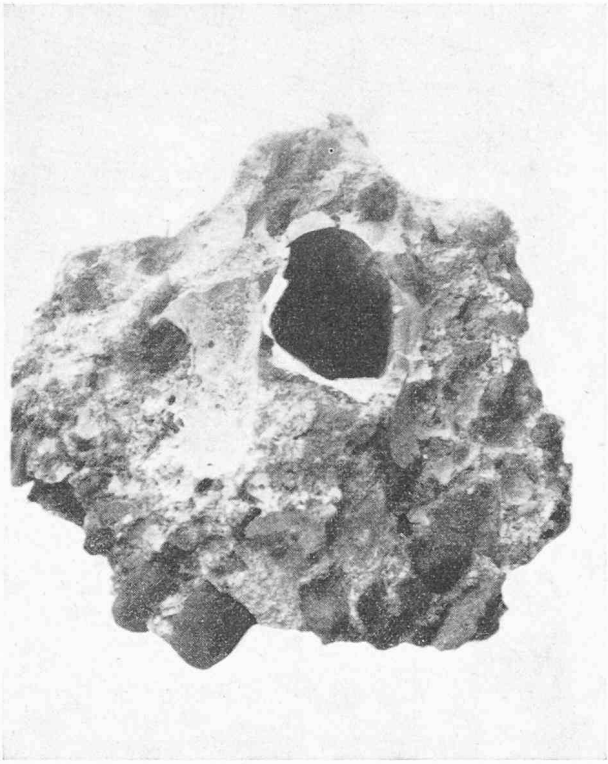


Fig. 16.

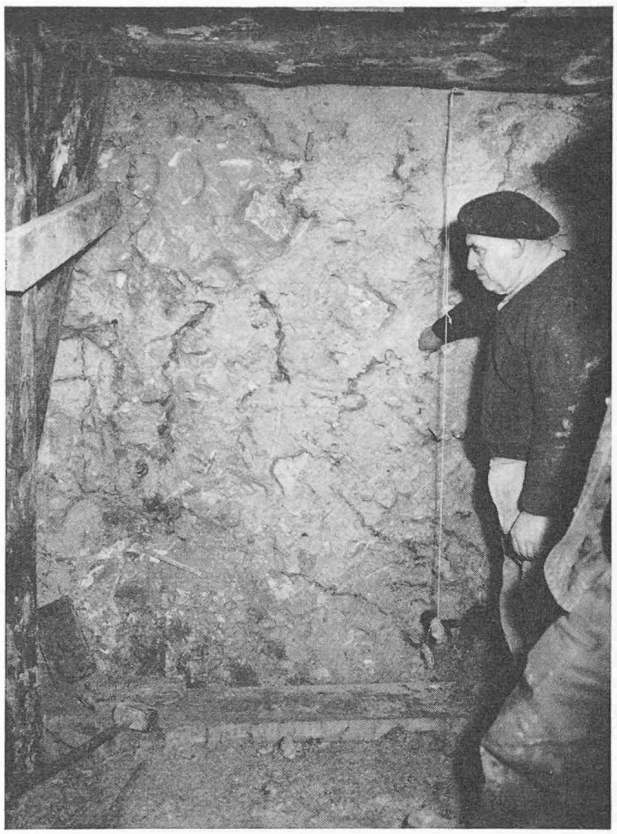
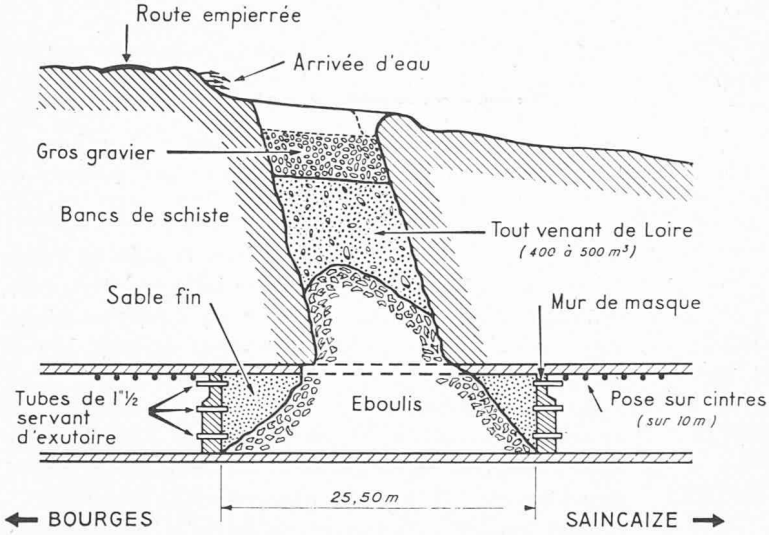


Fig. 18.



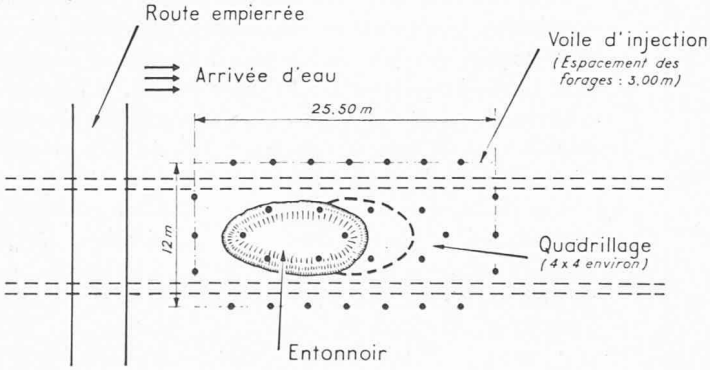


Fig. 17.

sédimentation étant presque négligeable, leur eau de constitution est mobilisée par la prise du ciment.

Leur pression d'injection dépend de la perméabilité du sol ou de l'ouverture des fissures, de leur viscosité et du débit.

Contrairement à ce qui se passe dans l'injection des coulis instables, la valeur de cette pression est sans influence sur la qualité du résultat. Cependant, si elle est trop forte on risque des claquages, véritables fissures artificielles, d'abord verticaux puis horizontaux. Nous y reviendrons.

Ce sont ces coulis qui ont permis l'injection économique des sables et graviers et qui sont maintenant utilisés pour l'obturation des grosses fissures. Dans ce dernier cas, il convient de faire suivre ce premier traitement par une injection de coulis instable qui permet un remplissage des petits vides produits par la sédimentation des coulis stables, et un clavage en pression du rocher.

C'est également grâce à eux que l'on peut facilement « cimenter » les blocs produits par un éboulement et qu'il convient d'excaver. C'est ainsi qu'ont été traités plusieurs éboulements de vieux tunnels en France (fig. 17-18 et 19).

Les *argiles traitées* constituent le coulis de transition entre les coulis stables et les produits chimiques, lorsque le traitement assure la défloculation des argiles (dans ce cas, la composition du coulis est protégée par un brevet).

Fig. 19.

C'est ainsi qu'avec de la bentonite, les plus gros grains ne dépassent pas quelques microns. Ils sont donc comparables aux gouttelettes des fines émulsions de bitume. Ces coulis présentent à l'état final une rigidité faible mais suffisante, alors que le bitume n'en a pas.

Si la défloculation n'est pas assurée, ces argiles traitées sont plus voisines des coulis argile-ciment que des produits chimiques.

Dans les *produits chimiques*, nous ne parlerons pas de produits hydrocarbonés, qui ne sont pratiquement jamais utilisés. Par contre, les gels obtenus à partir d'un silicate de soude et d'un réactif ont été depuis fort longtemps les seuls produits chimiques utilisés.

Jusqu'à 1940 environ, c'étaient les seuls coulis qui permettaient d'injecter les alluvions. C'était une solution onéreuse.

Pour les étanchements, on faisait appel aux gels plastiques. Le coulis comportait un mélange de silicate et de réactif dosés de manière telle que la transformation en gel se fasse au bout d'un temps donné parfaitement réglable à l'avance. Ces coulis ont fait l'objet de nombreux brevets : Lemaire et Dumont, Gayrard, Rodio, etc. C'est à Rodio que revient le mérite d'avoir utilisé ces gels d'une manière vraiment industrielle.

Pour les consolidations, on injectait d'abord le silicate de soude puis un réactif, qui provoquaient la formation instantanée d'un gel dur. Ce sont les brevets Joosten et François. Ce procédé nécessite des forages très rapprochés : 0,60 m à 1 m, car par suite de la réaction instantanée le rayon d'action de l'injection est très petit. Il semble cependant que François n'ait jamais utilisé son gel pour la consolidation des sables et graviers.

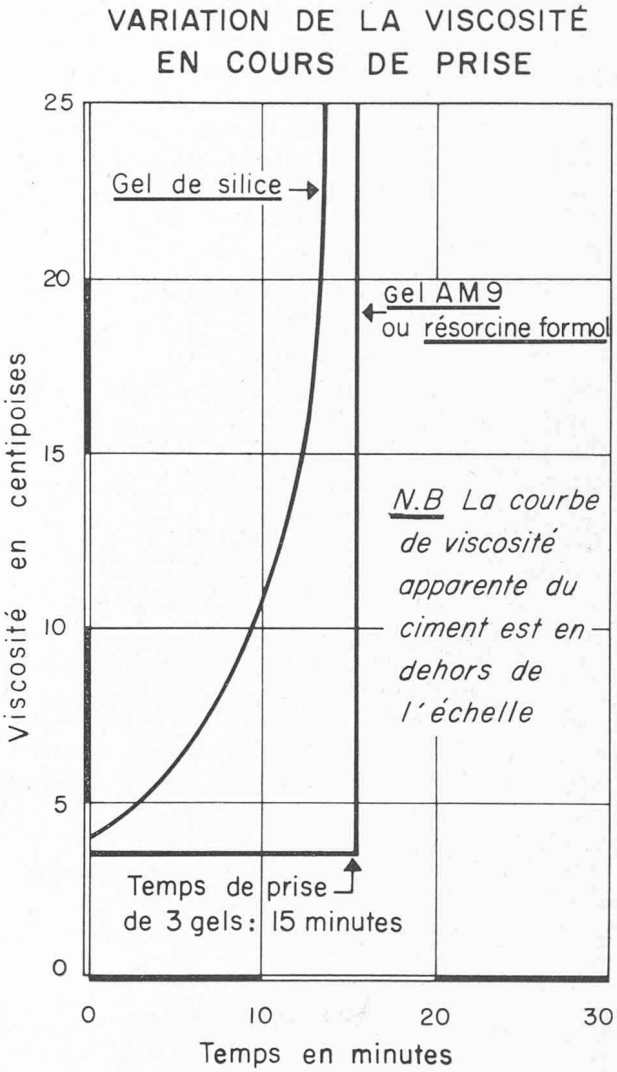


Fig. 20.

Depuis quelques années, divers procédés permettent l'obtention d'un gel dur en injectant à la fois silicate et réactif, comme pour un gel plastique. C'est un très grand avantage, car on peut ainsi conserver l'écartement habituel des forages, c'est-à-dire 2 à 3 m environ.

Il convient de signaler que tous les coulis faisant intervenir du silicate de soude sont extrêmement sensibles à la composition chimique de celui-ci, qui varie d'un pays à l'autre. Il n'y a donc pas de formule de coulis passe-partout.

Malgré leur apparence, les coulis à base de silicate ne sont pas des liquides au même titre que l'eau, par exemple. Dès le mélange du silicate et du réactif, la viscosité augmente, pour conduire à un coulis ininjectable parce que trop visqueux bien avant que la transformation en gel se produise. En outre, ils contiennent des micelles colloïdales qui, quoique fort petites, interdisent la pénétration de ces coulis dans des sols très fins, comme les limons.

Seules les *résines organiques* ont une viscosité égale à 1,5 à 2 fois celle de l'eau, rigoureusement constante jusqu'à la polymérisation (fig. 20). On peut dire que tous les sols dans lesquels l'eau circule tant soit peu sont injectables aux résines. C'est une question d'implantation de forages, de méthode et de patience.

Pour qu'une résine organique puisse servir de coulis

d'injection, il faut qu'elle puisse se polymériser à la température ordinaire, à l'abri de l'air et en présence d'eau. En outre, si l'on veut injecter des milieux calcaires, il vaut mieux qu'elle ne soit pas acide.

Malgré les très nombreux brevets pris dans ce domaine, les conditions précédentes limitent actuellement à trois les résines utilisables et effectivement utilisées en injection.

Ce sont :

— l'AM 9, qui est une acrylamide ;
— la résorcine-formol ;
— l'urée-formol.

Ce classement correspond au prix des coulis. L'AM 9 se situe aux environs de 4000 NF le m³ et l'urée-formol à 600 NF. Ceci explique pourquoi, malgré leurs qualités remarquables, les résines ne sont utilisées que quand on ne peut pas faire autrement.

Ces résines, par leurs propriétés distinctes, ont des domaines d'application différents.

L'AM 9 donne un produit presque totalement élastique. Une éprouvette de ce coulis après polymérisation se raccourcit de 30 % d'une manière parfaitement élastique avant de se rompre.

La résorcine-formol peut, suivant sa dilution, donner des produits dont la résistance à l'écrasement varie de quelques dizaines de grammes par cm² à quelques dizaines de kilos par cm². Le prix du coulis diminue évidemment lorsque la dilution augmente.

L'urée-formol fournit les plus fortes résistances, mais comme il s'agit d'un coulis acide, on ne peut pas l'utiliser facilement pour l'injection de tous les sols.

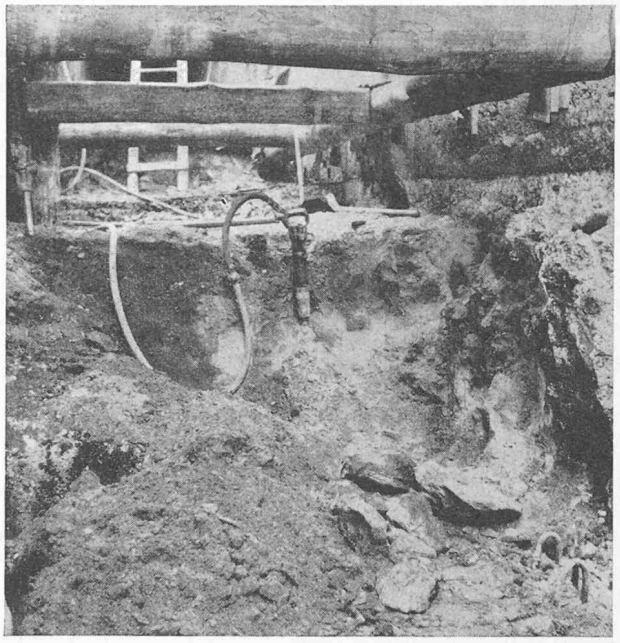


Fig. 22.

Par suite de leur prix de revient très élevé, ces résines n'ont encore été utilisées que pour des travaux très spéciaux.

C'est ainsi que l'on a injecté les sables très fins servant de fondations à l'immeuble des PTT de la rue Pastourelle, à Paris, pour permettre le passage d'une galerie (fig. 21 et 22).

De même un puits d'accès de l'Emissaire Nord-Est

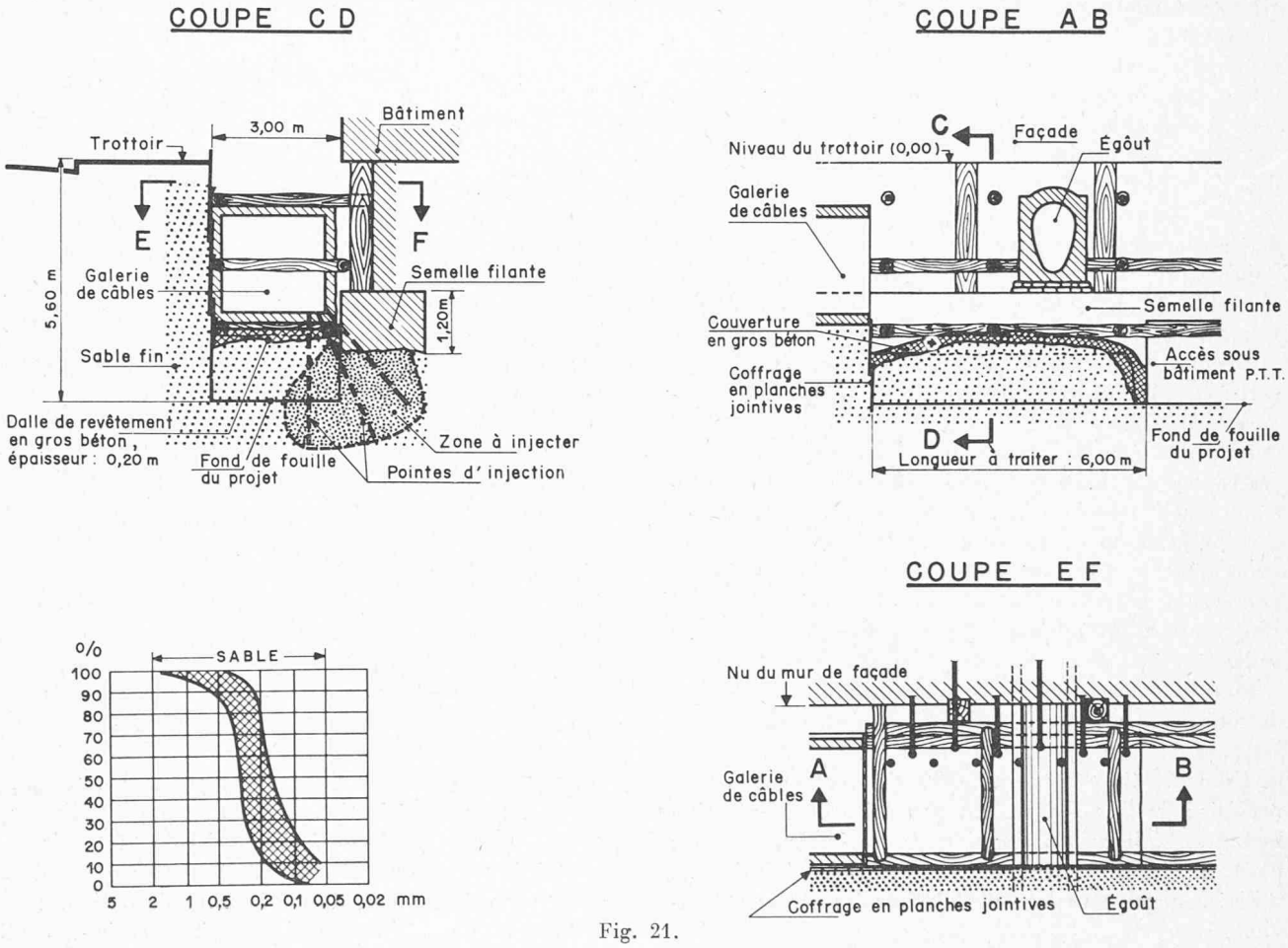


Fig. 21.

de Paris, dans lequel des renards avaient complètement désorganisé le sous-sol, a pu être repris avec succès après l'injection aux résines de la couche de sable de Beauchamp qui avait été le siège de ces désordres (fig. 23).

Malgré leur fluidité, ces coulis ne peuvent pas être injectés n'importe comment, et en particulier à gros débit, si l'on ne veut pas claquer le terrain. Il serait alors inutile de faire appel à des coulis aussi nobles et surtout aussi onéreux.

* * *

Après cette rapide vue d'ensemble, nous allons revenir sur deux points particulièrement importants. Ce sont :

— la pression d'injection des coulis instables ;
— les claquages.

Pression d'injection des coulis instables

Toutes les fois qu'une injection de ciment est à faire dans une roche fissurée, se pose la question de savoir jusqu'à quelle pression on peut aller, et on assiste souvent à un véritable marchandage de kg/cm² entre le maître de l'œuvre et l'entrepreneur spécialiste.

Il n'y a pas et il ne peut pas y avoir de règles absolues, puisque c'est le rocher qui commande. Aussi est-il nécessaire de connaître un certain nombre de faits pour essayer d'avoir une opinion.

Tout d'abord, consultons les anciens.

A. François signale en 1923, pour la remise en service des puits de mines détruits à la fin de la première Guerre mondiale, l'utilisation de pressions d'injection élevées que l'on n'oserait pas appliquer actuellement dans les travaux publics.

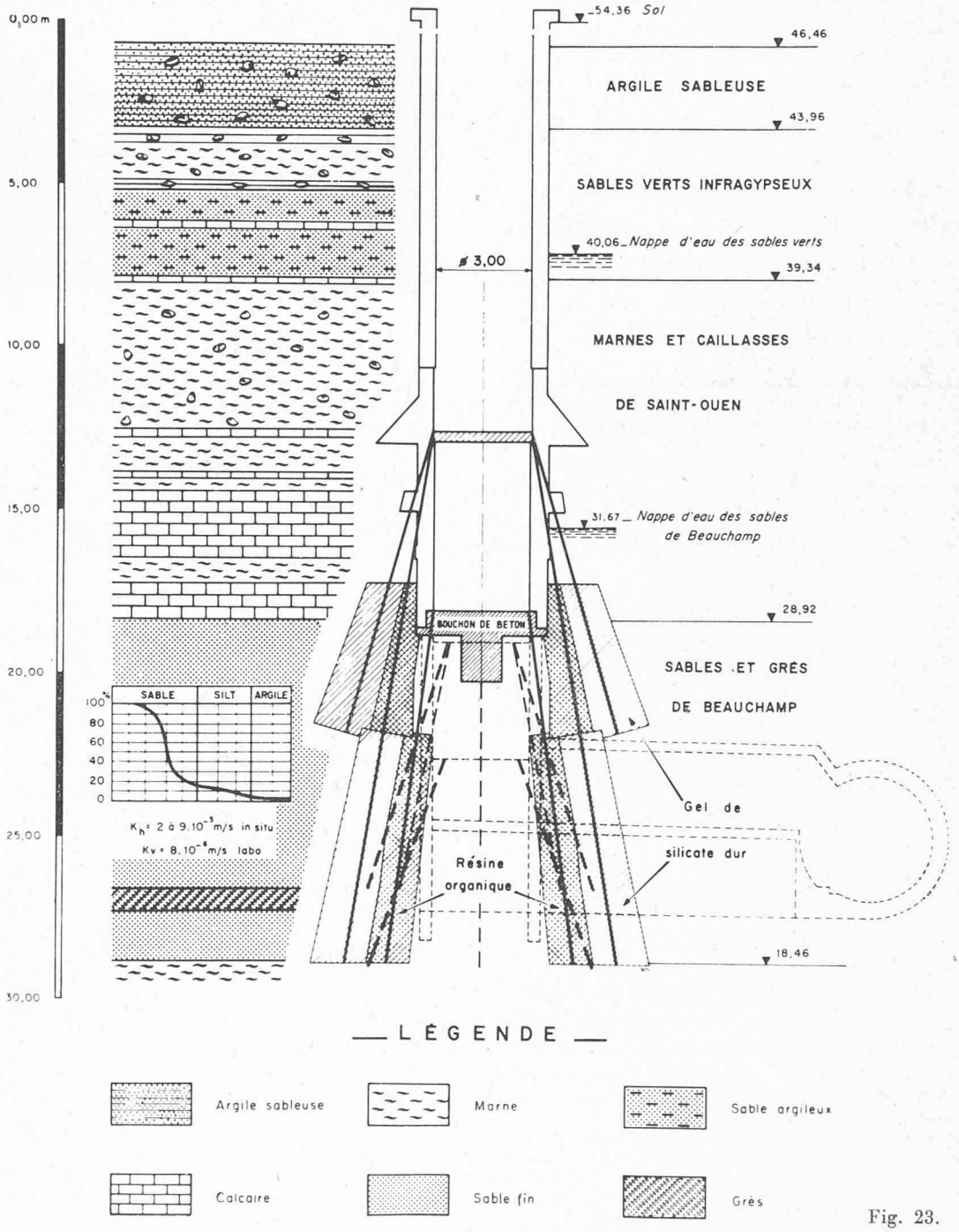


Fig. 23.

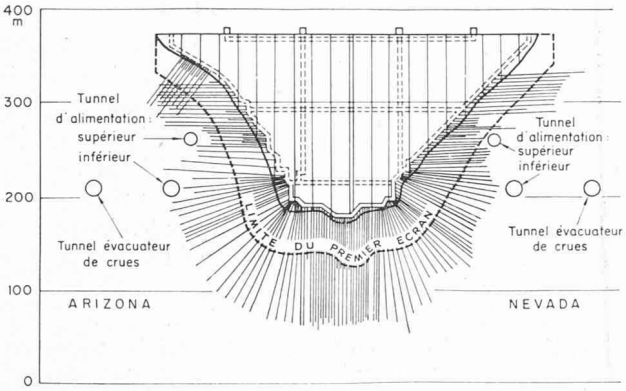


Fig. 24.

C'est ainsi qu'au puits n° 11 des mines de Lens, dont le cuvelage détruit au droit des horizons aquifères était constitué par des pièces de chêne jointives de 12 à 20 cm d'épaisseur, on a injecté jusqu'à 40 kg/cm². Les forages situés sur deux cercles concentriques au puits se trouvaient à 4 m et 6,50 m du cuvelage. Lorsque l'injection se faisait au droit des brèches du cuvelage, on a simplement limité les pertes de coulis. Au moment du dénoyage du puits, les terrains ne donnaient plus d'eau.

F. Arguillère, en 1927, précise :

« ... Le rôle joué par les *hautes pressions d'injection* est assez clair et constitue une caractéristique physique du procédé. Ces pressions sont poussées jusqu'à 80 et 90 kg. Elles facilitent, lors de la prise, l'expulsion de l'eau en excès, l'eau de cristallisation subsistant seule, et constituent un correctif aux erreurs possibles de dosage. Elles augmentent l'adhérence du dépôt aux terrains mêmes sales et contribuent à éviter le danger d'une prise en magma plus ou moins boueux. Elles élargissent des fissures trop étroites, y font pénétrer et y poussent plus loin le lait de ciment. Enfin, elles arrivent à créer dans le terrain, en suivant grossièrement les plans de ses diaclases de nouvelles fractures, revêtues d'une fine pellicule imperméable, formant un réseau anastamosé au travers duquel la circulation d'eau sera limitée par de fortes pertes de charge... »

Le professeur Lugeon dit, dans son livre *Barrage et Géologie* (1933) :

« ... On utilisait anciennement, et il y a peu de temps encore, les cloches à air comprimé pour envoyer la laitance. On était donc dépendant de la pression des compresseurs du chantier et on ne dépassait guère une charge de 10 kg au cm². Ce système a été remplacé par la pompe à ciment, qui permet une injection continue, ce qui est essentiel, et à haute pression, ce qui est capital, pouvant atteindre jusqu'à 50 kg et plus.

» Il n'y a que dans les phases supérieures des roches à stratification horizontale que l'on ne cherchera pas à atteindre de si hautes charges, de crainte de soulever des bancs rocheux, mais pour toute autre roche il n'y a rien à redouter... »

Plus près de nous, P. Lévêque a fait, dans les années voisines de 1950, toute une série d'essais systématiques au Maroc, et, ce qui est très important, il est allé voir le résultat. Il s'agit d'injections peu profondes.

La première fois, la pression de refus a été fixée à 15 kg/cm² dans des grès arkosiques plus ou moins altérés. Il a pu faire alors les observations suivantes :

— le ciment se trouve dans des fissures sensiblement verticales. Les plans de stratification subhorizontaux ne sont pratiquement pas injectés ;
— dans une fissure aboutissant à un forage, la granulométrie du ciment déposé est sensiblement constante sur 25 à 40 cm, puis elle devient plus fine avec un rétrécissement correspondant de la fissure, pour finir par un dépôt pulvérulent ;

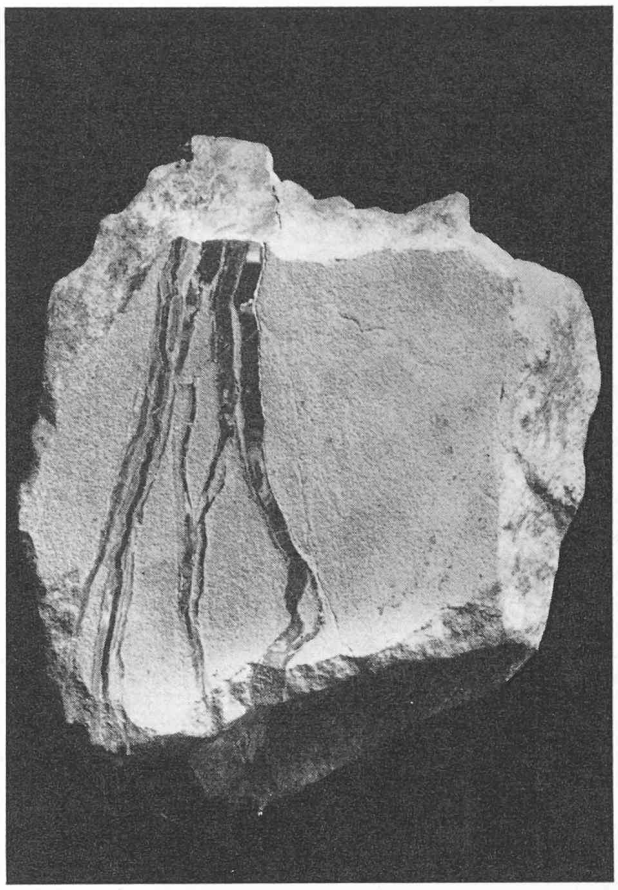


Fig. 25.

— certaines fissures sont tapissées d'un dépôt pulvérulent laissant un vide entre les deux parois, avec quelques points isolés de grains de ciment les réunissant.

Dans un second essai organisé à proximité du précédent, la pression a été poussée jusqu'à 100-110 kg/cm². Les forages, de 7 m de long, étaient exécutés à partir d'une petite tranchée peu profonde.

Cette fois, la galerie de visite a montré que :

— même les fissures de 0,5 mm d'épaisseur étaient remplies par un ciment compact, rayant le verre ;
— on ne trouvait plus, comme dans le premier essai, des dépôts pulvérulents. Le ciment était partout bien soudé aux parois des fissures et ses différentes fractions granulométriques n'étaient pas différenciables.

Au cours d'un troisième essai, réalisé dans une superposition de lentilles, de sables limoneux et de conglomérats à galets quartziteux ou gréseux, essai dans lequel la pression d'injection a été poussée jusqu'à 90 kg/cm², P. Lévêque a remarqué en particulier que :

— l'épaisseur d'une fissure injectée est maximale au voisinage d'un forage. Elle diminue en s'éloignant ;
— le terrain est injecté suivant les plans de séparation des masses lenticulaires de sable limoneux et de conglomérats. Ces plans sont parallèles au pendage général. Mais il existe aussi des cheminements perpendiculaires au pendage et passant au contact de gros galets de quartzite.

Ces différentes observations permettent de dire que :

— la qualité du ciment déposé dans les fissures augmente avec la pression d'injection ;
— la pression du coulis ouvre les fissures, et au voisinage du forage plus fortement qu'au loin. Ceci est conforme à la théorie ;

— malgré l'opinion du professeur Lugeon, l'injection à très forte pression des couches superficielles d'une roche dont les plans de stratification sont sensiblement parallèles à la surface du sol, ne provoque pas forcément des désordres. Dans le premier essai, ces plans n'ont pas été injectés ;
— les fissures injectées perpendiculaires au pendage général sont des claquages dont nous parlerons plus loin.

De nombreux travaux ont été réalisés en France et sans doute à l'étranger en utilisant des pressions très élevées. Nous prendrons un seul exemple, c'est celui de la consolidation du rocher autour de la conduite forcée de la Chute de Montpezat.

Après avoir collé au rocher les bétons du revêtement au moyen de forages pénétrant de seulement 20 cm dans le rocher, on les a approfondis de 2 à 4 m puis on les a injectés jusqu'à 100 kg/cm².

Il n'en est résulté aucun désordre et les mesures faites par la suite ont montré que le module d'élasticité du rocher avait été augmenté d'environ 50 %.

Il ne faut cependant pas croire que les injections sont toujours sans danger. D'une manière presque générale, on peut dire que des injections sous un barrage en soulèvent toujours une partie. Mais contrairement à ce que l'on pourrait croire, ce ne sont pas les pressions les plus élevées qui sont les plus dangereuses.

Ainsi le barrage à voûtes multiples du Meffrouch, en Algérie, est fondé sur des dolomies karstifiées, dans lesquelles se trouvent par endroits de très grandes lentilles d'argile. Il était admis que les injections pouvaient être poussées jusqu'à 35 kg/cm². Il ne s'est jamais rien passé d'extraordinaire quand cette pression était atteinte. Par contre, des fissures dans les maçonneries ont été créées avec des pressions de l'ordre de 5 kg/cm². Une étude du phénomène a montré que dans ces cas-là la passe injectée traversait une lentille d'argile. Cette dernière était claquée par l'injection sur une grande surface horizontale et il suffisait d'une faible pression du coulis pour former un vérin colossal.

Au cours de ces travaux, on a pu observer un phénomène remarquable : avec une pression d'injection très basse, on constate la formation d'une fissure verticale dans une voûte. L'injection est immédiatement arrêtée. Mais cela n'empêche pas la fissure de s'ouvrir. Elle atteint environ 10 mm à la surface du sol, puis elle se referme pour redevenir filiforme.

On peut penser que le coulis s'est accumulé dans une cavité due à la compressibilité de l'argile jusqu'au moment où un claquage horizontal s'est amorcé. C'est alors qu'on a arrêté l'injection. Mais l'argile jouant le rôle d'accumulateur hydraulique a chassé le coulis de la poche dans le claquage. La fissure amorcée s'est alors ouverte puis le claquage s'étendant au loin, la pression a baissé et la fissure s'est refermée.

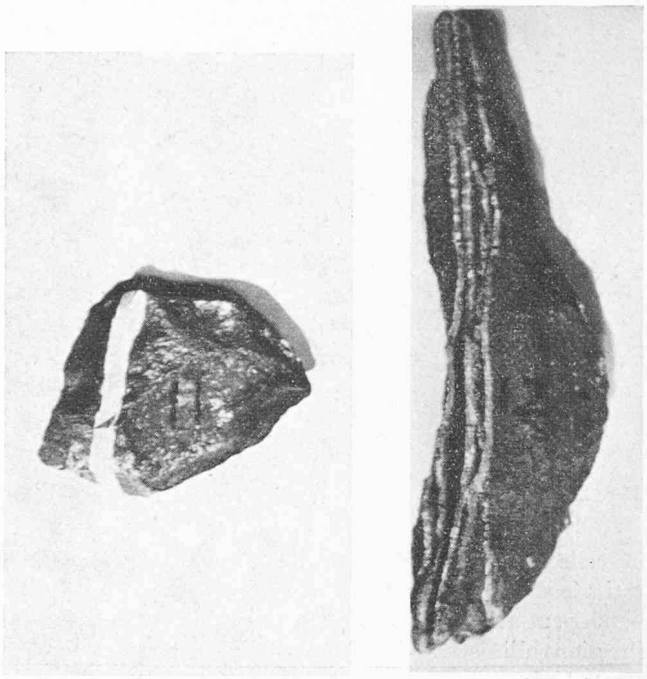
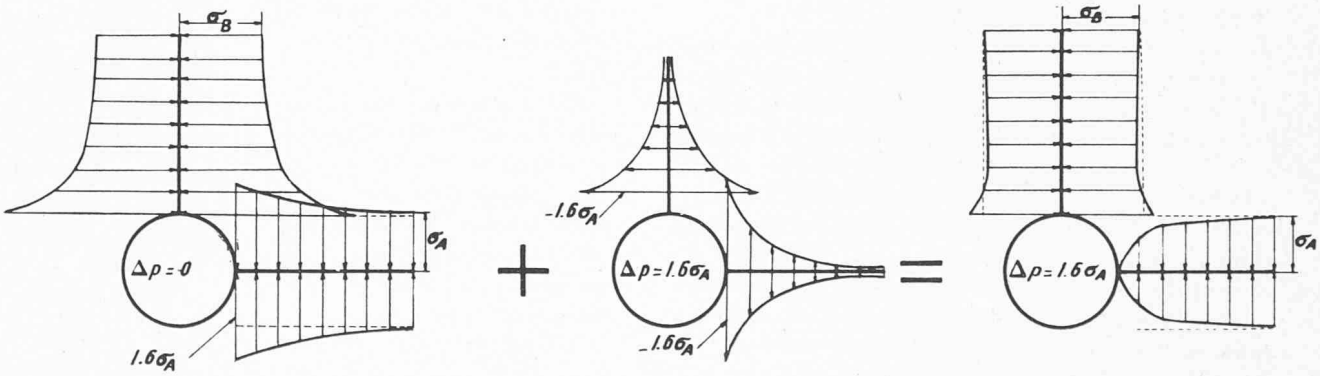


Fig. 26.

Si l'on veut injecter correctement les fissures, de tels incidents sont inévitables. Utiliser à priori des pressions très basses pour être sûr de ne rien désorganiser ne permet pas de faire du bon travail.

C'est ainsi que l'écran d'étanchéité du Boulder Dam injecté suivant les spécifications américaines, c'est-à-dire à basse pression et en arrêtant l'injection dès qu'une résurgence se manifeste, a dû être entièrement refait après la première mise en eau, car les fuites à travers le rocher interdisaient toute exploitation de l'usine (fig. 24). On en a profité pour approfondir les forages.

Cette grande différence dans la profondeur des deux écrans provient de ce qu'aux Etats-Unis on ne fait pas d'essais Lugeon pour déterminer les horizons à injecter. La profondeur du premier voile avait été fixée à priori,



Contraintes après exécution d'un forage dans un massif supportant les contraintes principales σ_A et σ_B

Contraintes dues à une surpression égale à 1,6 σ_A dans le forage

Contraintes totales

Fig. 27.

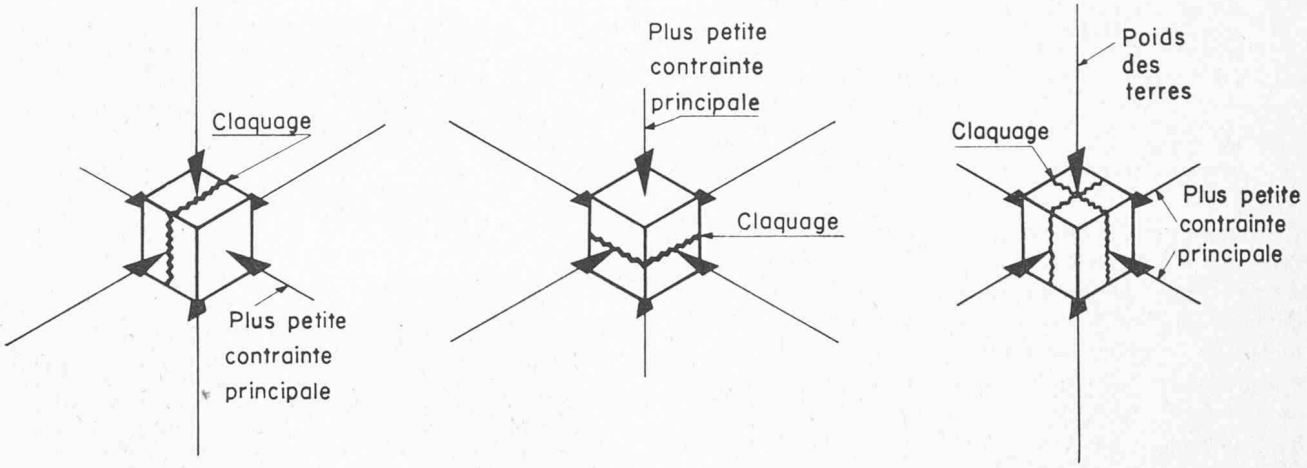


Fig. 28.

et celle du second à partie de la qualité du rocher estimée d'après l'aspect des carottes.

On peut aussi penser que c'est à cause des très faibles pressions d'injection qu'il est possible de trouver aux Etats-Unis un assez grand nombre de voiles d'étanchéité dont l'efficacité est douteuse.

Claquages

Les claquages ou encore coups de sabre sont de véritables fissures artificielles remplies de coulis.

L'attention a été attirée sur eux par l'observation des fouilles faites dans des alluvions injectées. Mais ils ne se produisent pas uniquement dans ces sols. On les trouve assez fréquemment dans les roches tendres, moins souvent dans les roches dures (fig. 25 et 26).

Ce sont M. K. Hubbert et D. G. Willis (1957) qui, en faisant l'étude de la fracturation hydraulique des puits de pétrole, ont montré comment ces claquages pouvaient se produire.

L'observation des resultats obtenus dans plusieurs champs pétrolifères et la considération des contraintes régnant sur les parois d'un forage creusé dans un massif soumis à un système de contraintes uniformes (fig. 27) ont conduit ces auteurs à penser que les claquages se faisaient toujours perpendiculairement à la plus petite contrainte principale sollicitant le terrain (fig. 28).

Pour vérifier cette hypothèse, ils ont confectionné des blocs de gélatine soumis à différents systèmes de contrainte. L'injection d'un lait de plâtre, par un forage central, a toujours donné des claquages perpendiculaires à la plus petite contrainte principale.

Ils sont même arrivés à fissurer perpendiculairement à la stratification des blocs constitués par une superposition de couches dures et de couches très molles de gélatine, alors qu'on aurait pu penser que le claquage aurait dû se faire uniquement dans les couches molles.

Les essais confirment donc l'hypothèse sur l'orientation des claquages. Il ne semble pas qu'on puisse la mettre en doute.

Il faut donc connaître les contraintes sollicitant un massif pour pouvoir évaluer à l'avance l'orientation des claquages et la pression à laquelle ils se forment.

En général on ne fait pas une telle recherche, mais il y a des cas où de simples considérations permettront d'avoir une idée sur l'orientation des claquages.

Un exemple remarquable de claquage de roches tendres est fourni par l'écran d'étanchéité rive gauche du barrage de Bou Hanifia, en Algérie.

Cet écran vertical a été exécuté à partir de deux galeries de travail disposées l'une au-dessus de l'autre, aux cotes 300 et 255 environ. En plus, il se trouve situé approximativement dans le plan médian de la croupe formant l'appui rive gauche du barrage. Cette disposition, due en grande partie au hasard, est très importante, car on peut penser que les plus petites contraintes sollicitant le massif sont perpendiculaires à ce plan.

Les injections ont été faites au ciment dans un complexe marno-gréseux. Les forages étaient espacés de 2,50 m et les passes d'injection avaient 3 à 4 m de long. Afin d'examiner les résultats obtenus dans un horizon plus particulièrement gréso-sableux, on a réuni par un puits les deux galeries de travail. L'emplacement du puits a été choisi entre deux forages, en sorte qu'il les découvre sur toute leur hauteur.

On a remarqué sur les parois du puits que l'injection a claqué le terrain suivant des plans verticaux situés dans le plan de l'écran (fig. 29). Ces claquages sont extrêmement nombreux et plus ou moins longs. Certains sont relativement épais, d'autres ramifiés (fig. 30).

Que les couches soient sableuses, gréseuses ou marneuses, elles sont traversées

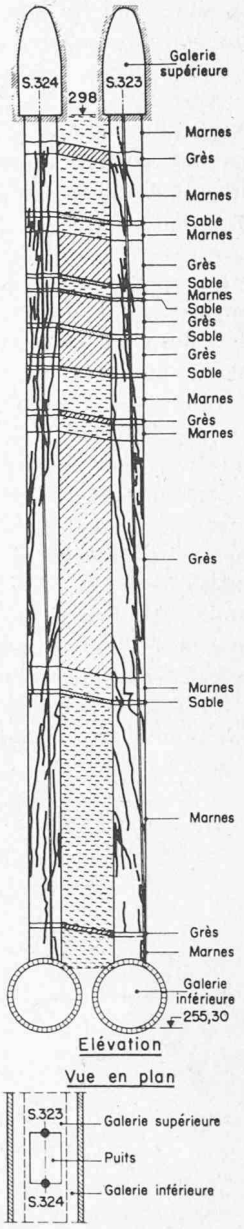


Fig. 29.

par les mêmes claquages qui se propagent sans aucune discontinuité. Il s'agit donc bien de claquages et non de fines fissures élargies par l'injection. Leur répartition, ainsi que l'allure tourmentée de certains d'entre eux, confirment ce point de vue.

Il faut dire que leur formation a été favorisée par l'injection simultanée de plusieurs forages voisins les uns des autres. Mais ce mode opératoire n'explique pas tout, car également appliqué sur l'autre rive il n'a pas donné les mêmes résultats, puisque les rares claquages observés avaient des directions quelconques.

Dans les roches dures, on peut aussi observer des claquages, surtout quand on creuse une galerie pour laquelle on a injecté des forages à l'avancement (fig. 31). Mais ils sont en général moins abondants que ceux obtenus dans les roches tendres.

Des claquages extrêmement nombreux se produisent également lors de l'injection des sables et graviers. On peut même penser que très souvent l'efficacité du voile n'est presque due qu'à eux. En effet, dans ce cas-là, les contrôles locaux ne donnent pas une grande diminution de la perméabilité, alors que le contrôle global effectué au moment de la mise en service de l'ouvrage montre que le traitement a été satisfaisant.

Si l'on pense qu'à une profondeur donnée la poussée du massif sur un plan vertical est de beaucoup inférieure au poids du massif à ce même niveau, on voit que les premiers claquages ne peuvent se faire que suivant des plans verticaux. Ils peuvent d'ailleurs se propager jusqu'à la surface du sol.

Au fur et à mesure de leur formation, ils resserrent le terrain et il arrive un moment où c'est la contrainte verticale qui devient la contrainte minimale. Il se forme alors des claquages horizontaux et l'injection a simplement pour effet de soulever le sol.

Une conséquence très importante de tout ceci est que, si l'on veut imprégner tous les vides d'un sol alluvionnaire avec des coulis, il faut :

— que le coulis puisse bien pénétrer dans ces vides ;
— que la pression d'injection ou encore son débit ne soient pas trop élevés, sinon on ne peut que claquer le terrain.

Alors que la première condition est évidente, il n'en est pas de même de la seconde. Beaucoup d'injecteurs l'ignorent. Alors, pour avoir des prix bas, ils injectent avec des débits élevés et ils font du mauvais travail. C'est dommage, car c'est ainsi qu'on discrédite un procédé qui par ailleurs a toute sa valeur.

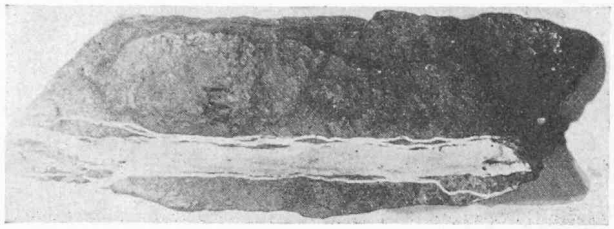


Fig. 30.

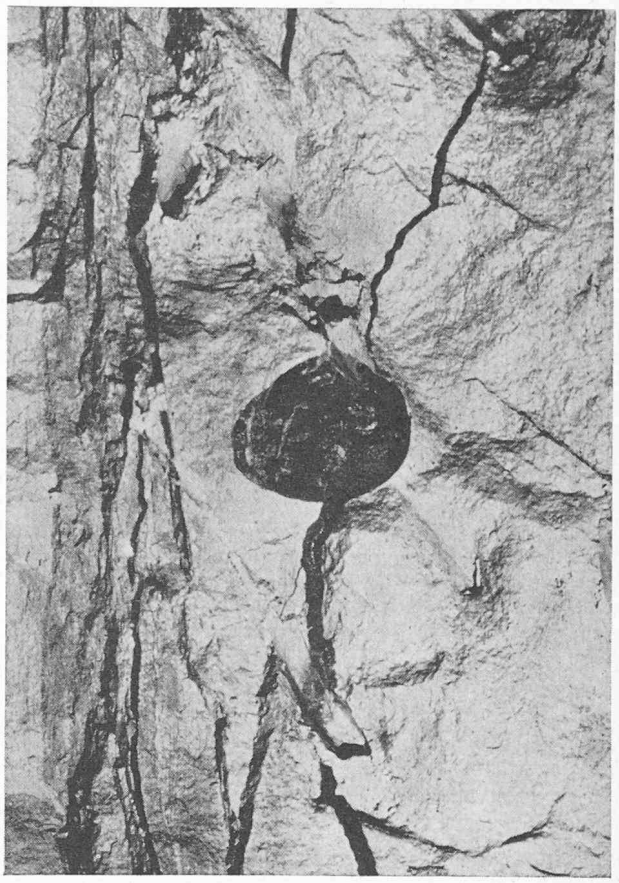


Fig. 31.

BIBLIOGRAPHIE

F. Arguillère : *Cimentation des grès vosgiens.* Revue de l'Industrie minérale, 1er novembre 1927.

A. François : *Sur les travaux miniers exécutés par les procédés de la cimentation et de la silicatisation.* Revue industrielle des Mines, 15 juillet 1923. Congrès scientifique de l'Association des ingénieurs de l'Ecole de Liège (Section des Mines).

P. Lévêque : *Géologie appliquée aux Grands Travaux du Maroc. Etude de quelques emplacements de barrage.* Service géologique du Maroc. Fasc. II. Notes et Mémoires, nº 98. Rabat, 1954.

— *Contribution à l'étude du cheminement de divers coulis d'injection.* Bulletin de la Société géologique de France, 6e Série, Tome 7, Fasc. 7. Paris, 1957.

M. Lugeon : *Barrage et géologie.* Dunod, Paris, 1933.

H. van Massenhove : *Les applications des procédés de cimentation François au fonçage de puits, réparation de cuvelages et tracé des galeries en terrains aquifères.* Congrès international des Mines de la Métallurgie et de la Géologie appliquée. Liège, 1930.

BIBLIOGRAPHIE

Thermische Turbomaschinen (Dampfturbinen, Gasturbinen, Turboverdichter), par *Walter Traupel.* Editions Springer-Verlag, Berlin 1960. — Un volume 20 × 28 cm, 459 figures, 420 pages. Prix : relié, DM 61, 50.

Le deuxième volume de l'ouvrage du professeur W. Traupel sur les machines thermiques à impulsion est consacré d'une part au réglage, d'autre part aux problèmes constructifs.

Les chapitres concernant le réglage traitent des turbines à vapeur, des compresseurs et des turbines à gaz ; tant l'aspect théorique que les réalisations des principaux constructeurs sont signalés dans cette partie de l'ouvrage.

Les problèmes constructifs liés aux machines thermiques font l'objet d'une étude détaillée. Le fonctionnement à hautes températures et à vitesses de rotation élevée, qui caractérise les turbo-machines thermiques, entraîne un certain nombre de problèmes technolo-