

Fig. 1. — *Vue de l'installation complète d'injection.*  
*Au premier plan, les trois pompes accouplées sur les trois tubes. Au deuxième plan, les six malaxeurs. A l'arrière-plan, la sonnette fonçant les tubes.*

## ***Construction des murs-digues du canal Albert dans la traversée de Haccourt-Lixhe près de Visé (Belgique)<sup>1</sup>.***

### ***La consolidation du terrain par injection.***

**L**A bibliographie consacrée à la consolidation du sol par injection est pauvre sur le détail du procédé, elle s'étend de préférence sur l'importance de la quantité de matière injectée.

Il faut cependant admettre que la quantité de matière injectée dans un sondage ne peut avoir qu'une importance accessoire, si l'on ne détermine, par une prospection ultérieure, la répartition de la matière dans le sous-sol.

Il convient d'ajouter, il est vrai, que dans la grande majorité des cas, la consolidation du terrain par injection n'a qu'un but restreint, par exemple imperméabiliser une zone limitée en vue de permettre le fonçage d'un puits, ou encore colmater les fissures des masses rocheuses qui

(1) Voir l'article paru dans "La Technique des Travaux" de décembre 1931, pages 747 à 760.



constituent l'assiette d'un barrage. Dans ces cas, la consommation de matière ne peut avoir qu'une importance minime, eu égard au but poursuivi.

Nous insistons cependant sur le fait que la quantité de matière injectée ne peut, en aucun cas, servir de critérium au procédé.

Il est arrivé, en effet, d'injecter, lors des essais, dans un seul tube, une grande quantité de ciment, environ 15.000 kgs, et lors du creusement du puits de prospection, de ne rien retrouver dans le rayon immédiat de l'injection.

De multiples expériences ont permis de déterminer qu'il y a une corrélation étroite entre les quantités injectées, la densité de l'injection et la variation de pression en chaque point de l'injection, et que ces trois fonctions dépendent étroitement du degré de transmissibilité du terrain.

Le procédé appliqué au chantier du canal Albert ne peut être considéré comme universel. Au contraire, il démontre que la consolidation du sous-sol constitue toujours un cas d'espèce et que si elle est une science pratique, elle relève essentiellement de l'art de l'ingénieur: ce ne peut être une simple question de tour de main à la portée de tout le monde. Elle réclame l'observance stricte de principes techniques, du jugement, de la méthode et des soins particuliers et constants.

Jusque dans ces dernières années, la cimentation a trouvé des applications intéressantes dans le creusement des puits de mine. Elle était alors presque exclusivement du ressort du mineur.

Les catastrophes survenues à certains barrages ont montré que la principale considération pour l'établissement d'un barrage est la qualité du terrain sur lequel il est assis et qui doit assurer à la fois la stabilité de la fondation et l'étanchéité de la base d'enracinement.

On sait combien est onéreuse l'observance de la condition de M. Rabut, voire de la condition de Maurice Lévy, par rapport au cas où l'on peut éliminer les sous-pressions (1).

La question essentielle dans la construction et la permanence d'un barrage est donc une fondation inaffouillable, incompressible et à l'abri des infiltrations d'eau.

Par son application aux barrages, la cimentation est donc entrée dans le domaine du constructeur.

Envisagée sous ce jour, la cimentation est un procédé qui consiste à injecter du ciment dans un

terrain, dans le but d'en remplir tous les vides, de façon à constituer un agglomérat monolithique, présentant une étanchéité suffisante pour détourner ou contrecarrer les courants souterrains et pour annuler les sous-pressions. Accessoirement, la cimentation a pour but de solidifier uniformément le sous-sol de manière à augmenter sa capacité portante.

La cimentation telle qu'elle a été prévue pour les murs-digues à construire sur la rive gauche du canal Albert, est certes une conception hardie, en raison de son ampleur et des particularités du sol à injecter. Ce travail est exécuté par la Société des Pieux Franki, sous la direction générale de M. Lambermont, Ingénieur en Chef, Directeur des Ponts et Chaussées, et de M. Santilman, Ingénieur Principal des Ponts et Chaussées.

Nous exposons ci-dessous:

- 1° Les données du problème tel qu'il se présente;
- 2° La suite des raisonnements théoriques qui ont été tenus à priori et qui ont conduit à l'adoption d'une méthode;
- 3° La mise en pratique de cette méthode et la comparaison des résultats obtenus aux prévisions;
- 4° Quelques considérations résultant de la comparaison des résultats aux prévisions.

### **1° Les données du problème.**

Le niveau du sol actuel est en moyenne à la cote 53,50. La cimentation doit être poussée, sur toute la longueur du mur-digue, jusqu'à la cote 45,60.

Après l'exécution des pieux Franki, on a battu du côté du canal, un rideau continu de palplanches métalliques servant de parafouille et arrêté dans le bas, à la cote 45,60. Un rideau arrière a été battu afin de former encaissement, et ce dans le but de limiter l'effet de l'injection au sous-œuvre du mur. Ce rideau arrière descend à la cote 47,80.

Les sondages dans la partie qui nous intéresse ont donné les résultats moyens ci-après:

De la cote 53,50 à la cote 50, une couche d'argile compacte.

De la cote 50 à la cote 49,50, une couche de sable fin argileux bouillant.

(1) Voir Magnel *Stabilité des Constructions*. Edité chez Van Rysselberghe à Gand.

A partir de la cote 49,50 vers le bas, du gravier de Meuse dont l'échantillonnage va croissant avec la profondeur. Ce gravier de Meuse a une forte coloration brune, due à la présence d'hydroxide ferrique.

Le niveau hydrostatique de la nappe est approximativement à la cote 51.

Le problème consiste à effectuer les injections entre deux rideaux continus de palplanches pour consolider le sous-sol jusqu'à la cote 45,60 et pour transformer la couche de gravier en une masse monolithique.

## 2° Raisonnements théoriques à priori.

Les deux rideaux de palplanches, avant et arrière, sont battus avec une inclinaison de 20° sur la verticale, inclinaison due à la présence de pieux Franki inclinés sous le massif du mur.

Nous figurons schématiquement à la figure 2, la coupe transversale de l'encaissement à injecter.

Quatre considérations successives nous ont amenés à dresser un diagramme indicatif du volume relatif à injecter (fig. 3).

Ce diagramme est établi comme suit :

Portant en ordonnée la cote d'injection en prenant  $y = 0$  pour le point le plus bas, on porte en abscisse le volume de pâte à injecter par unité de hauteur

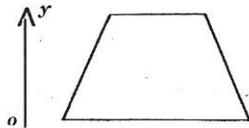


Fig. 2.

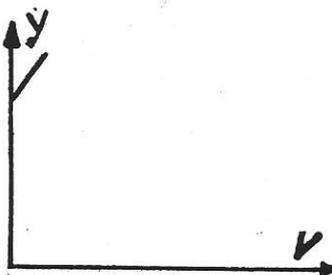
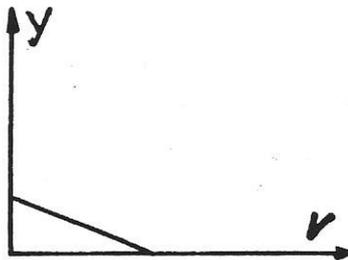
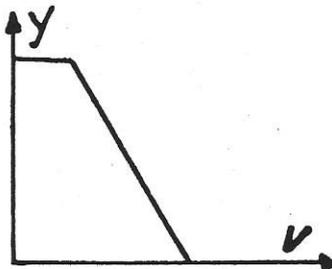
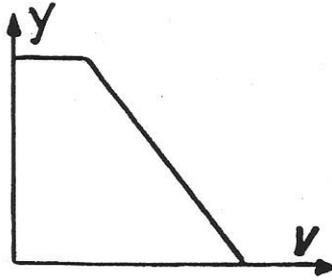


Fig. 3.

pour chacune des cotes envisagées. Ceci étant :

a) Le caisson a une section trapézoïdale, dont la grande base est vers le bas. Il résulte de cette première considération que le volume à injecter par unité de hauteur sera plus important dans le bas que dans le haut. Nous figurons cette première considération dans le diagramme partie a de la figure 3.

b) L'échantillonnage de gravier est plus gros dans le bas que dans le haut. Les vides qui absorbent de l'injection seront également plus importants dans le bas. Nous admettons en première analyse que cette loi est linéaire et figurons en b (fig. 3) le graphique de cette considération.

c) Au point bas de l'injection, en raison de l'arrêt des palplanches et à cause des courants souterrains, nous aurons, lors de l'injection, des pertes dans le bas. Cette considération est figurée en c (fig. 3).

d) A la fin de l'injection, il est essentiel que l'injection soit continuée jusqu'à faire refluer le ciment le long du tube et par les fissures créées dans la couche d'argile. Il en résulte des pertes vers le haut figurées au diagramme partiel d (fig. 3).

En juxtaposant ces quatre diagrammes partiels, on obtient un diagramme résultant, reproduit à la figure 4.

Mais il est certain que ces considérations successives s'influencent mutuellement et que, par conséquent, les divers éléments rectilignes du diagramme prendront en réalité une allure courbe enveloppant les éléments composants. Nous en déduisons donc un diagramme enveloppe définitif reproduit à la figure 4 diagramme enveloppe auquel nous n'attribuons qu'une valeur indicative.

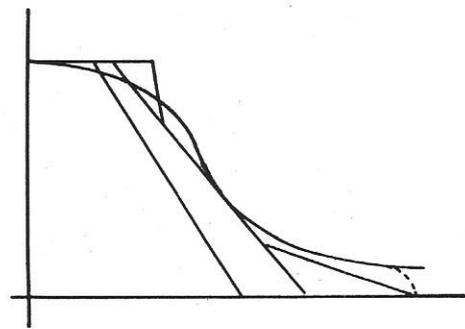


Fig. 4.



Si au lieu de limiter la courbe, ainsi établie par un raccord orthogonal sur l'axe des  $x$ , nous lui donnons vers les  $x$  une allure asymptotique, allure justifiée par les pertes théoriques sous le rideau de palplanches, cette courbe a l'allure de la courbe de Rankine et sa représentation analytique très simple a pour expression

$$1 + k_1 \bar{x}^2 = \frac{k}{y}$$

ou sous une autre forme

$$x = K_2 \sqrt{\frac{k}{y} - 1} \quad (\text{relation 1}).$$

$$x = 0 \quad \text{pour } y = k \quad \text{ou } k = H.$$

D'autre part, si nous considérons que les pertes ne se font sentir que dans le bas et dans le haut, la valeur de  $x$  pour  $y = \frac{H}{2}$  représentera le volume des vides du terrain à la hauteur considérée  $y = \frac{H}{2}$ , donc pour  $y = \frac{H}{2}$ .

$$x = V \quad \text{ou } K_2 = V.$$

Si nous désignons :

- par  $v$  le volume à injecter,
- par  $H$ , la hauteur d'injection totale,
- par  $y$ , la cote relative d'injection,
- par  $V$ , le volume élémentaire des vides du terrain,

$$\text{la relation sera } v = V \sqrt{\frac{H}{y} - 1},$$

et elle donne le volume à injecter (à l'état de pâte) au point  $y$  pour obtenir la cimentation du terrain.

Encore faut-il que ce volume soit injecté dans des conditions déterminées.

Nous disions plus haut que la quantité de matière injectée ne peut, en aucun cas, servir de critérium au procédé. Nous ajoutons « ni permettre de préjuger du résultat obtenu ». Nous disions aussi qu'il y a une corrélation étroite entre les quantités injectées, la densité de l'injection et la variation de pression en chaque point de l'injection et que ces trois fonctions dépendent du degré de transmissibilité du terrain.

Nous croyons utile de donner ici le sens que nous attachons au terme « transmissibilité du terrain ».

Ce terme a une signification analogue à celle de perméabilité en matière de rabattement.

Le coefficient de perméabilité se définit comme suit : C'est la quantité de mètres cubes qui traverse pendant l'unité de temps une surface filtrante d'un mètre carré de section et d'un mètre d'épaisseur sous une pression de un mètre d'eau.

Nous appellerons coefficient de transmissibilité d'un terrain la quantité de mètres cubes d'eau qui est transmise dans le terrain pendant l'unité de temps, par une surface de un mètre carré de ce terrain, sous une pression de un mètre d'eau.

*Exemple :* Si sous un débit de 3.600 m<sup>3</sup> par heure, par un orifice de 0,0012 m<sup>2</sup>, la pression au manomètre est de 30 m. d'eau, le coefficient de transmissibilité a pour valeur :

$$K = \frac{3.600}{0,0012 \times 30 \times 3600} = 0,028$$

Après avoir établi un diagramme quantitatif qui détermine la quantité relative de matière à injecter aux diverses hauteurs du sondage, on a dressé pour chaque hauteur d'injection un diagramme indicatif de pression. La figure 6 donne ces divers diagrammes avec les hauteurs correspondantes.

Les diagrammes indicatifs de pression ont été établis de la façon suivante :

Plaçons-nous à une hauteur  $y = OA$  et considérons le volume  $\Delta v$  à injecter sur la hauteur  $\Delta y = CD$ ; ce volume est la surface  $CDC'D'$ . Portons sur un des schémas de la figure 6 les volumes en abscisse et cherchons l'allure de la courbe donnant les pressions d'injection en fonction de ces volumes croissants. Commençant par une pression très réduite, on arrive à injecter un

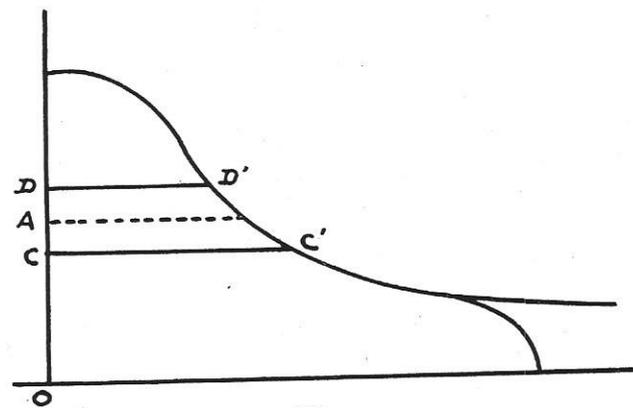


Fig. 5.

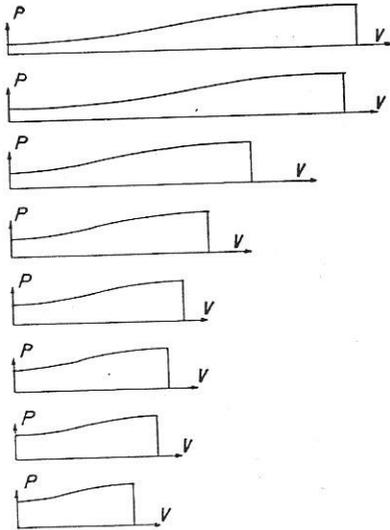


Fig. 6.

certaine partie du volume  $\Delta v$ . Puis il faut augmenter la pression pour injecter la partie suivante de  $\Delta v$ , et ainsi de suite. Nous voudrions qu'à 15 atm. le tout  $\Delta v$  soit injecté. Nous désirerions donc *a priori* que le diagramme volume-pression ait l'allure des courbes de la figure 6.

On verra plus loin, par la comparaison des diagrammes réels avec les diagrammes indicatifs, que la variation suivie par la pression ne croît pas suivant l'indicatif présumé. La courbe réelle n'a pas de point d'inflexion et la pression croît très rapidement en fin d'injection, au point de donner l'impression d'une allure asymptotique pour  $\Delta v =$  volume total au point considéré.

### 3° Mise en pratique de la méthode, et comparaison des résultats obtenus aux prévisions.

La méthode a été appliquée dans une zone d'essai qui devait servir de démonstration.

Après avoir foncé le tube, on y injecte de l'eau sous *débit constant* et on note au manomètre la pression correspondante. Cette pression, sous *débit constant* est fonction du degré de transmissibilité du terrain.

Il est évident que plus cette transmissibilité est grande, plus on pourra injecter une laitance dense sans risquer de colmater rapidement le terrain et voir ainsi arrêter l'injection.

Le résultat de la mesure faite avec de l'eau pure est donc pour l'opérateur une indication sur la densité de la laitance qu'il pourra employer. Nous ne saurions encore donner de règle précise à ce sujet et l'expérience seule peut régler l'opération. D'ailleurs, lors de l'injection de la laitance, l'opérateur a sous les yeux le manomètre qui lui indique, au cas, par exemple, où la pression monte trop vite que sa laitance est trop dense.

Comme toutefois il lui est impossible de corriger la densité instantanément, il sera souvent impossible de suivre exactement le diagramme indicatif de volume établi *a priori*.

Mais il est remarquable de constater que pour une série de diagrammes dans une zone déterminée, leur sommation donne un diagramme résultant, affectant nettement l'allure du diagramme indicatif des volumes établi *a priori*.

Un puits de visite a été creusé dans la zone injectée. Ce puits a été descendu à la cote 45,75. Pour atteindre cette cote, il a fallu procéder à la *démolition* de la masse agglomérée au moyen d'un brise-béton actionné à l'air comprimé. Nous rappelons que le niveau hydrostatique est à la cote 51. La photographie reproduite à la figure 7,

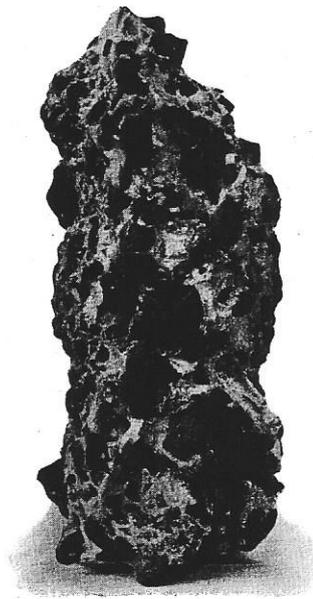


Fig. 7. — Morceau de béton extrait du sol injecté.

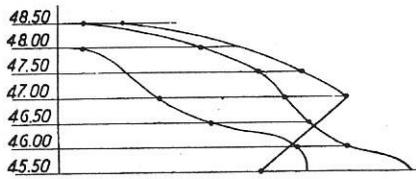


Fig. 8.

représente un morceau de béton extrait du terrain injecté.

Le puits a été creusé relativement à sec jusqu'à la cote 45,80 environ. A cette profondeur, le plafond s'est crevassé et la venue d'eau par le bas a été très intense. Ce résultat se passe de commentaires.

Nous donnons à la figure 8, quelques diagrammes relevés au cours des injections.

La comparaison et la juxtaposition de ces diagrammes, permettent de déterminer les zones qui pourraient éventuellement laisser un doute quant au résultat, et où il convient d'apporter les corrections nécessaires.

**4° Quelques considérations résultant de la comparaison des résultats aux prévisions.**

Si nous reprenons la relation qui donne le volume élémentaire de pâte à injecter pour obtenir la consolidation du terrain, on peut écrire :

$$x = k' \sqrt{\frac{H}{y} - 1}$$

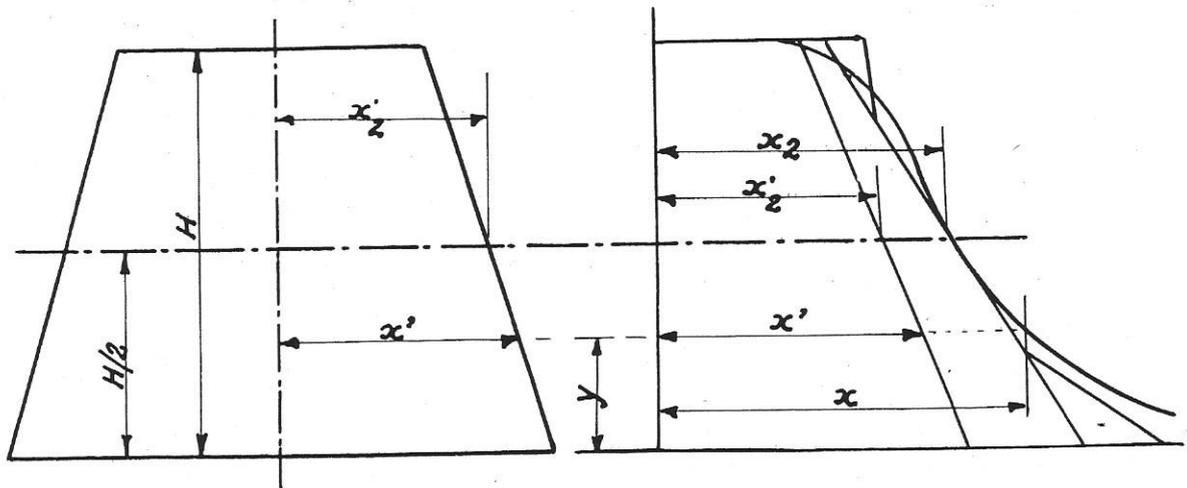


Fig. 9.

Etant donné la répartition des pertes, le point le plus déterminé du diagramme correspond à

l'ordonnée  $Y = \frac{H}{2}$

et pour  $y = \frac{H}{2} \quad x = K'$

donc  $K' = x_2 = K'' \cdot x'_2$ .

donc  $x = K'' \cdot x'_2 \sqrt{\frac{H}{y} - 1}$

$K''$  est un terme de correction qui tient compte des pertes et, par conséquent, a priori :

$$K'' \geq 1$$

Si pour une ordonnée  $y$  nous désignons par  $W$  le pourcentage des vides multiplié par la longueur transversale (constante) considérée, la surface fictive que traverse la matière injectée à un niveau vaudra

$$Q = 2w \cdot x = 2w \cdot K'' \cdot x'_2 \sqrt{\frac{H}{y} - 1}$$

Et le volume total de ciment injecté vaudra

$$V = \int_0^H Q \, dy = 2W \times K'' \times x'_2 \int_0^H \sqrt{\frac{H}{y} - 1} \cdot dy$$

La résolution de l'intégrale

$$I = \int_0^H \sqrt{\frac{H}{y} - 1} \cdot dy$$

donne,



posons :

$$\frac{H}{y} = t \text{ ou } y = \frac{H}{t} \text{ et } dy = -\frac{H}{t^2} dt.$$

$$I = H \int \sqrt{t-1} \frac{dt}{t^2}$$

Intégrons par parties :

$$u = \sqrt{t-1} \quad du = \frac{dt}{2\sqrt{t-1}}$$

$$dv = -\frac{dt}{t^2} \quad v = \frac{1}{t}$$

$$I = H \left[ \frac{\sqrt{t-1}}{t} - \int \frac{dt}{2t\sqrt{t-1}} \right]$$

Posons :

$$\sqrt{t-1} = z \quad t = z^2 + 1 \quad dt = 2z dz$$

$$I = H \left[ \frac{\sqrt{t-1}}{t} - \int \frac{2z dz}{2(z^2+1)z} \right]$$

ou

$$I = H \left[ \frac{\sqrt{t-1}}{t} - \text{arc tg } z \right]$$

$$I = H \left[ \left( \frac{y}{H} \sqrt{\frac{H}{y} - 1} \right)_0^H - \left( \text{arc tg } \sqrt{\frac{H}{y} - 1} \right)_0^H \right]$$

ou 
$$I = \frac{\pi}{2} \cdot H.$$

Nous aurons donc :

$$V = 2 w k'' x'_2 \frac{\pi}{2} H.$$

Si nous posons  $\rho$  = pourcentage des vides,  $v$  = le volume de l'encoffrement que nous désirons injecter, nous aurons :

$$\rho v = 2 w \times x'_2 \times H$$

et la relation finale s'écrira :

$$V = k'' \frac{\pi}{2} \rho v \quad (\text{relation 2})$$

dans laquelle

$V$  = volume à injecter à l'état de pâte.

$K''$  = coefficient  $\geq 1$  tenant compte des pertes.

$P$  = pourcentage moyen des vides remplissables de laitance.

$v$  = volume de la masse à consolider.

Il est peut-être intéressant de noter que s'il n'y avait aucune perte ni dans le haut ni dans le bas

et si le gravier avait partout le même pouvoir d'absorber la laitance par  $m^3$ , la formule serait.

$$V = \rho v$$

cette formule est à corriger :

1° Par le coefficient  $K'' > 1$  qui tient compte des pertes haut et bas ;

2° Par le coefficient que nous venons de trouver être égal à  $\frac{\pi}{2}$  et qui tient compte de la capacité variable d'absorption de la laitance par le gravier.

Si nous comparons les diagrammes réels des pressions aux diagrammes indicatifs, nous remarquons que la variation de pression ne correspond pas (comme allure) aux prévisions.

Nous donnons à la figure 10 un diagramme des pressions, relevé en cours d'injection. On remarque nettement l'allure asymptotique du diagramme vers la droite d'abscisse  $V$ ,  $V$  étant le volume du diagramme quantitatif.

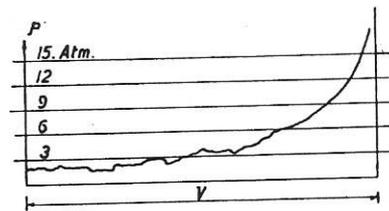


Fig. 10.

Il doit en être ainsi, puisque le diagramme quantitatif est établi pour une saturation complète. Par conséquent, en fin d'injection partielle, cette saturation étant atteinte, la possibilité d'injection doit être nulle et partant la pression doit tendre vers l'infini.

Nous donnons d'autre part à la figure 11 la

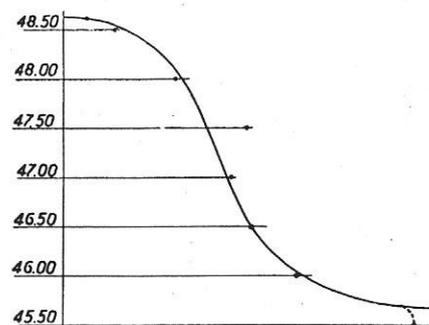


Fig. 11.



sommation de 15 diagrammes élémentaires. Le diagramme résultant correspond donc à une zone d'environ 15 mètres courants de bande injectée.

En comparant ce diagramme résultant aux quelques diagrammes élémentaires de la figure 8, on remarque, comme nous le disions plus haut, que dans l'ensemble, il y a compensation et que si l'étude critique peut se faire sur un seul diagramme, cette étude ne peut être concluante sans examen de l'influence voisine.

Bref, les résultats corroborent entièrement les prévisions et pour les quelques douze cents mètres carrés d'injection réalisés à ce jour on peut admettre que les résultats sont concluants.

#### TRANSMISSIBILITÉ DU TERRAIN.

La transmissibilité ayant été définie plus haut, il peut être intéressant de connaître la variation de cette transmissibilité dans un terrain tel que celui qui nous occupe, terrain constitué par des dépôts fluviaux, caractéristiques de la vallée de la Meuse.

Des mesures ont donc été faites en injectant de l'eau sous débit constant par un orifice à section constante et en relevant les pressions correspondantes à des hauteurs variables.

La figure 12 donne le diagramme qui montre la variation du coefficient de transmissibilité dans une section, en fonction de la profondeur.

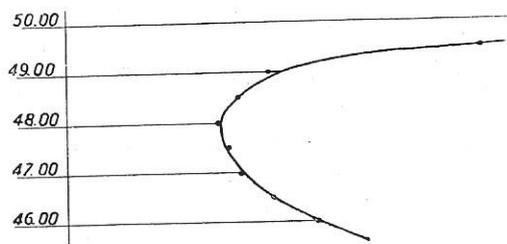


Fig. 12. — Courbe de transmissibilité.

Le niveau du sol est arasé approximativement à la cote 53.

On remarque à partir d'une certaine cote (vers la cote 48, dans le diagramme en question) la croissance rapide de la fonction. Elle doit théoriquement tendre vers l'infini au niveau du sol, la transmissibilité à l'air libre étant infinie.

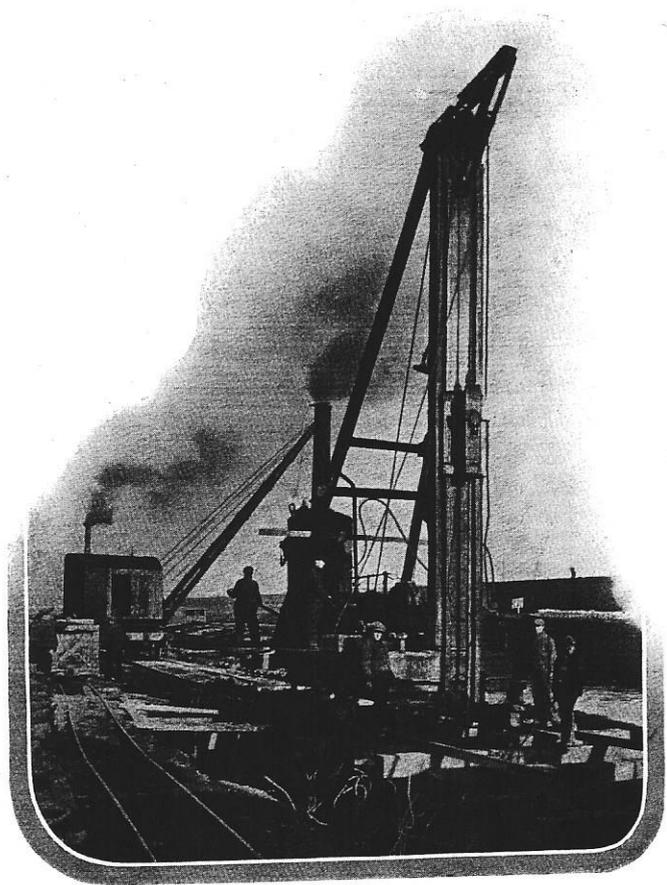


Fig 13. — Fonçage d'un tube d'injection.

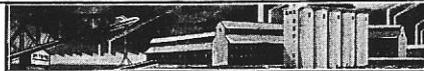
#### EXÉCUTION PRATIQUE DES TRAVAUX.

Des tubes de deux pouces en acier étiré sont foncés au moyen d'un mouton à vapeur de 750 kgs. Ces tubes sont munis à leur extrémité inférieure d'une pointe amovible, encastrée simplement dans le tube.

La figure 13 montre le fonçage d'un tube.

Lorsque le tube est à fond, on y applique une pression d'eau de 10 à 15 atmosphères et on relève le tube d'une dizaine de centimètres. De cette façon, la pointe amovible primitivement assujettie à l'extrémité du tube est chassée dans le sol et le tube est complètement dégagé.

On continue alors le pompage à l'eau à débit constant et on note au manomètre la pression correspondante.



Cette pression permet de calculer la transmissibilité et de déterminer la densité du mélange à injecter.

La figure 1 reproduit l'installation complète. On remarque au premier plan le petit bâtiment roulant qui abrite trois pompes, branchées sur trois tubes d'injection et mues par la vapeur venant de la machine de battage.

La figure 14 montre l'installation des pompes. Au second plan de la figure 1, on aperçoit le petit bâtiment des malaxeurs. Six malaxeurs alimentent les pompes. Ces malaxeurs sont commandés électriquement. La figure 15 donne une vue de détail de cette installation.

Après avoir déterminé la densité de la laitance d'injection, on branche les malaxeurs sur les pompes à injection. L'injection est poussée sans arrêt. Le préposé note en diagramme les fluctuations de manomètres eu égard aux quantités imposées.

Les diagrammes sont alors comparés et on en fait l'étude critique. Cette étude permet de déceler les endroits qui laissent un doute quant au résultat

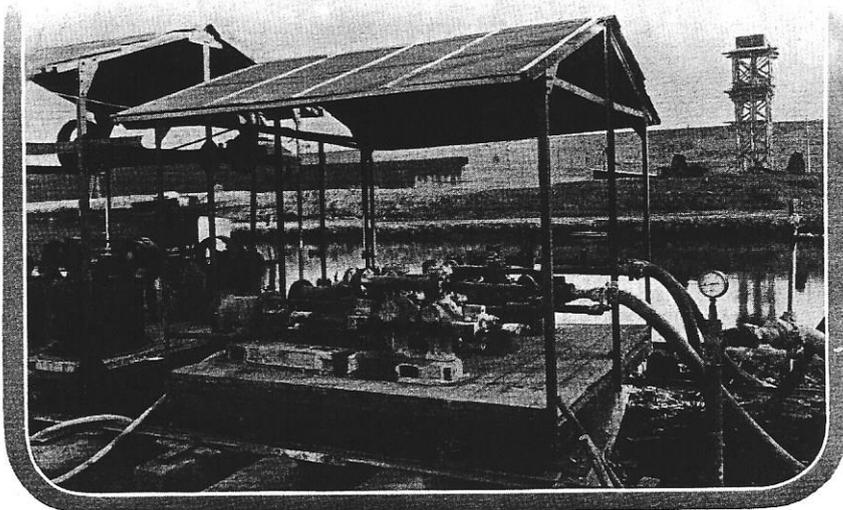


Fig. 14. — *Vue détaillée de l'installation des pompes. Au fond, le mur-digue de la rive droite.*

de l'injection et où il importe de procéder à certaines corrections.

Louis HOEBEKE,  
Ingénieur A. I. G.  
Directeur de Travaux  
à la Société des Pieux Franki.

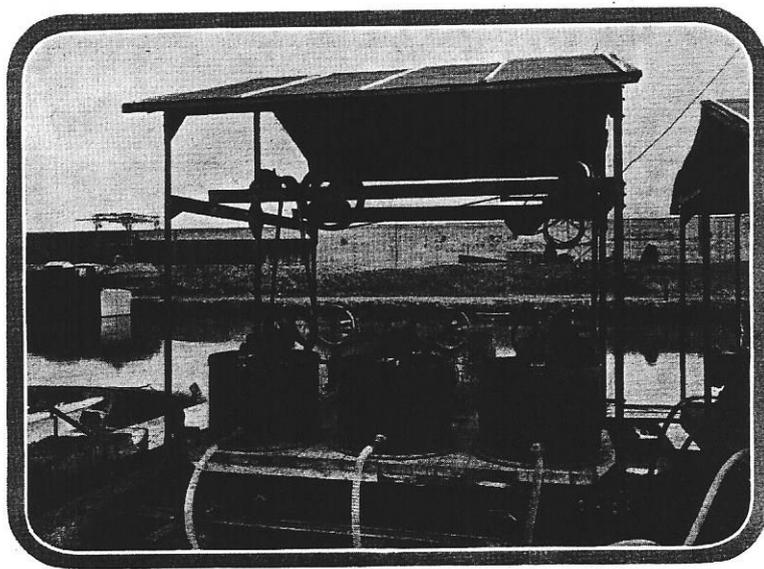


Fig. 15. — *Vue détaillée de l'installation de malaxage.*