



Communication
présentée au Comité Technique
de la Société Hydrotechnique de France
le 20 mars 1970

RHÉOLOGIE DES COULIS D'INJECTION

PAR C. CARON *

I. — Généralités

La modification des terrains en place par injection dans le but de les étancher ou de les consolider est un procédé qui remonte à trois-quarts de siècle. Un historique très complet en a été donné en 1962 par Glossop et Ischy ** Les auteurs ont montré les progrès réalisés tant dans le domaine du matériel que dans celui des produits mis en œuvre.

Alors qu'à la fin du siècle dernier on ne connaissait guère que les laits de ciment, le choix peut porter maintenant sur une cinquantaine de formulations de base. Ceci a permis d'étendre considérablement les domaines d'emploi de ce procédé.

Dans les grandes lignes, on peut, pour l'injection, classer les terrains en deux catégories : les roches fissurées et les terrains pulvérulents. Dans le premier cas, l'injection à haute pression d'un coulis de ciment dilué assurera, en général, l'étanchement et la consolidation. Dans le second cas, il faudra obligatoirement adapter la nature des coulis aux terrains dans lesquels ils sont injectés. Faute d'appliquer cette règle fondamentale, on court à un échec ou à des dépenses superflues. Le texte qui suit concerne l'injection en milieu pulvérulent.

En utilisant les notions de granulométrie ou de perméabilité, Terzaghi, Riddell, Glossop et Skempton, Askalohoff ont, tour à tour, donné pour chaque classe de terrain pulvérulent, la nature des coulis optimaux correspondants. H. Cambefort *** a précisé ces limites en utilisant la notion de diamètre des pores du terrain. Les tableaux que l'on peut ainsi établir doivent être périodiquement révisés car de

nouveaux coulis apparaissent et d'autres tombent en désuétude.

Le tableau ci-après sur lequel nous avons volontairement omis certains coulis mentionnés dans des revues techniques ou dans des brevets car ils ne sont jamais sortis du stade laboratoire, fait le point actuel.

A chaque classe granulométrique de terrain correspond donc un ou plusieurs produits appropriés permettant de réaliser l'injection dans des conditions techniques et économiques optimales. Les progrès réalisés ces dix dernières années ont permis de combler toutes les lacunes. Ces coulis nouveaux (leurs noms ont été écrits en gras sur le tableau ci-après) concernent principalement le traitement des terrains peu perméables.

On constatera que les notions de composition chimique du coulis sont, dans ce classement, très secondaires vis-à-vis des notions de comportement rhéologique. Plus le terrain à injecter est fin, plus le coulis d'injection doit être fluide, à savoir : suspensions binghamiennes (à base de ciment ou d'argile) dans les terrains grossiers, solutions colloïdales plus ou moins visqueuses (gel de silice ou de lignochromes, émulsion de bitume, colloïdes organiques) dans les terrains de granulométrie moyenne et solutions pures non colloïdales (monomères organiques en solution aqueuse) dans les terrains très fins.

C'est donc sur le plan rhéologique qu'il faut se placer pour mieux comprendre les critères d'injection. Nous allons étudier les conditions d'injection des coulis précités et pour cela prendre d'abord le cas, plus simple, des coulis newtoniens puis celui, plus complexe, des coulis binghamiens granulaires.

* Directeur du Laboratoire de la Société Solétanche.

** Proceedings of the Institution of Civil Engineers (mars 1962).

*** H. CAMBEFORT : Injection des sols, Ed. Eyrolles (1964).

<i>Limites d'injectabilité des principaux coulis</i>				
NATURE DU TERRAIN	CARACTÉRISTIQUES DU TERRAIN	NATURE DU PRODUIT D'INJECTION	CONSOLIDATION	ÉTANCHEMENT
Alluvions et sables grossiers	$d_{10} > 0,5 \text{ mm}$ $S < 100 \text{ cm} - 1$ $K > 10^{-3} \text{ m/s}$	Suspensions binghamiennes	Ciment pur ($K > 10^{-2} \text{ m/s}$) Coulis aéré	Ciment-Argile Coulis aéré Gel d'argile (*)
Sables moyens et fins	d_{10} compris entre 0,02 & 0,5 mm S compris entre 100 & 1 000 cm — 1 K compris entre 10^{-3} & 10^{-5} m/s	Solutions colloïdales	Joosten ($K > 10^{-4} \text{ m/s}$) Gel dur à réactif organique	Gel normal Emulsion de bitumes ou latex Lignochrome Huiles insaturées vulcanisables Colloïdes organiques
Sables limoneux ou argileux, silts	$d_{10} < 0,02 \text{ mm}$ $S > 1 000 \text{ cm} - 1$ $K < 10^{-5} \text{ m/s}$	Solutions pures	Phénoplaste Aminoplaste	Phénoplaste Aminoplaste A M 9

(*) Peuvent injecter des terrains un peu plus fins surtout s'ils sont préparés avec de la bentonite.

2. — Injection d'un liquide newtonien

2.1 Newtonien non évolutif.

Le coulis le plus simple correspond à un liquide sans rigidité dont la viscosité, indépendante du gradient de vitesse, est invariable dans le temps.

De tels types de coulis ne sont connus que depuis quelques années. Ils sont préparés avec des monomères organiques (acrylamides, phénoplastes, aminoplastes) dissous dans l'eau. La viscosité de ces mélanges non colloïdaux reste inchangée jusqu'à la polymérisation en masse (graphique I₁). Par conséquent, à tout moment, les débits sont rigoureusement proportionnels aux pressions et ne dépendent pas de l'âge du coulis.

2.2 Newtonien évolutif.

Ce type de coulis, beaucoup plus fréquent, correspond, entre autres, aux gels de silice connus depuis plus d'un demi-siècle et aux gels de lignochrome connus depuis une dizaine d'années. Ces mélanges, purement newtoniens jusqu'à la gélification en masse, ont une viscosité qui croît dans le temps (graphique I₂).

C'est d'ailleurs l'apparition de la rigidité, avec transformation du liquide newtonien en liquide binghamien, qui caractérise le temps de prise *.

Comme dans le cas précédent, on a une relation parfaitement linéaire entre les débits et les pressions, à condition que les mesures soient effectuées suffisamment vite afin d'éviter un changement de viscosité du gel.

Par contre, comme la viscosité augmente en fonction du temps, on notera, à pression constante, une baisse de débit. Cette baisse de débit, traduite en unités de perméabilité K conduit aux courbes du graphique II obtenues avec des gels de temps de prise variables, dosés à 200 cm³ de silicate par litre.

Inversement, si on veut maintenir un débit constant, il faudra augmenter la pression d'injection. C'est ce que montrent les courbes du graphique III.

La courbe III₁ correspond à un gel dilué (366 cm³ de silicate par litre) injecté à un débit constant de 5 l/mn et la courbe III₂ à un gel concentré (825 cm³ de silicate par litre), injecté à un débit de 0,6 l/mn. On notera que la pression de claquage est indépendante de la viscosité du coulis.

Dans les essais précédents, on a interprété le déplacement du fluide newtonien en fonction de sa seule viscosité. On pouvait se demander si d'autres paramètres tels la nature chimique, la tension superficielle... avaient aussi une influence.

A cet effet, huit fluides purement newtoniens évolutifs ou non, de caractéristiques chimico-physiques très différentes (tableau ci-dessous) ont été testés.

REPÈRE	NATURE DES MÉLANGES
1	Gel de silice.
2	Mixte gel-résine acrylamide.
3	Précondensat phénolique.
4	Résorcine-formol monomère (brevet Solétanche).
5	Polyester 50 - Styrène 50 (sans catalyseur).
6	Eau.
7	Eau + Polyox WSR 80 100 PPM.
8	Eau + Polyox WSR 301 30 PPM.

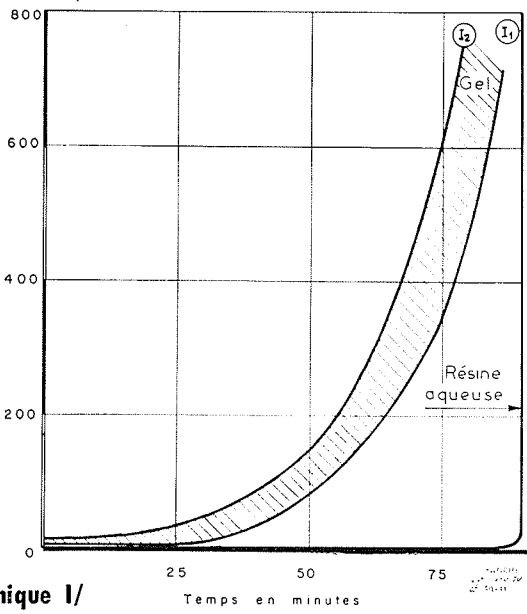
Le montage, représenté par les deux photos ci-contre, permet de mesurer, à gradient constant, la vitesse d'ascension dans un sable calibré (montage de la photo 1), puis la vitesse de percolation à travers ce sable (montage de la photo 2).

La hauteur de sable dans la colonne d'imprégnation (sable de Fontainebleau à une densité sèche de 1,715) a été fixée à 25 cm.

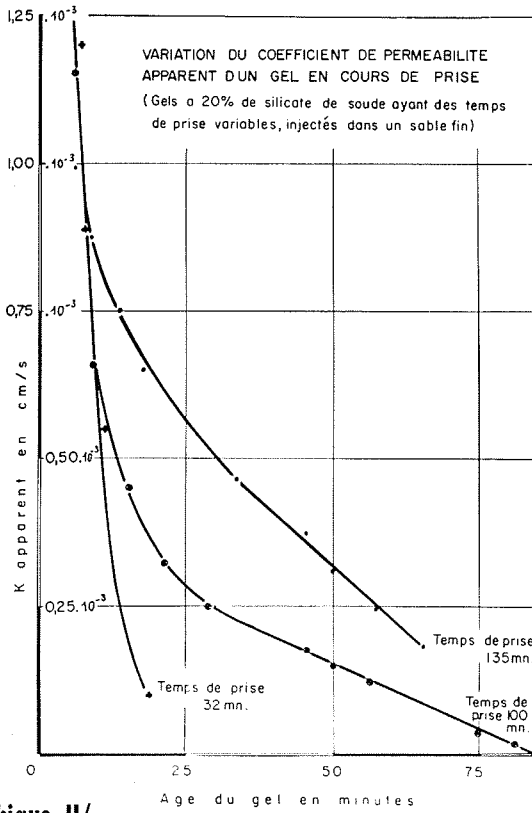
La charge constante correspond à une colonne d'eau de 60 cm dans l'essai d'imprégnation et de 105 cm dans l'essai de percolation. Lorsque le coulis a une densité différente,

* C. CARON: Etude physico-chimique des gels de silice, Thèse à la Faculté des Sciences de Paris (1964).

EVOLUTION DE VISCOSITE DANS LE TEMPS
DE QUELQUES COULIS NEWTONIENS
(même temps de prise de 90mn.)

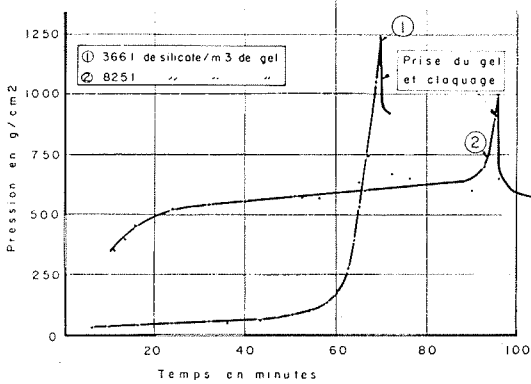


Graphique I/



Graphique II/

EVOLUTION DES PRESSIONS D'INJECTION
A DEBIT CONSTANT
D'UN LIQUIDE NEWTONIEN EVOLUTIF



Graphique III/

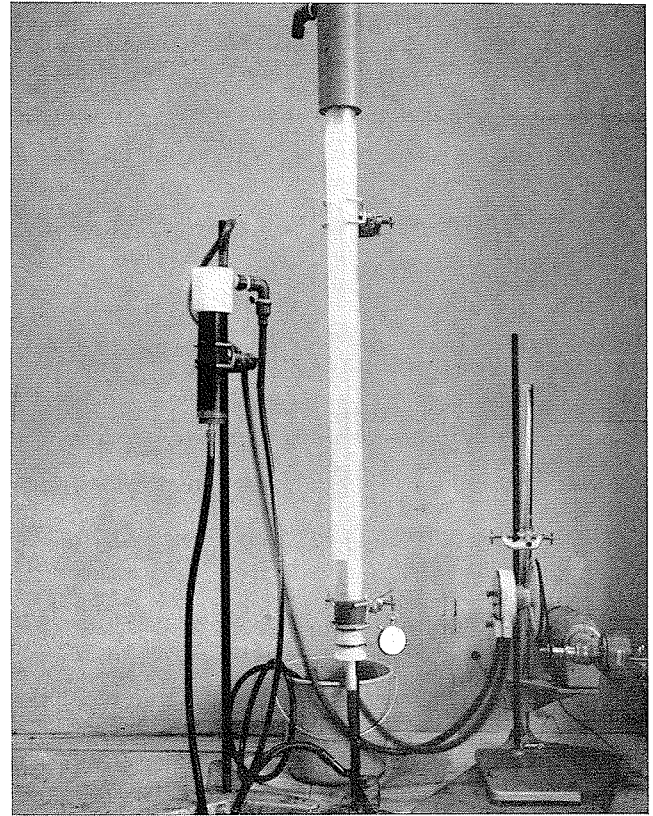


Photo 1/

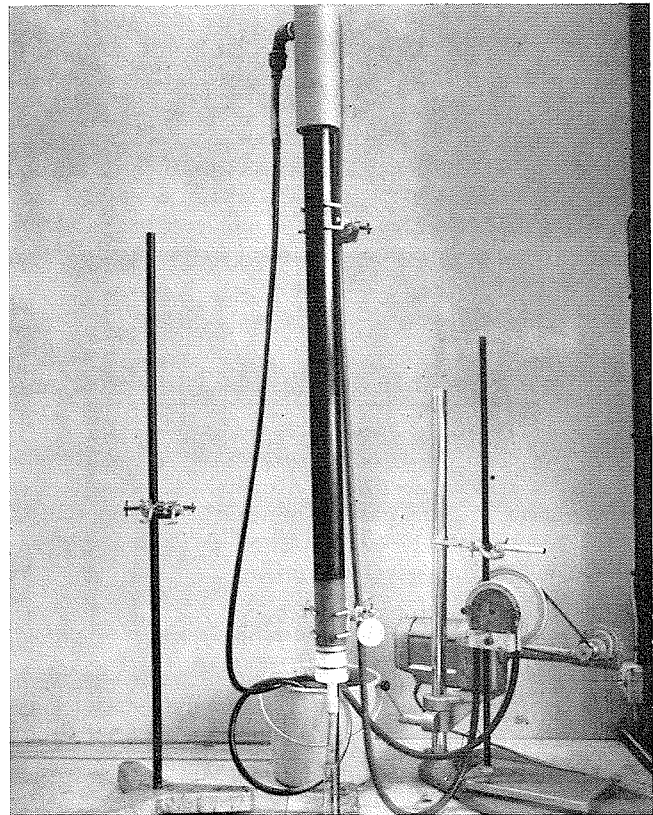


Photo 2/

C. CARON

NUMÉRO DES MÉLANGES	1	2	3	4	5	6	7	8
Temps nécessaire pour saturer 25 cm de sable de Fontainebleau (exprimé en minutes)	6,43	3,23	5,15	3,02	12,45	1,51	1,50	1,52
Perméabilité : volume passé en 10 mn (exprimé en cm ³)	110	210	168	260	69,5	442,8	490	411
Viscosité moyenne pendant l'essai (en cP)	4,8	2,25	3,15	1,75	8,25	1,1	1,1	1,15
Température moyenne pendant l'essai (en °C)	19	18,1	18,1	20,5	19	17,6	18	17
Coefficient 1	0,012	0,011	0,010	0,010	0,011	0,010	0,010	0,010
Coefficient 2	528	472	530	455	572	530	490	472

la hauteur est réduite de façon à avoir toujours la même charge.

Lorsque la viscosité évolue pendant la mesure, on adopte, pour l'interprétation, la moyenne entre les viscosités initiale et finale.

Les résultats sont donnés par le tableau ci-dessus sur lequel on a porté successivement pour les huit coulis :

- temps nécessaire pour imprégner avec le coulis considéré les 25 cm de sable;
- après saturation du sable avec le coulis considéré, volume passé en 10 mn;
- viscosité en centipoises;
- température en degrés;
- coefficient 1 : rapport : $\frac{\text{viscosité en cP}}{\text{temps imprégnation en s}}$
- coefficient 2 : volume passé en cm³ \times viscosité en cP.

Ces deux coefficients sont homogènes à un coefficient de perméabilité cm/sec. Par conséquent, si les mélanges étudiés suivent les lois élémentaires de Poiseuille et Darcy, les coefficients 1 et 2 doivent être des constantes aux erreurs d'expérience près. Les écarts relatifs pour ces deux coefficients n'excèdent pas $\pm 10\%$, montrant que la nature physico-chimique du coulis n'a aucune influence notable sur la vitesse d'injection.

3. — Injection des coulis binghamiens

Pour l'injection des terrains grossiers, on utilise des suspensions de ciment ou d'argile ou de leur mélange. Ces coulis chargés ne sont pas newtoniens. Ils diffèrent donc des précédents pour la double raison qu'ils sont binghamiens et qu'ils contiennent des grains.

3.1 Conséquence de la nature binghamienne.

Un coulis binghamien présente à la fois une rigidité f_0 et une viscosité U . L'effort nécessaire pour produire un déplacement correspondant à un gradient de vitesse dv/dx est :

$$F = f_0 + U (dv/dx)$$

f_0 et U sont constants pour un fluide donné.

Un exemple de cette relation vitesse de cisaillement-contrainte est donné par le graphique IV₁.

On peut aussi traduire cette relation de Bingham sous une forme plus proche de la loi de Poiseuille :

$$F = U' (dv/dx)$$

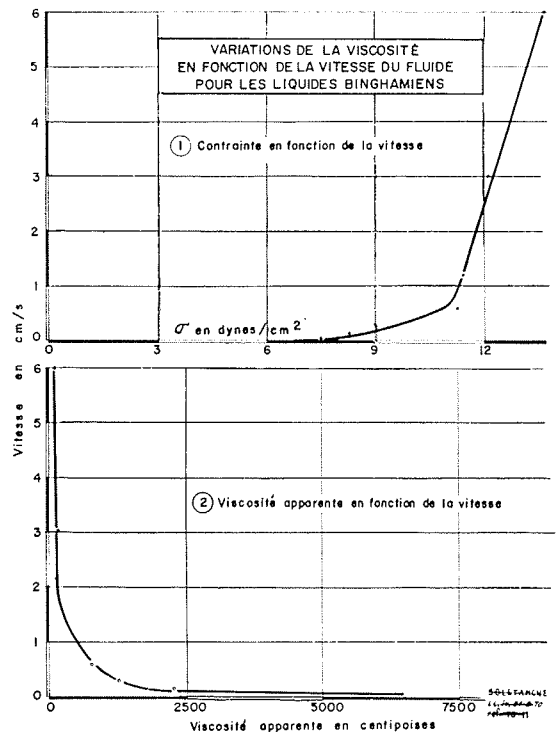
en affectant au liquide binghamien un terme unique de viscosité. Dans ce cas, ce terme de viscosité n'est plus une constante et décroît lorsque la vitesse du fluide croît (graphique IV₂).

Enfin, ces coulis sont évolutifs : leur viscosité et surtout leur rigidité augmentent avec le temps.

La relation débit-pression avec ces liquides binghamiens sera très différente de celle observée jusqu'ici avec des liquides newtoniens qu'ils soient évolutifs ou non.

En effet, d'après la formule de Bingham :

$$F = f_0 + U (dv/dx)$$



Graphique IV/

le déplacement d'un coulis binghamien ne pourra commencer qu'au-delà d'une certaine pression qui est fonction à la fois du coulis (caractérisé par sa cohésion f_0) et du terrain (caractérisé par sa granulométrie ou sa surface spécifique S et sa porosité n).

En utilisant des sols de granulométrie très différente, représentés par des billes calibrées, nous avons établi, avec H. Cambefort, que le gradient de pression minimal pour amorcer le déplacement de ces fluides binghamiens dans un sol pulvérulent est donné par la formule :

$$P/l = f_0 S (1 - n)$$

Une fois franchi ce seuil minimal le liquide binghamien pourra s'écouler mais on n'aura pas une relation linéaire débit-pression puisque la viscosité apparente de ce fluide en mouvement n'est pas une constante (graphique V). On note qu'il faut une pression minimale pour que l'injection puisse commencer et qu'ensuite une faible augmentation de pression occasionne une forte augmentation du débit.

Par ailleurs, les coulis binghamiens classiques ont une viscosité et une rigidité qui augmentent progressivement au cours du temps jusqu'à la prise en masse; ils se comportent donc comme les liquides newtoniens évolutifs (2.2). Si l'on veut maintenir le débit d'injection constant, on sera obligé d'augmenter progressivement la pression.

En fait, avec les coulis les plus habituels, c'est-à-dire les coulis argile-ciment à faible dosage en ciment, cette évolution de viscosité et rigidité est, sauf cas exceptionnels, trop lente pour que l'on s'en aperçoive.

De plus, ces variations de débit ou de pression en fonction du temps sont masquées par d'autres phénomènes beaucoup plus importants liés à l'état granulaire du coulis.

3.2 Conséquence de l'état granulaire.

Il est normal que les particules d'argile ou de ciment du coulis se déposent dans les pores du terrain et en dimi-

nue la perméabilité en cours d'injection. Aussi, à pression constante, on observe une diminution du débit même si la viscosité apparente du coulis reste invariable.

Pour un terrain de perméabilité donnée, cette diminution du débit par obturation des pores sera fonction de trois paramètres :

- granulométrie des éléments solides du coulis;
- pourcentage de matières sèches;
- état de floculation.

3.2.1 Granulométrie des éléments solides du coulis.

Ce paramètre est évident, aussi, nous ne nous y attarderons pas : il est normal que si un coulis contient des grains de ciment de 50μ , il aura plus de difficultés à cheminer dans un terrain que si les grains constitutifs sont de la bentonite de 1μ .

3.2.2 Pourcentage de matières sèches.

A gradient constant de 10, nous avons mesuré les débits de percolation à travers un sable calibré 1 — 2 mm (graphique VI).

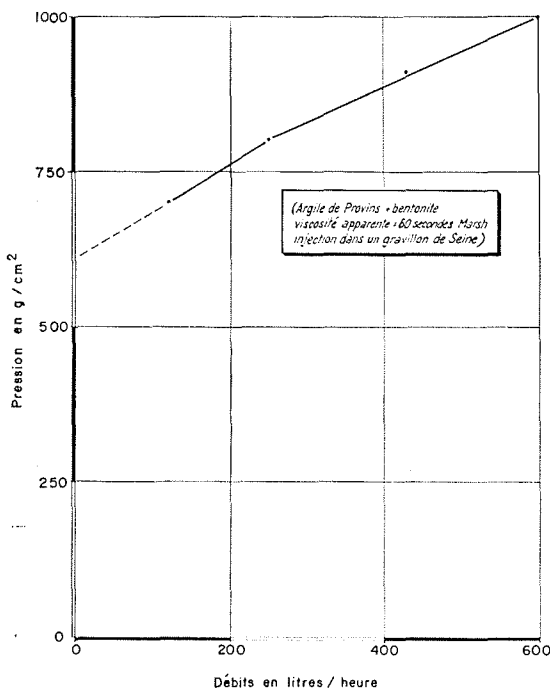
Les bentonites utilisées avaient subi des taux de permutation différents de sorte que les coulis avaient une même viscosité (40 s Marsh) pour des concentrations différentes.

A débit constant, nous avons mesuré l'évolution de la pression d'injection pour quatre coulis ayant la même viscosité apparente et les mêmes constituants (argile et ciment) dosés en proportions variables (graphique VII).

Dans les deux cas, on note un blocage d'autant plus rapide que la quantité de matières sèches est plus grande.

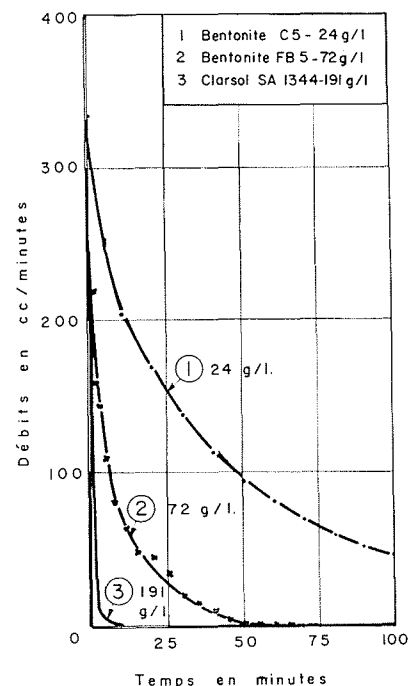
Une façon élégante de réduire la quantité de matières sèches d'un coulis consiste à l'aérer (H. Cambefort et C. Caron, « Procédé pour l'étanchement ou la consolidation des sols perméables et autres masses poreuses », BF n° 1 148 413 du 24 juin 1954). Dans tous les cas où une cadence normale de pompage conduirait à une pression supérieure à celle de claquage, l'aération sera d'un grand secours. Ainsi, sur un

RELATION DEBIT-PRESSION AVEC UN COULIS BINGHAMIEN



Graphique V/

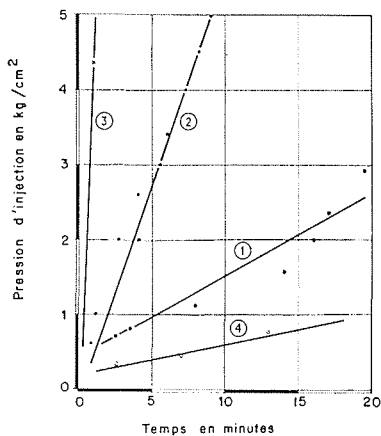
INFLUENCE DE LA TENEUR EN MATIERES SECHES SUR LE DEBIT D'ECOLEMENT D'UN LIQUIDE BINGHAMIEN (à gradient constant)



Graphique VI/

INFLUENCE DE LA NATURE DU COULIS SUR L'INJECTABILITÉ
(à débit constant)

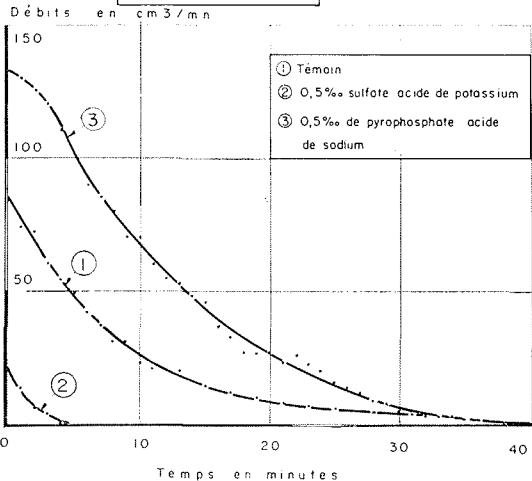
- ① Argile-ciment à 280 kg de matière sèche/m³ de coulis
- ② Bentonite-ciment à 224 kg " " " "
- ③ Argile-ciment à 394 kg " " " "
- ④ Bentonite-ciment à 610 kg " " " "



Graphique VII/

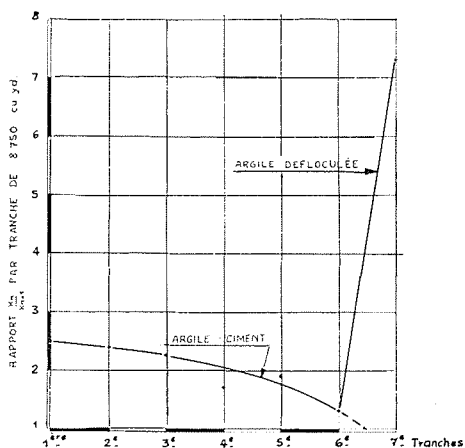
INFLUENCE DE L'ETAT DE FLOCCULATION SUR LES DÉBITS

- Conditions générales de l'essai:
Bentonite C5 à 24g/l
Hydratation complète (> 24 h)
Sable de leucate 0,5 - 1mm.

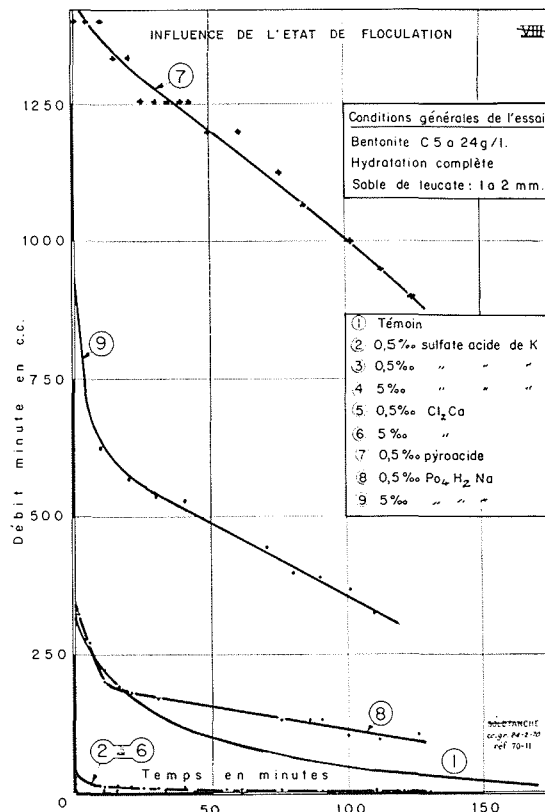


Graphique IX/

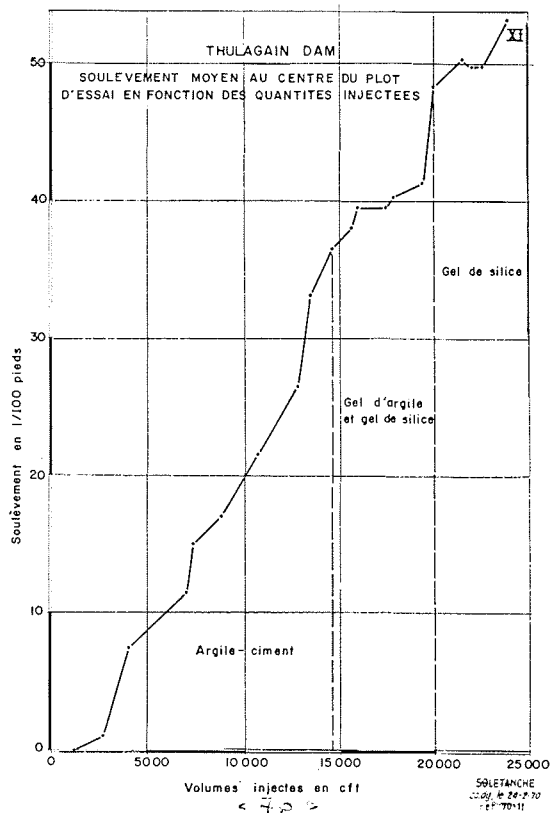
VARIATION DU RAPPORT $\frac{kn}{kn+1}$
EN FONCTION DU NOMBRE DE TRANCHES DE COULIS
INJECTÉES DANS LE VOILE



Graphique X/



Graphique VIII/



Graphique XI/

chantier de la région parisienne où la pression limite avait été fixée à 10 bars, on a pu augmenter la cadence d'injection de 30 % en aérant légèrement le coulis.

3.2.3 Etat de floculation.

L'influence de l'état de floculation est montrée par les graphiques VIII et IX. On a utilisé une suspension binghamienne de bentonite dosée dans tous les cas à 24 g/l. En plus du témoin sans additif, on a mesuré la vitesse de percolation de ce coulis additionné de défloculants (pyrophosphate de soude ou phosphate monosodique) ou de flocculants (sulfate acide de potassium ou chlorure de calcium) à des doses de 0,05 et 0,5 %.

Comme ces mélanges n'avaient pas les mêmes viscosités initiales, il ne faut pas tenir compte des valeurs absolues des débits mais des variations de débits en fonction du temps. Ce sont des variations qui montrent l'effet de colmatage sur la colonne de sable. Pour mieux exprimer ces variations, nous donnons, sur le tableau ci-après, le rapport des débits à 0 et 120 mn en fonction de l'état de floculation. Comme on pouvait s'y attendre, plus la bentonite est floculée, plus ce rapport est élevé.

NATURE DE L'ADJUVANT UTILISÉ	POURCENTAGE PAR RAPPORT AU VOLUME DE BOUE	RAPPORTS DES DÉBITS D'INJECTION A 0 ET 120 mn	
Témoin		10	
floculants	sulfate acide de potassium	0,5 %	16,65
	chlorure de calcium	5 %	14
		0,5 %	infini
		5 %	infini
défloculant	pyrophosphate acide de sodium	0,5 %	1,57
	phosphate monosodique	0,5 %	3,4
		5 %	3,12

Une des applications de ce principe réside dans la formulation d'un coulis très pénétrant comprenant une argile ou une bentonite, un agent rigidifiant et un agent peptisant (C. Caron, « Nouveaux procédés d'injection de coulis d'argile et produits utilisés pour la mise en œuvre desdits procédés », B.F. 1 237 311, 19 juin 1959).

4. — Application

La conduite logique d'une injection découlera des considérations rhéologiques énoncées ci-dessous. Nous distinguerons deux cas suivant que le terrain est homogène ou hétérogène.

4.1 Injection en terrain homogène.

La détermination de la courbe granulométrique du terrain ou de la perméabilité *in situ* fixe d'une manière non équivoque la nature du coulis d'injection, ainsi que cela a été indiqué sur le premier tableau.

Utiliser un coulis trop grossier pour le terrain considéré ne peut conduire qu'à un échec.

Utiliser un coulis trop fluide pour le terrain considéré, en plus d'une dépense inutile, risque aussi de conduire à un

échec. En effet, les coulis très fluides (gels et résine), injectés dans des terrains de forte perméabilité, peuvent ne pas rester dans la zone traitée. De plus, la pérennité de certains de ces coulis fluides (gels de silice notamment) excellente dans les terrains fins, devient très médiocre dans les terrains grossiers par suite du phénomène de synérèse (C. Caron, « Consolidation des sables fins par injection de gel de silice », *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, n° 213, septembre 1965).

4.2 Injection en terrain hétérogène.

Hormis le cas assez rare des terrains homogènes, il sera nécessaire, au fur et à mesure de l'avancement des travaux d'injection, de changer la nature du coulis en les choisissant plus pénétrants, afin de tenir compte de la diminution progressive de la perméabilité du terrain. Il est courant d'utiliser successivement trois ou quatre types de coulis dans le cours des travaux. En plus, si certaines tranches nécessitent l'emploi de coulis de résistances ou de temps de prise différents, le nombre de formules se trouve considérablement majoré. L'emploi systématique des centrales automatiques a simplifié ces préparations complexes.

Logiquement, il faut arrêter l'injection d'un type déterminé de coulis lorsqu'elle devient inefficace et passer à un coulis plus fluide.

Un exemple concret nous sera fourni par la réalisation du voile d'étanchéité du Mission Dam sur la Bridge River au Canada. Ce voile a permis de réduire la perméabilité de 500 fois. Grâce à une série de piézomètres implantés de part et d'autre du voile, on a suivi l'évolution des perméabilités en fonction des tonnages injectés. On a ainsi mesuré les rapports :

$$K_n/K_{n+1}$$

K_n étant la perméabilité du terrain après l'injection de la $n^{\text{ième}}$ phase et K_{n+1} , la perméabilité après la $n + 1^{\text{ième}}$ phase, chaque phase correspondant à 8 750 *cu.yd.* de coulis.

Les résultats reportés sur le graphique X montrent qu'après chacune des tranches, les réductions de perméabilité sont de plus en plus faibles. En remplaçant l'argile-ciment par un coulis plus fluide (argile défloculée), on a réussi à donner au terrain un surcroît d'imperméabilisation.

On ne dispose pas toujours d'un réseau de piézomètres permettant de juger de l'étanchéité acquise. L'examen des claquages qui se traduisent par des mouvements de surface y suppléera.

Dans les terrains pulvérulents, grâce à l'emploi de pompes haute pression, l'injection de n'importe quel type de coulis est toujours possible. En se fiant uniquement aux quantités injectées, on peut ainsi avoir l'impression de réaliser un bon travail alors qu'il est totalement inopérant : lorsque le coulis ne passe plus par imprégnation, il chemine par claquage.

H. Cambefort (ouvrage cité) a montré que les premiers claquages étaient verticaux et ensuite devenaient horizontaux.

Les claquages verticaux, hormis le cas d'injection sous des ouvrages existants, sont utiles puisqu'ils créent des cloisons verticales étanches et en serrant le terrain le consolident et réduisent sa perméabilité. Par contre, les claquages horizontaux sont parfaitement inutiles.

D'après l'examen des repères de soulèvement, on changera donc la nature du coulis lorsque ces claquages horizontaux deviendront trop importants. Un exemple est donné par le graphique XI extrait des travaux de Thulagain (Ecosse).

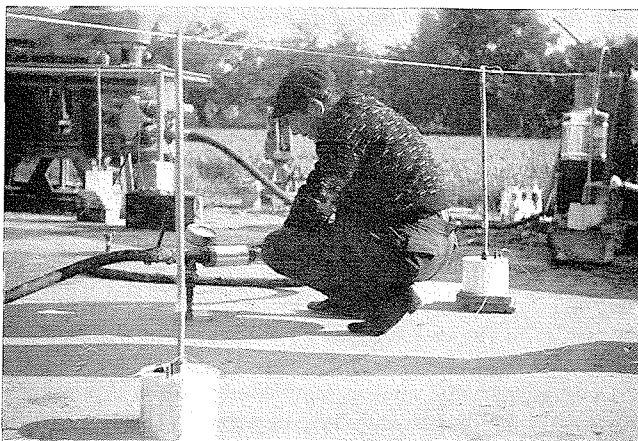


Photo 3/

L'examen systématique des repères de soulèvement et l'emploi successif de coulis de viscosité décroissante a permis, ces dernières années, de réaliser des batardeaux parfaitement étanches sans aucun excès de coulis. Alors que des soulèvements de plusieurs dizaines de centimètres étaient considérés précédemment comme normaux, le para-fouille de Notre-Dame-de-Commiers (France) a été réalisé avec des soulèvements moyens de l'ordre de 1 cm.

Les claquages horizontaux sont cependant utiles et même nécessaires dans deux cas :

Formation de fonds étanches par injection : Un exemple typique est celui de la création de cuvettes étanches pour la construction des centrales hydrauliques du Rhin. Le processus a été décrit au V^e Congrès des Grands Barrages par R. Lefoulon et E. Ischy : il faut former quatre batardeaux (par injection ou paroi bétonnée) et fermer la boîte par un fond étanche horizontal car le substratum étanche naturel est à trop grande profondeur.

Pour ce fond étanche, contrairement au cas précédent, les claquages horizontaux sont utiles. Aussi, l'injection a été réalisée avec un seul type de coulis épais et binghamien (argile-ciment) poussée à fort débit jusqu'à l'obtention de ces claquages horizontaux. On a ainsi soulevé le terrain de près de 20 cm et la perméabilité verticale est devenue pratiquement nulle alors qu'on n'avait pas réalisé l'imprégnation totale du terrain avec une gamme complète de coulis binghamiens et newtoniens.

Soulèvement de bâtiments, de routes, etc. : Il peut arriver que certains ouvrages, par suite de tassements, ne soient plus à leurs cotes d'origine. Il est parfaitement possible, par injection, de rectifier ces désordres. Bien entendu, c'est une opération qui doit être menée avec beaucoup de minutie.

On utilise, en général, des coulis assez épais, à temps de prise court, de façon à créer des claquages horizontaux parfaitement contrôlés.

Une série de repères de soulèvement en surface permet d'arrêter chaque phase de traitement lorsque la cote prévue est atteinte.

La photo 3 illustre ce procédé appliqué à la remise en place de dalles précontraintes de la route nationale Paris-Nancy.

On sait maintenant préparer des coulis de viscosité, rigidité, temps de prise extrêmement variés. On connaît parfaitement leurs lois d'évolution. Si ces coulis sont bien choisis, on peut parfaitement étancher ou consolider un terrain sans créer le moindre désordre en surface.

Inversement, on peut créer des soulèvements contrôlés. Tout dépend du but recherché.

Mais, sans une bonne connaissance des comportements rhéologiques de tous coulis qui nous ont été apportés par la chimie moderne, on risque, comme l'apprenti sorcier, d'aboutir à l'inverse du but recherché.

Discussion

Président : M. A. MAYER

M. CARON présente sa communication.

Après avoir remercié le conférencier, M. le Président ouvre la discussion.

M. CORDA (ingénieur en chef du G.R.E.F., Nancy) intervient en ces termes :

« Deux procédés de contrôle des injections sont indiqués par M. CARON : la mise en place de piézomètres et le contrôle des soulèvements du terrain.

La mesure de ces derniers ne paraît pas constituer un moyen valable d'appréciation de l'efficacité du travail exécuté. Bien souvent en effet, les soulèvements résultent de claquages et le coulis, qui chemine au loin, ne vient pas fermer le terrain dans le secteur que l'on veut traiter. On laisse ainsi en place divers horizons perméables dans un sol qui n'est pratiquement jamais homogène et la mesure de la valeur des soulèvements n'aura donné aucune indication sur l'effet des injections. »

M. CARON répond que beaucoup de progrès ont été faits sur ce point ; à l'inverse de ce qui était la règle il y a vingt ans, l'injecteur cherche aujourd'hui à éviter tout « soulèvement » du terrain ou de l'ouvrage. Dès que les repères de nivellement signalent un léger soulèvement on arrête l'injection en cours et on la reprend avec un coulis plus fluide.

L'opération se poursuit ainsi par phases successives — sous le contrôle de repères de nivellement précis — en utilisant des coulis de plus en plus fluides.

M. CORDA signale également la nécessité de compléter les graphiques de soulèvement par l'indication de l'épaisseur du terrain traité afin d'obtenir la valeur relative dudit soulèvement. M. CARON est bien d'accord sur ce point.

M. P. HABIB revient sur la question du « claquage » lorsque ce dernier est plus ou moins systématiquement recherché :

« Il n'est pas possible dit-il de contrôler l'orientation des extensions des fissures horizontales, ni l'azimut des fissures verticales.

De sorte qu'un travail utilisant le claquage présentera de nombreux éléments aléatoires et la géométrie du dépôt sera un peu celle d'un « lit de feuilles mortes ».

A-t-on fait quelques progrès sur ce point ? »

La technique s'est peu à peu « affinée » répond M. CARON. Si pour la réalisation de l'enceinte étanche de certaines usines du Rhin on peut sans inconvénient accepter des soulèvements de l'ordre de 20 cm pour que le « lit de feuilles mortes » soit étanche, il n'en est pas de même lorsqu'on procède à des injections sous un bâtiment.

Il s'agit alors d'un travail de précision étroitement contrôlé par une série de repères qui signalent le moindre soulèvement ; d'après les indications ainsi recueillies on modifie ou on complète le réseau des trous d'injection et la qualité des coulis.

Le Président clôt la discussion en remerciant tous ceux qui l'ont animée et donne la parole à Mlle MARTIN qui expose sa communication :

Caractéristiques rhéologiques et composition des boues de forage

M. le Président remercie vivement Mlle MARTIN et la félicite pour la clarté de son exposé.

Personne ne demandant la parole, M. le Président lève la séance à 12 h 10.

Abstract

Grout rheology

A very wide range of reliable grouts are now available, from cement to synthetic high polymers, which differ by their chemical properties and setting process, but their use mainly depends on their rheological behaviour. There is a suitable grout for each type of ground, e.g. visco-rigid Bingham suspensions for coarse ground, colloidal non-rigid grout for medium sand and very low viscosity pure solutions for fine sand.

The first part of the report deals with this classification, and the parameters to be considered in grouting operations are reviewed, i.e. discharge/pressure relationships, the effect of grout age, etc. Successful grouting depends on intimate knowledge of rheological grout properties. Where the grout is too coarse or the injection

rate too high to allow complete impregnation, the grout progresses 'explosively', first vertically and then soon afterwards, horizontally. This effect is only of interest where it is desired to constitute an impervious bottom but is undesirable and should be avoided in all other cases, as it wastes grout and causes trouble at ground level.

By varying the type of grout with decreasing ground permeability, this 'explosion' effect can be avoided. Factual examples are given at the end of the report.

Initial use of highly Newtonian grouts should be avoided, however, as they are more costly and show poor strength properties in coarse ground when left to flow under gravity before setting.

