

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Etudes et utilisations récentes des coulis d'injection argile-ciment

Recent Studies and Applications of Clay-Cement Grouts

par R. BARBEDETTE, ingénieur des Ecoles Nationales des Arts et Métiers, chef du Bureau d'Etudes de la Société de Sondages, Injections, Forages, Entreprise P. Bachy à Paris, et F. SABARLY, ingénieur civil de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, ingénieur au Bureau d'Etudes de la Société de Sondages, Injections, Forages, Entreprise P. Bachy à Paris, France

Sommaire

Les coulis argile-ciment permettent d'obtenir des suspensions stables faisant prise en masse en conservant leur eau. Leur utilisation en injection conduit à un remplissage particulièrement économique des vides du terrain à étancher.

Ils présentent en outre des qualités très intéressantes en injection : stabilité, pénétrabilité, thixotropie . . .

Ces coulis ont été étudiés systématiquement en laboratoire en vue de leur application en injection.

L'utilisation de diagramme triangulaire permet de connaître rapidement les propriétés d'un mélange quelconque (densité, viscosité, résistance mécanique, etc.) par simple lecture. L'établissement de ces diagrammes ne nécessite qu'un très petit nombre d'essais.

Des coulis argile-ciment ont été injectés sur le chantier du barrage de Bin el Ouidane (Maroc) dans un terrain qui a pu être examiné après coup au moyen d'une galerie de reconnaissance.

A la suite de ces essais, les coulis argile-ciment sont employés couramment pour l'injection des voiles au large d'étanchéité du barrage de Bin el Ouidane.

Introduction

Les spécialistes injecteurs font depuis longtemps, on le sait, appel aux argiles en tant que matériaux d'étanchement.

Depuis longtemps aussi, ils ont pensé à employer des mélanges économiques argile-ciment (coulis binaires) dans lesquels le ciment confère à la masse une certaine résistance mécanique.

Nous étudions nous-mêmes ce problème depuis plus de 15 ans. Nos premières études systématiques remontent à 1937 (étanchement des berges d'un canal à Agen) et ont été faites avec la collaboration de Monsieur l'Inspecteur général des Mines Mayer et du Laboratoire du bâtiment et des travaux publics.

Nous avons donné en 1948 quelques renseignements succincts sur nos premières études dans une communication au Second Congrès International de Rotterdam (Clay cement mixtures in soil injections S.I.F. IX—C 16).

Summary

Clay-cement grouts make it possible to obtain stable suspensions, setting as a mass while retaining their water. Their use by injection gives a particularly economical means of filling soil voids for watertightness.

In addition, they possess very favorable qualities for grouting: stability, penetrability, thixotropy . . .

These grouts have been systematically studied in the laboratory from the viewpoint of their application.

The use of triangular classification diagrams enables us to determine rapidly the properties of any mixture density, viscosity, mechanical strength . . . simply by reading off the data. The setting up of these diagrams requires only a very small number of tests.

Clay-cement grouts have been used during the construction of Bin el Ouidane Dam (Morocco) in a soil which was subsequently examined by means of an exploratory tunnel.

As a result of these tests, clay-cement grouts are being used for injections into the lateral watertight curtains of the above mentioned dam.

Par ailleurs, les progrès réalisés dans le domaine des suspensions argileuses – initialement par l'emploi d'électrolytes et surtout, plus récemment, par «l'activation» au moyen de malaxeurs spéciaux (procédé Haute Turbulence) – ont permis d'accroître encore plus l'intérêt des coulis argile ciment.

Aussi devenait-il nécessaire de sortir du semi-empirisme qui régissait l'emploi de ces coulis et avons-nous commencé à entreprendre une étude générale rationnelle.

Nous exposons ici les premiers résultats auxquels nous avons abouti, résultats qui nous ont permis, entre autre, de mettre au point une méthode commode de représentation de ces coulis, ne nécessitant qu'un nombre restreint d'essais.

A cette occasion qu'il nous soit permis d'exprimer ici notre gratitude à l'Energie Electrique du Maroc et à son ingénieur-conseil la Société d'Etudes Electriques et Hydrauliques du

Maroc, pour tout l'intérêt qu'elles ont bien voulu porter à ceux de nos essais réalisés à l'occasion de l'étude de l'étanchement du barrage de Bin el Ouidane.

Nous remercions tout particulièrement Monsieur *Poitrinal*, de l'E.E.M., Monsieur *Lévêque* de la S.E.H.M., Monsieur *Delarue*, directeur du Laboratoire public d'essais et d'études de Casablanca et Monsieur *Mariotti*, son adjoint, qui nous ont apporté constamment leur aide précieuse et nous ont assistés de toute leur compétence.

Généralités

Les injections classiques de ciment pur consistent à injecter dans le terrain un lait de ciment assez clair obtenu par malaxage d'une certaine quantité de ciment dans un grand excès d'eau. Le remplissage des vides du terrain s'effectue grâce au dépôt du ciment. L'injection dans ces conditions fonctionne comme un remblayage hydraulique. Le produit pris qu'on retrouve dans les fissures ainsi injectées, est constitué de grains de ciment au contact les uns des autres. Il a toujours une densité voisine de 2 quels qu'aient été les dosages lors de l'injection.

Dans ces conditions, il faut environ 1500 kg de ciment pour remplir 1 m³ de vide du terrain.

Une assez faible proportion d'argile ajoutée au coulis de ciment permet de le maintenir en suspension.

Par exemple, un mélange contenant :

- 140 kg d'argile
- 440 kg de ciment
- 800 litres d'eau

donne 1 m³ de coulis faisant une prise totale en obturant 1 m³ de vide. La densité du produit pris est de 1,38. Dans ce cas il suffit de 580 kg de matières sèches pour obturer 1 m³ de vide du terrain, dont seulement 440 kg de ciment. D'où une économie considérable.

Représentation des coulis argile-ciment sur un diagramme triangulaire

Un coulis argile-ciment est parfaitement déterminé par :

son pourcentage d'argile $a = \frac{A}{A+C+E} = \frac{\text{poids d'argile}}{\text{poids total du coulis}}$

son pourcentage de ciment $c = \frac{C}{A+C+E} = \frac{\text{poids du ciment}}{\text{poids total du coulis}}$

son pourcentage d'eau $e = \frac{E}{A+C+E} = \frac{\text{poids d'eau}}{\text{poids total du coulis}}$

et on peut le représenter commodément par un point de coordonnées a, c, e , sur un diagramme triangulaire (Fig. 1).

Remarquons que sur le diagramme triangulaire :

- toute relation linéaire entre les pourcentages définit une droite,
- toute relation du type $P + \lambda Q = 0$ où P et Q sont des fonctions linéaires des pourcentages et λ un paramètre variable, définit un faisceau de droites concourrantes au point $P = 0$ et $Q = 0$,
- toute relation du type $P + \lambda = 0$ définit une famille de droites parallèles.

Remarquons également que la courbe représentant tous les coulis ayant une propriété donnée est une droite si le mélange de deux coulis possédant cette propriété donne un coulis possédant la même propriété.

Etablissement du diagramme triangulaire représentatif des coulis argile-ciment

Les coulis d'injection doivent présenter un certain nombre de qualités qui limitent un contour à l'intérieur duquel se situent les coulis utilisables. La zone utile est limitée en général :

- inférieurement, par la courbe correspondant aux coulis de viscosité maximum admissible pour être injectables,
- supérieurement, par la courbe représentant le coulis le plus fluide ne décantant pas,
- à gauche par la courbe correspondant à la résistance mécanique minimum admissible pour l'emploi envisagé.

Si on ajoute sur le diagramme les courbes d'égale viscosité, d'égale densité, d'égale résistance mécanique et d'égale prix, on possède tous les éléments nécessaires à la détermination de la composition des coulis à injecter.

Les propriétés des coulis dépendent largement du ciment et de l'argile utilisés, ainsi d'ailleurs que du mode de malaxage. Il est donc nécessaire, dans chaque cas particulier, de tracer le diagramme correspondant à l'argile et au ciment dont on dispose. On pourrait craindre qu'il ne faille un grand nombre d'essais pour déterminer l'ensemble des courbes indiquées ci-dessus. Nous allons voir qu'il n'en est rien et que, grâce aux propriétés mises en évidence au cours des nombreux essais que nous avons réalisés, il suffit d'un nombre très limité d'expériences de laboratoire pour tracer l'ensemble du diagramme.

Nous allons prendre l'exemple particulier des mélanges argile-ciment employés en injection pour l'exécution des voiles au large d'étanchéité du barrage de Bin el Ouidane, au Maroc.

L'argile utilisée est une argile violette d'excellente qualité provenant d'un gisement situé près de la route de Marrakech à Kasba Tadla. Sa limite de liquidité est de 71,2% et sa limite de plasticité de 25%.

Tracé des lignes d'égale densité. Connaissant le poids spécifique des grains d'argile (2,7) et des grains de ciment (3,1) il est facile de calculer la densité d'un coulis de composition a, c, e .

Les lignes d'égale densité sont définies par la relation :

$$\frac{a}{2,7} + \frac{c}{3,1} + e = \frac{1}{d} = \lambda$$

Nous avons vu que cette relation définit une famille de droites parallèles qu'il est facile de tracer sur le diagramme.

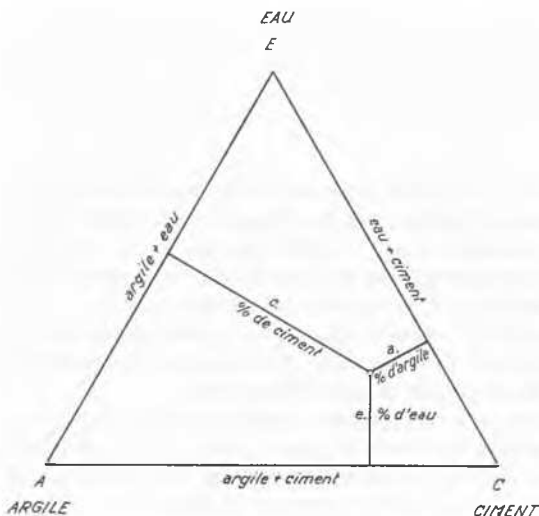


Fig. 1 Représentation triangulaire d'un coulis argile-ciment de composition a, c, e
Clay-Cement Grout Triangular Diagram for a Composition a, c, e

Tracé des lignes d'égale viscosité. L'expérience montre que, dans le domaine des viscosités utilisées, le mélange de deux coulis de même viscosité donne sensiblement un coulis de même viscosité. Il s'ensuit que les lignes d'égale viscosité, dans l'espace utile du diagramme, sont approximativement des droi-

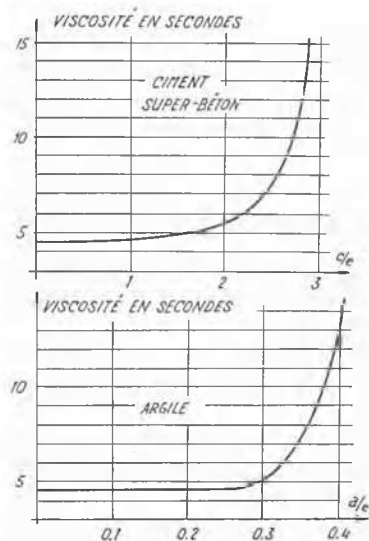


Fig. 2 Viscosité des coulis ciment-eau (en haut) et argile-eau (en bas). En fonction de la proportion solide-eau Cement-Water Grout (above) and Clay-Water Grout (below) as a Function of the Relation Solid-Water

tes. Pour les tracer il suffit d'en connaître deux points, par exemple un point sur la droite *AE* (argile-eau) et un autre sur la droite *CE* (ciment-eau).

On détermine donc d'abord les courbes représentant la viscosité des coulis d'argile pure d'une part, et de ciment pur d'autre part.

On en déduit les droites d'égale viscosité sur le diagramme triangulaire. La droite de viscosité maximum admissible pour l'injection limite vers le bas la zone utilisable du diagramme.

La viscosité a été mesurée au viscosimètre Redwood (orifice de 4 mm) qui donne la viscosité par le temps, en secondes, nécessaire à l'écoulement d'un certain volume de liquide. Les mesures ont toutes été faites en assurant pendant l'écoulement une agitation mécanique identique pour tous les coulis quels qu'ils soient.

Les résultats sont représentés sur la Fig. 2.

Remarquons que les coulis essayés étaient malaxés pendant deux minutes dans un malaxeur à très grande vitesse destiné à reproduire le phénomène de Haute Turbulence (activation du coulis).

Décantation limite. Le coulis ne doit pas décanter de façon appréciable avant sa prise. Nous avons admis que le volume d'eau surnageant au-dessus du coulis après la prise ne doit pas dépasser 5% du volume total.

La quantité de ciment minimum pour que la prise soit efficace et stoppe la décantation est de l'ordre de 8%. Dans ces conditions on peut admettre que la décantation limite obtenue est celle qui s'est produite au bout de deux heures environ, temps nécessaire au début de la prise du ciment.

Un fait intéressant a été observé: pour les premières heures de décantation (3 à 4 heures), deux coulis présentant la même allure de décantation, donnent, mélangés, un coulis fournissant sensiblement la même décantation.

On déduit immédiatement de ce fait que la ligne représen-

tant les coulis de décantation limite est une droite (tant que $c > 0,08$).

Pour le ciment pur employé, cette décantation limite est obtenue avec un $c/e = 1,62$. Avec l'argile pure utilisée la décantation limite de 5% au bout de deux heures est obtenue pour un $a/e = 0,2$. Donc, tant que $c > 0,08$, la ligne de décantation limite est la droite joignant les deux points correspondant à $c/e = 1,62$ de *EC* et à $a/e = 0,2$ de *AE*. Pour l'argile pure, la décantation de 5% au bout d'un temps pratiquement infini (deux jours) est obtenue avec un coulis $a/e = 0,35$. Par conséquent pour $c < 0,08$, la droite de décantation limite se raccorde au point $a/e = 0,35$.

Résistance mécanique. La résistance mécanique, mesurée sur cube, des coulis argile-ciment pris ne signifie pas grand'chose pour des injections d'étanchement. Il peut cependant être intéressant de la connaître.

Cette résistance a été mesurée en fonction de c/e pour les coulis à viscosité maximum (10").

On a obtenu les courbes représentées sur la Fig. 3.

On remarque que:

- le rapport de la résistance à 28 jours à la résistance à 7 jours est d'environ 1,3;
- pour une valeur de c/e supérieure à 0,7 environ, les résistances obtenues suivent à peu près la loi de *Bolomey*:

$$R = \frac{3}{5} Rm \left(\frac{c}{e} - 0,5 \right)$$

Rm étant la résistance du mortier normal à l'âge considéré.

Prix de revient. Il est intéressant de connaître pour chaque coulis le prix des matériaux contenu dans 1 m³. Le diagramme donne la densité du coulis; on peut donc en déduire les quantités de matériaux contenus dans 1 m³ et par suite le prix correspondant.

Il est plus rapide de tracer sur le diagramme les courbes «d'égal prix au m³». Ces courbes sont des droites puisque le

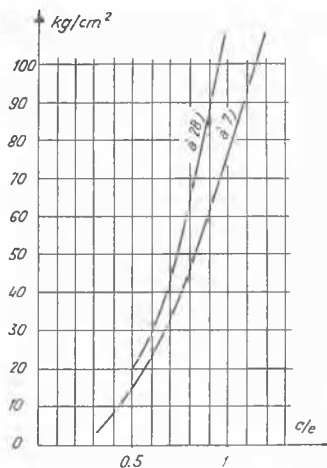


Fig. 3 Résistance des coulis argile-ciment à viscosité maximum en fonction de c/e Compressive strength for Clay Cement Grouts of Maximum Viscosity as a Function of c/e

mélange de deux coulis de même prix donne un coulis de même prix.

Ce sont d'ailleurs des droites concourantes comme le montrerait un calcul rapide.

A titre d'exemple, nous avons tracé sur le diagramme triangulaire de la Fig. 4 les droites d'égal prix pour les coulis utilisés à Bin el Ouidane, en nous basant sur les prix suivants:

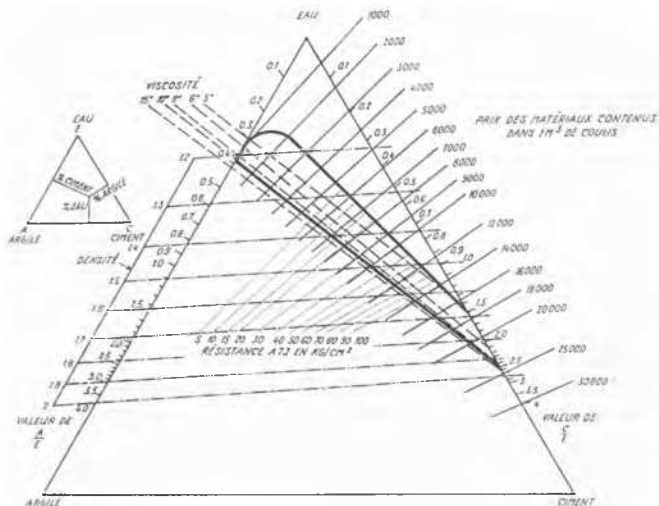


Fig. 4 Exemple de diagramme triangulaire de mélanges argiles-ciment
Clay Cement Grout Triangular Diagram

- Argile: 3.250 fr. la tonne
 - Ciment: 17.000 fr. la tonne
- } valables en mars 1951.

L'ensemble des résultats précédents est reporté sur le diagramme triangulaire de la Fig. 4 relatif aux coulis argile-ciment utilisés à Bin el Ouidane et malaxés à Haute Turbulence.

Essai «in situ»

Un essai intéressant a été réalisé à Bin el Ouidane. Un certain volume de terrain a été injecté aux coulis argile-ciment et une galerie de reconnaissance percée après coup, dans l'axe de la zone injectée, a permis de faire une première constatation: le remplissage de toutes les fissures par les matériaux d'injection est apparu absolument parfait.

Les fissures les plus grosses (10 cm et plus d'épaisseur) comme les plus fines (inférieures à 1 mm) avaient été parfaitement obturées. On a pu notamment constater que des fissures très fines débouchant dans les fissures très larges étaient quand même complètement remplies par le coulis d'injection.

L'ouverture de la galerie a montré en outre que les coulis ciment-argile donnaient d'excellents résultats lorsque le terrain contient de l'argile naturelle, dite argile de dissolution.

Le calcaire de Bin el Ouidane contient en effet fréquemment une argile brunâtre très plastique qui tapisse les parois des grosses fissures, ou s'y amasse en remplissages irréguliers. Dans

un tel terrain, l'injection de coulis ordinaire introduit un excès d'eau qui ramollit l'argile naturelle et ne peut pas s'éliminer à son contact; il en résulte à la fois des lacunes de remplissage, une fluidification de l'argile et une adhérence très mauvaise et même nulle du coulis à cette argile. Cet inconvénient ne se produit pas avec les coulis ciment argile qui n'ont pas d'eau en excès.

La galerie de reconnaissance a permis de voir que le remplissage des vides contenant de l'argile naturelle par les coulis ciment-argile était tout à fait remarquable. Aucune lacune, aucun décollement, aucune partie fluidifiée n'ont été observés dans ces zones.

Utilisation des coulis argile-ciment

L'emploi de coulis argile-ciment est tout à fait indiqué chaque fois que l'on cherche, non pas un effet de consolidation, mais simplement un effet d'étanchéité.

- Ils présentent les avantages suivants:
- une économie très importante de matériaux pour remplir le même volume de vide,
 - thixotropie prononcée, permettant une meilleure homogénéité de traitement et évitant, grâce à la gélification, les déperditions lointaines dans les gros vides,
 - excellente pénétration grâce à leur granulométrie moyenne plus fine et à l'effet lubrifiant de l'argile,
 - aucun excès d'eau, très appréciable dans les terrains sensibles à l'action de celle-ci,
 - adhérence remarquable sur les remplissages argileux naturels du terrain,
 - résistance au délavage supérieure à celle des coulis ordinaires.

Toutes ces qualités font notamment des coulis argile-ciment le matériau d'injection de choix pour l'étanchement des terrains alluvionnaires.

Mais ces coulis peuvent également trouver leur place dans certains problèmes de consolidation; c'est le cas, par exemple, lorsqu'il existe des remplissages argileux dans les fissures et cassures des roches à consolider.

L'adhérence des coulis argile-ciment de résistance convenable aux matériaux de remplissage permet d'obtenir une meilleure consolidation d'ensemble que par l'emploi de coulis de ciment pur. Une application récente de ce procédé a été faite dans la galerie d'Issarles (Chute de Montpezat, Ardèche) pour les injections à l'avancement. (Cf. «La méthode d'injection des terrains à l'avancement dans les cas difficiles de percement d'ouvrage souterrain» - MM. Caille et Barbedette - Vol. II, Sess. 7 du présent Congrès.)