

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.

Coulis et Bétons Plastiques pour Coupures Etanchés

Grout Mixes and Plastic Concretes for Impervious Cut-Offs

P. DUPEUBLE Ing. Civil des Ponts & Chaussées S.I.F. Entreprise Bachy,
P. HABIB Ing. E.P.Dr.Sc. Laboratoire de Mécanique des Solides (E.P. et E.N.S.M.P.), France

RESUME : Coulis, mortiers et bétons sont concurremment utilisés pour la réalisation de coupures étanches par parois moulées. La différence fondamentale de structure entre les coulils d'une part et les mortiers et bétons d'autre part (existence ou non d'un squelette granulaire), entraîne une différence marquée de comportement en particulier dans le domaine de la déformabilité avant rupture. Pour les coulils l'influence des différents facteurs : vitesse d'écrasement, pression latérale, nature du matériau (argile ou bentonite) montre la prépondérance du phénomène de consolidation dans les déformations observées avant rupture. Ce phénomène est sensiblement plus marqué pour les coulils bentonite-ciment. Pour les mortiers le domaine de comportement plastique avant rupture est beaucoup plus important. L'utilisation d'un granulat beaucoup plus grossier, dans le cas d'un béton, semble diminuer considérablement les possibilités de déformation plastique. Les conclusions de l'étude permettent de définir un certain nombre de lignes directrices qui pourront aider le projeteur dans le choix de la solution la mieux adaptée à un problème donné.

INTRODUCTION

Le développement de l'utilisation des parois moulées dans le sol en tant qu'organe d'étanchéité d'ouvrages fondés sur terrain meuble (alluvions fluviales, fluvioglaciaires, dépôts morainiques, éboulis de pente etc..) avait conduit les auteurs à présenter, à la session spéciale n° 14 du VIII^e Congrès International de Mécanique des Sols (MEXICO 1969), une étude sur le comportement élasto-plastique des bétons à faible teneur en ciment utilisés en particulier pour le bétonnage des parois d'étanchéité. Depuis 1969 l'utilisation des parois moulées comme coupure étanche à travers un terrain de fondation perméable s'est généralisée à de nombreux ouvrages provisoires ou définitifs : barrages, endiguement de rivières ou canaux, mise à sec de grandes fouilles, protection contre la pollution des eaux souterraines etc.. La technologie d'exécution s'est diversifiée parallèlement avec l'utilisation à la place de béton "plastique" comme matériau de remplissage de la paroi, de coulils bentonite-ciment, argile-ciment ou argile-bentonite-ciment.

Le moteur de cette évolution est, à l'origine, principalement économique : fabrication plus facile d'un coulil bentonite-ciment que d'un béton ou mortier plastique - exécution en continu et suppression de la nécessité de mise en oeuvre de tubes-joints dans le cas de l'utilisation directe du coulil de remplissage comme fluide de perforation.

Elle apporte certains avantages techniques immédiats comme par exemple la suppression des joints de construction dans le cas de l'exécution en continu comme mentionné ci-dessus.

Mais, pour le projeteur, le choix final entre coulil et béton repose principalement sur les caractéristiques de comportement du matériau de remplissage compte tenu de l'ouvrage à construire et de son utilisation.

ETUDE COMPARATIVE DES COULIS ET BETONS "PLASTIQUES"

La difficulté d'une étude comparative entre coulil et bétons plastiques réside dans l'absence pratique

de continuité dans leur composition qu'impose, entre ces deux familles, d'une part leurs conditions et sujétions très différentes de mise en oeuvre et d'autre part la différence de nature de leurs constituants de base :

- . coulil : densité comprise entre 1,2 et 1,3 ; pourcentage de matière sèche entre 25 et 35 % ; absence d'un squelette granulaire.

- . béton "plastique" : densité comprise entre 1,8 et 2,1 ; pourcentage de matière sèche entre 75 et 85 % ; existence d'un squelette granulaire.

1. - **Coulil :** L'étude d'un coulil à l'appareil triaxial à déformation contrôlée permet d'établir une courbe effort déformation caractérisant le comportement du matériau.

a) Influence de la vitesse d'écrasement

La figure (1) représente les déformations à la rupture pour des vitesses d'écrasement croissantes de

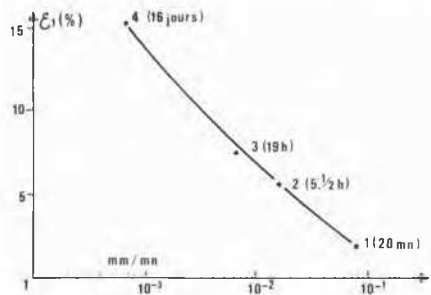


Fig. (1) Déformation à la rupture en fonction de la vitesse d'écrasement.

0,00066 mm/mm. à 0,081 mm/mm. pour un coulis de composition :

Ciment CPA	340 kg
Argile (L.L. 50)	96 kg
Bentonite (L.L. 520)	27 kg
Eau	850 kg

pour une pression latérale $\sigma_2 = \sigma_3$ de 100 kPa

On constatera l'influence considérable de la vitesse d'écrasement, la rupture n'ayant pas encore été obtenue pour l'échantillon n° 4 pour un déviateur de 1800 kPa et une déformation axiale de 15,2 % alors que la rupture a été obtenue pour l'échantillon n° 1 pour un déviateur de 590 kPa et une déformation axiale de 1,2 %. L'évaluation des possibilités pratiques de déformation du matériau impose donc l'adoption de vitesses d'écrasement très lentes en raison de sa faible perméabilité.

b) Influence de la pression latérale

La figure (2) représente les courbes effort-déformation à 28 jours pour un coulis de composition :

Ciment CPALC	250 kg
Argile (L.L. 105)	165 kg
Eau	853 kg

pour différentes pressions latérales et une vitesse d'écrasement de 0,05 mm/mm.

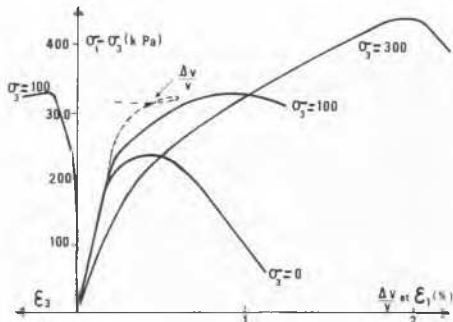


Fig. n° (2) Courbes effort-déformation (coulis argile-ciment).

On constate l'augmentation de la déformation avant rupture et du déviateur de rupture avec l'augmentation de la pression latérale. Pour $\sigma_2 = \sigma_3 = 100$ kPa on a reporté la variation diamétrale de l'échantillon ϵ_3 et, en pointillé, sa variation de volume. La déformation axiale de l'échantillon se fait avec diminution de volume et traduit essentiellement un phénomène de consolidation sous charge. On retrouve ainsi l'influence prépondérante de la vitesse de l'essai illustrée par la figure (1).

c) Influence de la nature du matériau

Les coulis utilisés peuvent être à base d'argile ou de bentonite. La comparaison de l'influence du matériau est limitée par la nécessité de s'en tenir à des compositions techniquement utilisables.

La figure (3) représente les courbes effort-déformation à 28 jours, pour une vitesse d'écrasement de 0,05 mm/mm., pour un coulis de composition :

Ciment CPALC	250 kg
Bentonite (L.L. 450)	36 kg
Eau	900 kg

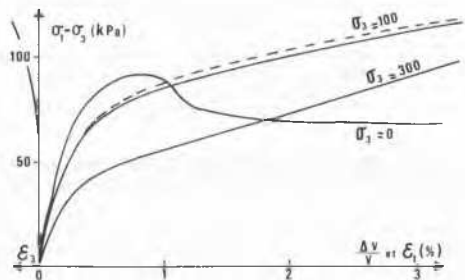


Fig. (3) Courbes effort-déformation (coulis bentonite-ciment).

Les résultats obtenus avec ce coulis bentonite-ciment sont à rapprocher de ceux obtenus avec le coulis argile-ciment de la figure (2). Pour $\sigma_2 = \sigma_3 = 100$ kPa on a également reporté la variation diamétrale de l'échantillon ϵ_3 et, en pointillé, sa variation de volume. Les maximums des déviateurs de rupture pour $\sigma_2 = \sigma_3 = 100$ et 300 kPa n'ont pas encore été obtenus pour une déformation de 3 %.

On retrouve les constatations déjà faites : augmentation de la déformation et du déviateur de rupture avec la pression latérale - diminution de volume privilégiant le phénomène de consolidation sous charge.

Le remplacement de l'argile par la bentonite se traduit par une augmentation du domaine de déformabilité avant rupture. Ce résultat se retrouve au niveau des essais oedométriques sur les mêmes coulis, où le rapport des déformations axiales stabilisées sous 2 MPa est de l'ordre de 2. (30 % contre 13 %).

Du point de vue perméabilité les résultats obtenus ne montrent pas de différence significative entre les coulis argile-ciment et bentonite-ciment. Cette perméabilité, de l'ordre de 2 à $5 \cdot 10^{-6}$ cm/s peut diminuer de moitié sous l'influence de la pression latérale traduisant là encore le phénomène de consolidation.

2. - Bétons "plastiques"

Les bétons plastiques se distinguent fondamentalement des coulis par l'existence d'un squelette granulaire en général constitué de sable et gravier. A ce squelette le ciment apporte la résistance mécanique, l'argile ou la bentonite la déformabilité et l'étanchéité.

La figure (4) représente les courbes effort-déformation à 28 jours pour une vitesse d'écrasement de 0,5 mm/mm., pour un mortier de composition :

Ciment CPALC	89 kg
Sable et gravier de Seine écrêté à 4 mm (D50 = 0,9 mm - D90 = 2,5 mm)	1338 kg
Argile de Provins (L.L. = 105)	150 kg
Eau	397 kg

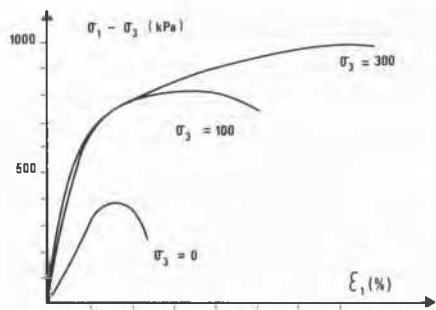


Fig. (4) - Courbes effort-déformation (mortier argile-ciment)

On constate l'augmentation très importante de la déformation avant rupture et du déviateur de rupture, avec la pression latérale. Sous une étreinte de 300 kPa le matériau a un comportement plastique dans un domaine de déformation très large atteignant 7%. Il était intéressant de comparer ces résultats à ceux obtenus avec un béton réalisé avec les mêmes sables et graviers, mais écrêtés à 15 mm au lieu de 4 mm, de composition voisine ajustée pour obtenir le même affaissement au cône d'ABRAMS (slump de 14).

Ciment CPALC	96,5 kg
Sable et gravier (D50 = 1 mm - D90 = 10 mm)	1447 kg
Argile	160 kg
Eau	349 kg

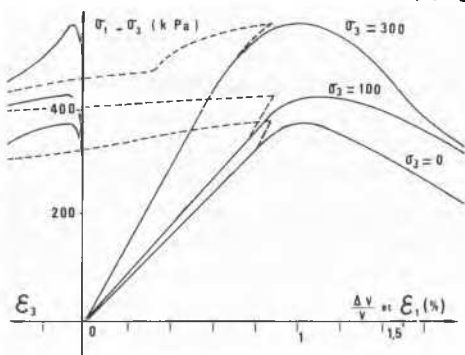


Fig. (5) - Courbes effort-déformation (béton argile-ciment).

La figure (5) représente les résultats obtenus. On constate la diminution importante du déviateur de rupture et surtout la réduction considérable du domaine de déformation plastique ramené à environ 1%. Le nombre limité d'essais (4) bien que concordants, ne permet pas de tirer de conclusions formelles de cette comparaison.

On retrouve probablement là l'influence de la surface spécifique du granulat, compte tenu de la résistance intrinsèque faible du liant, phénomène déjà observé pour les sols granulaires consolidés aux produits chimiques. Les modules de premier chargement E_1 , à

étreintes latérales égales sont comparables pour les mortiers et bétons et compris entre 50 et 110 MPa pour $\sigma_2 = \sigma_3 = 0,3$ MPa.

Les coefficients de perméabilité, du même ordre pour les mortiers et bétons, sont compris entre 0,5 et 2.10^{-6} cm/s.

3. - Conclusions :

La figure (6) résume les résultats obtenus (déviateur de rupture et déformation axiale correspondante) pour un certain nombre d'essais triaxiaux réalisés sur des coulis, mortiers, et bétons de compositions différentes.

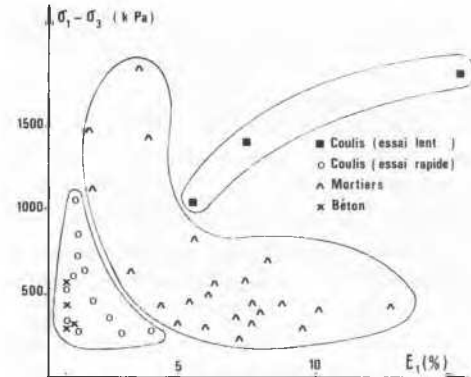


Fig. (6) - Comparaison entre coulis, mortiers et bétons. - Déviateur de rupture en fonction de la déformation axiale.

On retrouve : - pour le coulis, la très grande influence de la vitesse de l'essai triaxial, sur les caractéristiques de rupture.

- les possibilités beaucoup plus grandes de déformation axiale à la rupture des mortiers par rapport au coulis sous sollicitation rapide.

Il est possible de tirer de l'ensemble des nombreux essais effectués quelques lignes directrices permettant de guider le choix du projeteur devant un problème déterminé ; en effet :

- le domaine de déformation avant rupture pour des sollicitations rapides est beaucoup plus important pour les mortiers que pour les coulis. Une même tendance dans la comparaison mortier-béton demanderait à être confirmée par des essais complémentaires.

- pour des sollicitations lentes le domaine de déformation avant rupture des coulis peut atteindre et même dépasser celui des mortiers. Mais ce comportement est essentiellement lié à un processus de consolidation d'ailleurs sensiblement plus marqué pour les coulis bentonite-ciment que pour les coulis argile-ciment. On peut donc craindre dans le cas de coupures étanches, réalisées au coulis, soumises à des efforts alternés, l'apparition de contraintes locales après le premier chargement pouvant diminuer la sécurité de l'ouvrage.

- les possibilités très larges dans le choix des compositions des coulis, mortiers et bétons permettent sans difficulté d'ajuster les caractéristiques de résistance et de déformabilité aux problèmes posés en gardant présent à l'esprit que des déformabilités de quelques % et des résistances de quelques centaines de kPa sont largement suffisantes dans la plupart des cas.

En pratique on pourra s'orienter :

- vers une solution coulis chaque fois que la paroi sera peu ou moyennement sollicitée :
coupure étanche de faible à moyenne profondeur, digue de hauteur faible à moyenne au dessus du terrain de fondation intéressé par la coupure, protection de fouilles, coupure provisoire etc..

- vers une solution mortier ou béton chaque fois que la paroi sera fortement, ou rapidement sollicitée :
coupure étanche de grande profondeur, digue ou barrage de grande hauteur, ouvrage en zone sismique.

4. - Quelques exemples caractéristiques

A : Coupure en béton plastique

Barrage CONVENTO VIEJO (CHILI) (Fig. 7)

Digue en terre à noyau central - longueur 710 m.
Hauteur max. au dessus du terrain naturel : 37 m.
Paroi moulée à travers le remplissage alluvial :
- profondeur max. 50 m.
- surface totale 14.500 m² - épaisseur 0,80 m.

Béton plastique :
Sable et gravier 1590 kg
Ciment Portland 74 kg
 R_c 28 = 0,45 MPa Argile (L.L. 53) 75 kg
 E_1 = 125 MPa Bentonite 25 kg
Eau 338 kg

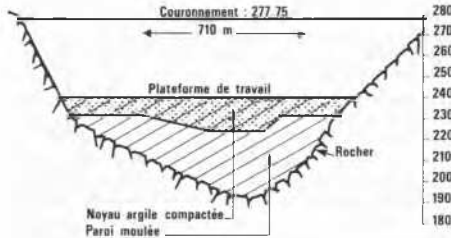


Fig. (7) CONVENTO VIEJO - Elévation

B : Coupure au coulis

1. - Aménagement hydroélectrique de SALIGNAC (FRANCE)

Digues de protection provisoire des fouilles de

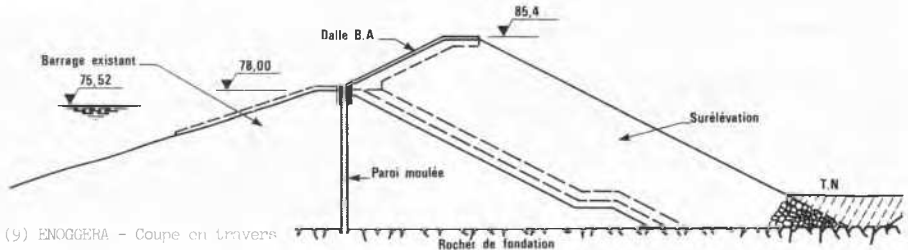


Fig. (9) ENOGGERA - Coupe en travers

l'Usine et de protection définitive de la ville de SISTERON.

Parois moulées à travers le remplissage alluvial
- profondeur max. 20 m.
- surface totale 8000 m² - épaisseur 0,50 m.

Excavation directe au coulis bentonite-ciment

	Ciment SEXTAL	260 kg
R_c 28 = 1 MPa	Bentonite (L.L. 450)	46,5 kg
	Eau	895 kg
	Réducteur de filtrat	4 kg

2. - KRANJI-PANDAN Water Scheme (SINGAPOUR) Fig. (8)

Barrage d'estuaire pour retenue d'eau douce :
longueur 900 m. Hauteur max. au dessus du fond après dragage : 17,5 m. Paroi moulée constituant le noyau étanche de la digue et la coupure dans les argiles sableuses de fondation.
- profondeur max. 24 m.
- surface totale 12500 m² - épaisseur 0,60 m.

Excavation directe au coulis bentonite-ciment

Pour $\sigma_2 = \sigma_3 = 0,3$ MPa	Ciment PMF2	265 kg
$\sigma_1 - \sigma_3 = 1,1$ MPa (28 j.)	Bentonite	50 kg
Δl (essai lent) = 16 %	Eau	890 kg

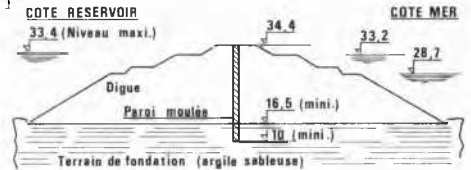


Fig. (8) : KRANJI-PANDAN - Coupe schématique

3. - Barrage ENOGERA - BRISBANE (AUSTRALIE) Fig.(9)

Surélévation de 7,4 m. du barrage existant.
Hauteur max. ancien barrage : 20 m. - Longueur 340 m.
Paroi moulée reconstituant le noyau étanche de l'ancien barrage en terre homogène.

- profondeur max. 20 m.
- surface totale 4000 m² - épaisseur 0,60 m.

Coulis argile-bentonite-ciment de substitution

	Ciment	340 kg
pour $\sigma_2 = \sigma_3 = 0,07$ MPa	Argile (L.L. 50)	96 kg
$\sigma_1 - \sigma_3 = 1,8$ MPa (90 j.)	Bentonite (L.L.520)	27 kg
Δl (essai lent) = 15 %	Eau	850 kg