

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.

Formulation et propriétés d'un coulis en bentonite ciment

Formulation and properties of bentonite-cement grout

Mounir Ben JDIDIA^(1,2) & Zouheir BOUARADA⁽¹⁾ & Mehrez KHEMAKHEM^(1,2)

¹: Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Sfax ISET : Route de Mahdia Km 2,5 BP 88A EL-BUSTEN - 3099 SFAX- TUNISIE

²: Unité de recherche géotechnique environnementale et matériaux civils, Ecole Nationale des Ingénieurs de Sfax
Tel : (216)98951723 - (216) 98656012 - Fax : (216) 74431386

Mail : Mounir.BenJdidia@isetsf.rnu.tn , mehrez.khemakhem@isetsf.rnu.tn ; zouheir.bouarada@isetsf.rnu.tn

RESUME

Le dépôt de phosphogypse à Sfax (Tunisie) constitue un danger permanent pour l'environnement marin et terrestre. Le projet Taparura consiste en partie de confiner ce dépôt pour limiter partiellement ou totalement la pollution par les métaux lourds par la réalisation d'un écran étanche en bentonite ciment. Cette étude propose une méthodologie de formulation des coulis en bentonite ciment. Les propriétés physiques à l'état frais et les propriétés mécaniques à l'état durcis du matériau ont été déterminées. L'étude comporte essentiellement deux volets : le premier concerne une synthèse bibliographique d'une part sur les matériaux de composition, bentonite et ciment, et leurs propriétés et d'autre part sur les méthodes de formulation et les essais appropriés normalisés pour la caractérisation des coulis. Le second volet est relatif à une étude expérimentale effectuée en vue de proposer une composition optimale du matériau : bentonite ciment.

Mots clés: coulis, écran, bentonite, ciment, viscosité, décantation, perméabilité, résistance

ABSTRACT

Storage of phosphogypsum at Sfax City (Tunisia) represents a potential danger for marine and land environment. A part of Taparura project aims at the confinement of this deposited fill to prevent, partially or totally, heavy metal pollution by executing an impervious screen made up of bentonite waterproof cement. A methodology is here presented of the formulation of cement bentonite grouts. The physical properties of fresh and hardened material and its mechanical properties were determined. The study includes two main components. The first summarizes a bibliography on constitutive materials, bentonite and cement, and their properties and on methods of formulation and standardized tests for the characterization of grout. The second is related to an experimental study conducted in a view of suggesting the optimised composition of the material cement bentonite

1 INTRODUCTION

Les déchets, résidus de produits industriels sont de plus en plus nombreux et posent, en général, des problèmes en général à la nature. Les sous produits industriels sont souvent stockés en dépôts. Certains sous produits sont chargés par des agents polluants voire nocifs dans certains cas. Les agents polluants du phosphogypse de la ex NPK sont principalement des métaux lourds tels que le zinc, le plomb, le mercure, les acides, les sulfates et les chlorures, les nitrates et le gaz radant.

Les parois étanches sont généralement utilisées pour confiner des déchets industriels. Elles ont pour rôle de limiter les écoulements chargés et de stopper la migration des agents polluants. L'écran doit être flexible et capable de subir des déformations sans fissuration. La technique de paroi étanche consiste en l'excavation d'une tranchée et de la remplir à l'aide d'un coulis ciment bentonite ; le coulis agit d'abord comme support des parois et, en faisant prise, constitue un écran d'étanchéité (auto durcissant). Les caractéristiques d'une paroi étanche sont :

- Une résistance mécanique suffisante avec une déformabilité voisine de celle du sol
- Une faible perméabilité de valeur compatible avec les conditions environnementales
- Une résistance aux agressions chimiques donc une longévité (durabilité)

Le premier volet de cette étude comporte essentiellement une synthèse bibliographique sur :

- les types de bentonites et les propriétés physiques des coulis en bentonite

- les ciments et leurs propriétés en vue de choisir un ciment adéquat au milieu agressif (milieu marin sulfaté et acide cas des lixivias du phosphogypse)
- les méthodes de préparation des coulis en bentonite ciment
- les essais appropriés et normes disponibles pour la caractérisation des coulis

Dans une seconde étape une étude expérimentale a été effectuée en vue de proposer une composition optimale du matériau : bentonite ciment. Il s'agit de déterminer l'influence des paramètres **B/C** ; et **E_T/C** sur :

- les propriétés physiques du coulis frais
- les propriétés mécaniques du coulis durcis :
Résistance et Module de déformation
- la perméabilité du matériau durcis

2 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Les écrans sont réalisés, à travers le monde, en de nombreux types qui sont :

- Sol excavé + Bentonite (**SB**), (Liausu & Spaulding 2006)
- Sol excavé + Bentonite + Ciment (**SBC**), (Christopher et al.)
- Bentonite + Ciment (**BC**) (Portland Ciment Association, USA) ; (Opdyke & Jeffrey) ; (Massièra & Levay 1999) et Massièra et al. 1993)
- Béton + Bentonite (**BB**).

Les écrans contenant le ciment sont auto-durcissables du fait de l'hydratation du ciment.

L'étanchéité peut être complétée par une feuille en polyéthylène (dans le cas des écrans en **B-C**) pour assurer une étanchéité parfaite et une longévité maximale. Les matériaux utilisés pour le coulage des parois étanches sont principalement le ciment, la

bentonite, les granulats : sable 0/4 + Gravier 4/8, éventuellement un adjuvant et dans certains cas le sol excavé.

2.1 Bentonite

La bentonite appartient à la famille des smectites (ou des montmorillonites). Les particules de bentonite sont constituées d'assemblages de feuillets parallèles.

La minéralogie de la bentonite est la suivante : $4\text{SiO}_2 \text{ Al}_2\text{O}_3 \text{ H}_2\text{O}$ (molécule de base) Avec : SiO_2 : silicate de silice ; Al_2O_3 : alumine ; H_2O : eau

Les suspensions de bentonite présentent des propriétés particulières tel que l'aptitude à développer de la viscosité, l'aptitude à former un « gel » (thixotropie), l'aptitude à constituer un seuil d'écoulement et d'avoir des propriétés de colmatage voire liantes et agglomérantes, à maintenir les parois d'une tranchée (aptitude de former un cake par filtration).

Les propriétés **de nature** à déterminer pour une bentonite (à utiliser dans un écran (Cement-bentoniet schermen 1997)) sont :

- La masse volumique des particules solides : $\rho_s > 2.6 \text{ g/cm}^3$
- La granulométrie refus au tamis $125 \mu\text{m} < 5\%$
- La valeur de bleu de méthylène : $\text{VBS} > 22$
- L'indice de plasticité : I_p élevé
- L'indice de retrait : I_R élevé
- le pH (pour une suspension) $8.5 < \text{pH} < 9.5$
- Absorption en eau $> 500 \%$ (en 24 h)
- La teneur en carbonate de calcium : $\text{CaCO}_3 < 5\%$

La propriété **d'état** à déterminer pour une bentonite (à utiliser dans un écran (Cement-bentoniet schermen 1997)) est la teneur en eau initiale : $w_i < 13\%$

2.2 Choix d'un Ciment

Le choix d'un ciment dépend principalement des conditions environnementales de l'écran. En effet l'écran est situé au voisinage du milieu marin sulfaté et soumis aux attaques de l'acide phosphorique (**PH** de l'ordre de 3 à 4) par conséquent le ciment doit résister aux sulfates et aux percolations des eaux chargées d'infiltration en provenance du dépôt de phosphogypse.

Pour le choix d'un ciment d'après la norme NF P 18-011 (AFNOR 1997) les critères suivants sont adoptés :

- Trois niveaux de protection **1 ; 2 ; 3**
- Quatre classes relatives au degré d'agressivité **A₁ ; A₂ ; A₃ ; A₄**
- Les agents agressifs (dans les sols ou en solutions): ions sulfates SO_4^{2-} ; Magnésium Mg^{++} ; chlorures **Cl** ; ammoniacque NH_4^+ et le gaz CO_2
- Le **PH** du milieu

Pour le choix du ciment les recommandations de la norme imposent un niveau de protection **3** et une classe d'agressivité **A₄** correspondant aux conditions du projet. La teneur en C_3A ($< 5 \%$) est limitée pour résister aux eaux de mer sulfatées. La teneur en laitier minimale ($> 60 \%$) pour résister aux attaques acides. Cette teneur doit être supérieure à 80% (Cement-bentonite schermen 1997) pour avoir une bonne imperméabilité et une résistance acceptable du matériau **BC**

Le **CEM III/C 32,5** est un ciment au **Laitier granulé de haut fourneau (S)** qui présente une teneur en laitier allant de 81 à 95 %. Ce ciment est convenable pour les conditions du projet (Cement-bentonite schermen 1997) car :

- il développe des résistances aux acides
- il développe une résistance tardive largement supérieure au CEM I et au CEM II
- sa surface spécifique élevée donne une bonne imperméabilité au matériau **B-C**

3. ETUDE EXPERIMENTALE SUR LE MATERIAU BENTONITE CIMENT B-C

La formulation du matériau bentonite-ciment (**B-C**) nécessite dans une première phase l'identification des produits utilisés. Il s'agit de déterminer les propriétés physiques et mécaniques de chaque composant. La préparation d'un tel mélange (**B-C**) comporte deux volets :

- a) un premier concerne la préparation du coulis bentonitique : eau + bentonite. Il s'agit de déterminer les propriétés physiques du coulis bentonitique et leurs variations en fonction du dosage en eau.
- b) le second concerne la préparation du coulis bentonite-ciment (**B-C**). Il s'agit de déterminer les propriétés physiques et mécaniques en fonction des dosages utilisés.

Enfin des recommandations, concernant les dosages possibles ainsi que les paramètres majeurs de la formulation, seront proposées.

3.1 Identification de la bentonite

La bentonite Tunisienne **SOFAP** pour forage pétrolier a été caractérisée par des essais au laboratoire de l'Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Sfax (PFE ISET 2007). Les résultats sont :

- La masse volumique des particules solides: $\rho_s = 2.64 \text{ g/cm}^3$
- La valeur de bleu de méthylène : $\text{VBS} = 26$
- L'indice de plasticité : $I_p = 184$
- L'indice de retrait : $I_R = 284$
- La teneur en carbonate : $\text{CaCO}_3 = 5\%$
- La teneur en eau initiale : $w_i = 10 \%$

3.2 Identification du ciment

Le ciment disponible sur le marché local est le **CEM I HRS 42.5**. La classe du ciment a été vérifiée conformément à la norme en vigueur.

L'essai de consistance montre que le rapport eau sur ciment est de l'ordre de : $E_c/C = 0.26$. La **SSB** est de l'ordre de **5000 cm²/g**. La masse volumique absolue est de l'ordre de **3.1 g/cm³** et la masse volumique apparente est de l'ordre de 1 g/cm^3

3.3 Préparation du coulis de bentonite « coulis mère »

Il s'agit de déterminer les propriétés physiques suivantes selon les normes et les procédures recommandées (Cement-bentoniet schermen 1997); (Portland Ciment Association, USA) et (Erik 2002) à savoir la viscosité au cône de Marsh, la densité, la décantation, le filtrat et le cake, la stabilité du coulis dans le temps, la teneur en sable dans le cas où le coulis servira pour le maintien des parois

a/ Viscosité de Marsh :

Il s'agit de mesurer le temps d'écoulement pour récupérer un volume standard du coulis. Cet essai permet de déterminer l'influence du dosage en eau sur la viscosité (figure1).

le dosage de saturation est la quantité d'eau nécessaire pour garantir la stabilité du coulis (Paramètres physiques restent inchangés : viscosité ; densité ; décantation ; ...)

Pour ce cas, le dosage de saturation est déterminé au point à la pente la plus faible qui est atteinte à un rapport de $B/E_B = 5\%$, ce pourcentage vérifie les recommandations des références (Cement-bentonite schermen 1997); (Portland Ciment Association, USA).

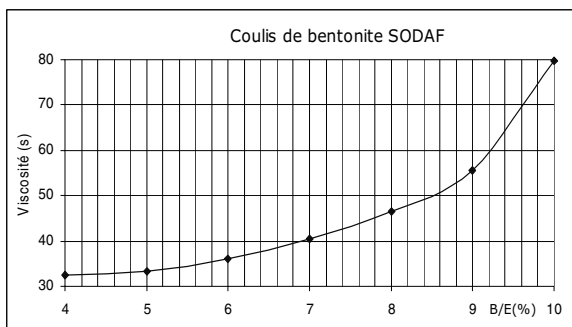


Fig 1 : variation de la viscosité du coulis en fonction du paramètre B/EB

b/ La densité :

Il s'agit de déterminer la masse volumique par la méthode du pycnomètre (Bouassida & Boussetta 2007), ou à l'aide de la balance à boue (figure 2)

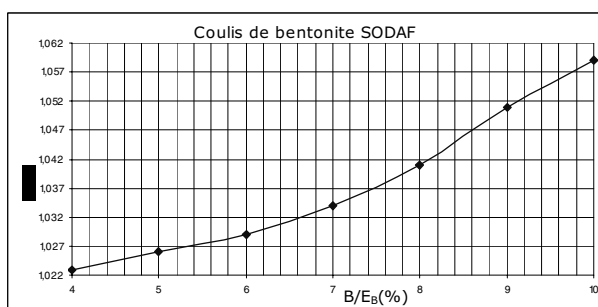


Fig 2 : variation de la densité en fonction de B/EB

La densité est également un paramètre fondamental pour le maintien des parois de la tranchée sa valeur est limitée (Cement-bentoniet schermen 1997) et (Portland Ciment Association, USA).

c/ Essai de décantation :

La décantation est mesurée dans une éprouvette en verre de 100 cm³

Tableau 1 : décantation

Temps (h)	1	2	3	4	24
Décantation (%)	1	1	1.5	2	3

La décantation de la bentonite est inférieure à 2.5 % à 2 h et à 3% au bout de 24 h.

3.4 Préparation du coulis de bentonite ciment

Le coulis de ciment est préparé avec un dosage eau par ciment Ec/C fixé et introduit progressivement dans le coulis mère. L'agitation est nécessaire et un malaxage énergétique doit être assuré.

3.4.1 Influence des rapports ET/C et B/C et du dosage en ciment sur les propriétés physiques

Il s'agit de déterminer dans un premier temps par une étude expérimentale l'influence du rapport bentonite-ciment B/C sur les propriétés physiques du coulis B-C. Les dosages en ciment peuvent varier de 200 à 300 kg/m³ au stade de l'étude. Les dosages en bentonite peuvent varier de 30 à 50 kg/m³ de coulis. On doit alors respecter un rapport de B/C variant entre 10 et 15% ; (Cement-bentoniet schermen 1997); (Massièra & Levay 1999) et Massièra et al. 1993).

Pour avoir des propriétés physiques acceptables les dosages en eau peuvent varier pour ET/C de 2.8 à 4.0 (voir figure 3). Toutefois il est souhaitable d'utiliser un plastifiant réducteur d'eau (aussi retardateur si possible) pour diminuer ET/C.

3.4.2 Mesure de la viscosité

La viscosité a été mesurée pour des rapports de B/C variant entre 6 à 20 % (PFE ISET 2007) voir figure 3.

Le rapport eau totale sur ciment a été déterminé, pour des rapports de B/C variant entre 6 à 20 %, pour avoir une viscosité de 40 s (recommandé par (Cement-bentoniet schermen 1997)) voir tableau 2

Tableau 2 : eau totale en fonction du paramètre B/C

rapport B/C (%)	ET / C	Viscosité (s)
6	2	40.51
8	2.4	40.31
10	2.7	41.11
12	3.2	40.23
14	3.7	40.46
16	4.2	40.08
18	4.9	40.02
20	5.1	39.33

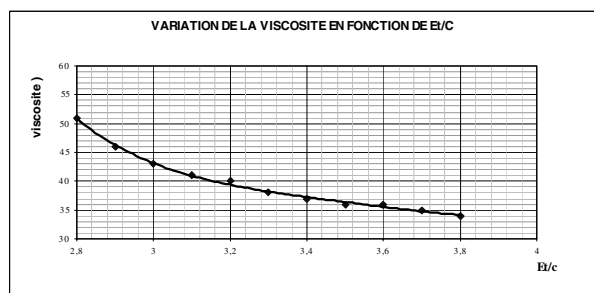


Fig 3 : variation de la viscosité en fonction de ET/C pour B/C=10%

3.4.3 Mesure de la densité

La densité a été mesurée pour des rapports de B/C variant entre 6 à 20 % et pour des coulis à viscosité moyenne de 40 s (voir figure 4).

La densité recommandée par (Cement-bentoniet schermen 1997) est de l'ordre de 1.2 à 1.3 ce qui donne un rapport de B/C de l'ordre de 11

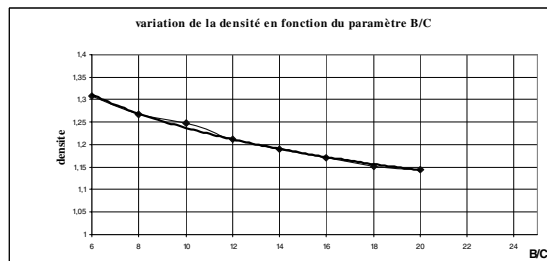


Fig 4 : densité en fonction de B/C : viscosité = 40 s

3.4.4 Mesure de la décantation :

La décantation a été mesurée pour les coulis testés à viscosité fixée à 40 s (PFE ISET 2007) (voir figure 5).

La décantation reste limitée et acceptable pour des rapports de **B/C > 10 %**

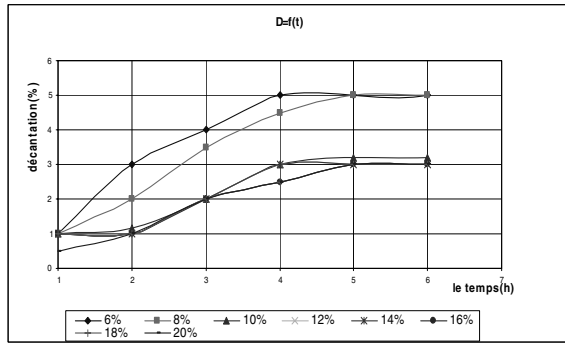


Fig 5 : décantation en fonction de **B/C** pour une viscosité de

3.5 Evaluation des dosages en ciment et en bentonite pour 1 m³ de coulis B-C pour une viscosité fixée à 40 s

La méthode utilisée pour la détermination des % des constituants est celle du 1m³ optimal :

$$1m^3 = Vc + Vb + Ve + Vair = \frac{m_C}{\rho_C} + \frac{m_B}{\rho_B} + \frac{m_E}{\rho_E} + Vair$$

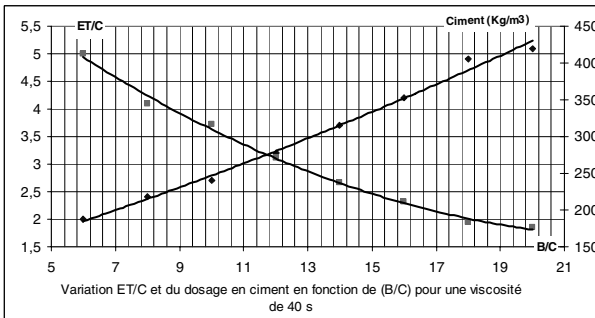


Fig 6 : dosages en fonction de **E_T/C**

Pour déterminer les propriétés mécaniques du matériau **B-C** quatre dosages pratiques en ciment ont été choisis pour la préparation de quatre coulis à savoir 200 ; 250 ; 300 ; 350 pour un m³. Les rapports **B/C** et **E_T/C** ont été déterminés sur les courbes précédentes voir figure 6 et tableau 3

Tableau 3 : dosages pratiques

C (kg/m ³)	B/C (%)	B (kg)	E _T / C	E _T (kg)
350	8.25	30	2.4	842
300	10.5	31.5	2.86	858.45
250	12.8	33	3.5	874.49
200	16.75	33.5	4.45	890.92

3.6 Résistance mécanique des dosages pratiques

Les résistances mécaniques aussi bien à la traction qu'à la compression sont données dans le tableau 4

Tableau 4 : résistances mécaniques

Ages	7j		28j	
	σ _{c7}	σ _{t7}	σ _{c28}	σ _{t28}
350kg	0,89	0,285	1,72	0,528
300kg	0,73	0,261	1,03	0,341
250kg	0,46	0,169	0,66	0,259
200kg	0,43	0,137	0,54	0,159

Le dosage en ciment de 300kg/m³ donne des résistances acceptables vis-à-vis des recommandations (Cement-bentoniet schermen 1997)

4 MODULE DE DEFORMATION ET PERMEABILITE AU TRIAXIAL

Un essai triaxial consolidé non drainé avec mesure de la pression interstitielle CU+u a été effectué (PFE ISET 2007).

Les résultats sont présentés succinctement ci après :

Déformation Axiale	1.2 %
Déviateur Max.	940.4 kPa
Perméabilité avant consolidation	k=8.16 e-9 m/s
Perméabilité après consolidation de 150 kPa	k=4.84 e-9 m/s
Module de déformation	E = 140 MPa

5 CONCLUSION

L'étude effectuée a permis de dégager les aspects suivants :

- Concernant le coulis mère de bentonite utilisé pour la stabilité de parois ou pour la préparation du coulis en **B-C** on note un rapport **B/E_B** =5% pour obtenir des propriétés physiques acceptables stables dans le temps
- Concernant le coulis **B-C** en bentonite – ciment les propriétés physiques et mécaniques dépendent des paramètres **B/C** (10% à 12%) ; **B/E_B** ; **E_T/C** (2.8 à 3.2)

Les propriétés du coulis **B-C** à l'état durci à 28 jours sont :

- Résistance à la compression simple Rc= 0.5 MPa à 1 MPa selon le dosage en ciment
- Résistance à la traction simple Rt = 0.1 MPa à 0.3 MPa selon le dosage en ciment
- Le module doit être voisin du sol avoisinant l'écran E = 70 à 140 MPa
- La perméabilité est : k= 10⁻⁸ m/s : valeur minimale.

BIBLIOGRAPHIE

Massiera M., Levay J. (1999). « Construction de la paroi au coulis ciment-bentonite sous la digue nord de l'aménagement hydroélectrique La grande I », Canadian Journal Civil Engineering N° 26

Missiera M., Deschênes J. H., Tounier J. P. (1993) « Résultats des essais de laboratoire sur les coulis autoturcissables dans le cadre de leur utilisation pour la construction d'un écran d'étanchéité », actes du congrès Canadien de géotechniques

Benguella B. (2005). « Etude physico-chimique de la bentonite de Maghnia », 2^{ème} journées d'études sur les sols gonflants, Algérie

INNORPI - NT 47.01 : ciment - composition, spécifications et critères de conformités des ciments courants (2005)

AFNOR - FD P 15-010 : Liants hydrauliques, Guide d'utilisation des ciments (1997)

AFNOR - NF P 18-011 : Bétons, Classification des environnements agressifs (1992)

Cement-bentoniet schermen (les écrans en bentonite ciment) (1997) ; civieltechnisch centrum uitvoering research en regelgeving (document en hollandais)

Physique, chimie et mécanique des matériaux cimentaires (2005). Ecole Thématique CNRS – ATILH ;

Sous la direction de Jacques Baron et Raymond Sauteray (1995). Le béton hydraulique, PENPC

Guide specifications cement bentonite slurry trench , Portland Cement Association (PCA), USA

Christopher R., Ryan R. Steven D. Soil-Cement-Benton Slurry Walls. Liausu P., Spaulding Ch. (2006). Construction d'une paroi étanche en sol bentonite sur le site de l'ancienne aciérie de Newcastle en Australie, Revue travaux – décembre 2006

Les coulis et les bétons pour les fondations spéciales, collection CimBéton, T97

Erik Mikkelsen P. (2002). Cement-bentonite Grout Backfill for Borehole Instruments, Geotechnical News, december 2002

Opdyke S., Jeffrey C. E. Hydraulic Conductivity of Cement-Bentonite-Slag Slurry Wall Barriers

PFE ISET de Sfax département GC : formulation des B-C 2007.

Bouassida M., & Boussetta S. (2007). Manuel de travaux pratiques de mécanique des sols. Centre de Publication Universitaire. Edit. Orbis, Tunis.