
Comportement physique et mécanique des sédiments de dragage pour leur valorisation dans le domaine routier. Application au barrage de Cheurfas (Algérie)

Maghnia Asmahane Bourabah* — Said Taibi— Nabil Abou-Bekr***

* *Laboratoire Eau et Ouvrages dans Leur Environnement, Université A. Belkaid, BP 230 - 13000 Tlemcen, Algérie, mbourabah2000@yahoo.fr, aboubekrnabil@yahoo.fr*

** *Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, FRE CNRS 1302, Université du Havre, 53 rue de Prony, 76600 Le Havre, France, Said.Taibi@univ-lehavre.fr*

RÉSUMÉ. En géotechnique environnementale, la valorisation des sédiments de dragage et leur utilisation dans la réalisation de certains ouvrages de travaux publics est une voie de plus en plus prospectée par les chercheurs ces dernières années.

L'article traite de l'exploitation des sédiments de dragage du barrage de Cheurfas (Algérie) et leur valorisation en technique routière.

Des analyses physico chimiques, minéralogiques et mécaniques ont été réalisées. Ces analyses ont montré qu'un traitement à base de sable, chaux et ciment semble prometteur. Différentes formulations ont été élaborées dans ce sens et une synthèse des caractéristiques mécaniques a été élaborée conformément aux normes et à la classification des matériaux utilisés en technique routière.

ABSTRACT. In environmental geotechnics, the valorization of dredging sediments and their use in embankments is a way increasingly prospected by researchers these last years.

This paper treats exploitation of dredging sediments of the dam Cheurfas (Algeria) and their valorization in road embankments.

Physico-chemical, mineralogical and mechanical analyses were studied to determine their level of influence on the mechanical behaviour. These analyses showed that a treatment by sand, lime and cement proved to be necessary. Various formulations were elaborate in this direction and a synthesis of the mechanical characteristics was elaborate in accordance with the standards and the classification of materials used in road embankments.

MOTS CLES : sédiments de dragage, valorisation, traitement, technique routière, barrages, comportement mécanique.

KEYWORDS: dredging sediments, valorization, treatment, road embankment, dams, mechanical behaviour.

1. Introduction

L'Afrique du nord détient actuellement environ 230 barrages d'une capacité totale de 23 km³. Environ 125 hm³ de sédiments se déposent annuellement au fond de ces barrages, avec par ordre d'importance décroissante : le Maroc avec 65 hm³, l'Algérie avec 32 hm³ et la Tunisie avec 25 hm³ (Remini, 1997). Ainsi, plus de 30 millions de m³ de sédiments se déposent annuellement au niveau des 52 grandes retenues de barrages de l'Algérie dont une quinzaine sont gravement menacés par ce phénomène d'envasement (Figure 1) où le dévasement par dragage est devenu aujourd'hui une option inévitable pour prolonger leur durée de vie (Hallouche et Remini, 2004).

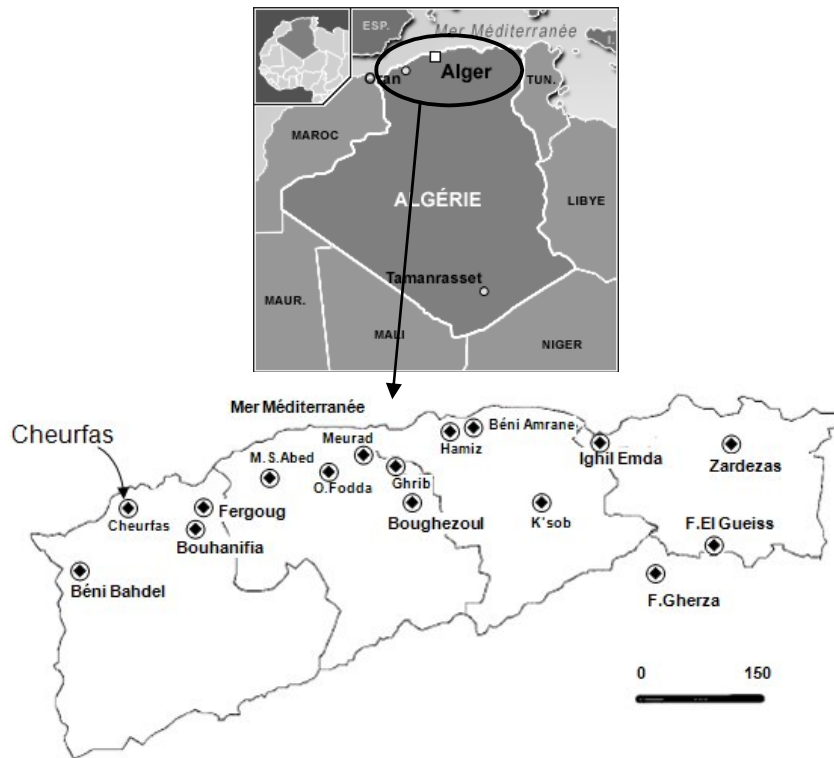


Figure 1. Localisation des 15 barrages les plus envasés en Algérie

Cependant les quantités de sédiments évacuées par les opérations de dragage et déposées à l'aval de l'ouvrage peuvent conduire à long terme à la pollution du milieu rural. Pour cela, la récupération et la réutilisation de ces sédiments devraient permettre à moyen terme sa valorisation dans le domaine du Génie Civil : Technique routière, fabrication de brique et coulis de comblement de réseaux.

Cet article étudie le traitement des sédiments de dragage en vue de les utiliser comme constituant dans les couches d'assise de structures routières. Après avoir procédé à la caractérisation physico-chimique des sédiments de dragage naturels, une évaluation de l'effet des sels et des matières organiques naturellement présents dans les sédiments sur leurs propriétés, est analysée. Le traitement proposé pour la valorisation en technique routière conformément aux recommandations du guide technique GTR (LCPC-SETRA, 2000), est basé sur des formulations de mélanges à différents pourcentages du sédiment dragué, de matériaux granulaires et de liants conformément au guide technique GTS (LCPC-SETRA, 2000). L'objectif étant d'arriver à proposer un matériau traité économiquement compétitif et facile à mettre en œuvre in situ.

2. Identification des sédiments du barrage Cheurfas

Le barrage de Cheurfas est situé au nord-ouest de l'Algérie à une quinzaine de kilomètres en amont de la ville de Sig dans la Wilaya de Mascara (Figure 2). Il a été mis en exploitation en 1992 et est destiné à l'irrigation des terres agricoles voisines ainsi qu'à l'alimentation en eau potable du périmètre de Sig. Ce barrage coupant l'oued El Mebtouh, est destiné à réguler 45 millions de m³ d'eau. L'ouvrage est construit sur les vestiges de l'ancien barrage emporté par une crue en 1927 (cité dans Labiod *et al.*, 2001). Son bassin fluvial principal présente une superficie totale estimée à 4190 km² avec une altitude maximale 1754 m et une altitude moyenne de 855 m. Des prélèvements en surface ont été effectués dans six points équidistants sur la zone du côté aval où le sédiment de dragage se trouve accumulé en quantités avoisinant les 600 000 m³. Une centaine de kg a été prélevée au niveau de chaque point. Les profondeurs de prélèvement varient de 10 cm à 1m.

Au laboratoire, un sédiment naturel homogénéisé, composé d'un mélange à parts égales des six points de prélèvement a été reconstitué. Il a servi de matériau de base aux essais de caractérisation physico-chimiques et dont les résultats sont présentés dans les tableaux 1 et 2.

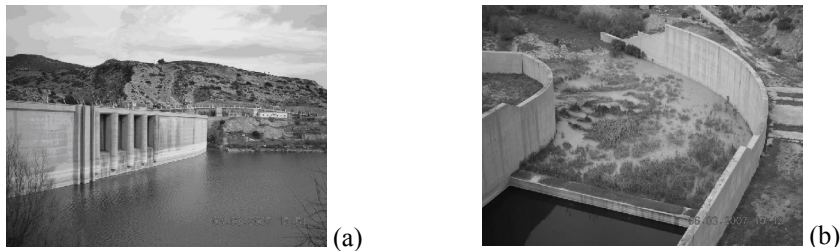


Figure.2. (a) Vue globale du barrage Cheurfas et (b) zone d'accumulation du sédiment de dragage sur le côté aval du barrage

	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)
Sédiment de Cheurfas	4	43	53

Tableau 1. Distribution granulométrique du sédiment de Cheurfas

Sédiment de Cheurfas	Paramètres physiques									
	w_n [%]	w_L [%]	w_P [%]	w_R [%]	I_p [%]	I_L [%]	I_c [%]	I_R [%]	γ_s [kN/m ³]	Ac
	96	62	36	9	26	2.31	-1.31	53	26.69	0.5
Sédiment de Cheurfas	Paramètres chimiques									
	VBS		S.S.T [m ² /g]		CaCO ₃ [%]		M.O [%]		PH	
	3.22		68		12.5		11		7.92	

Tableau 2. Paramètres physico-chimiques du sédiment de Cheurfas

Ces résultats montrent que la fraction fine inférieure à 63 μ m (argile et limon) est dominante et représente près de 96%, tandis que la présence des particules sableuses est minime. Le calcul des coefficients d'uniformité, ($C_u = d_{60}/d_{10} = 2.89 < 6$) et de courbure, ($C_c = d_{30}^2 / (d_{10} d_{60}) = 0.84 < 1$) montre une granulométrie serrée et un sédiment mal gradué. Selon la classification LPC-USCS (Magnan, 1998), ce matériau naturel est un sol organique très plastique Ot(OH). D'après le tableau 2, on constate une teneur en eau naturelle très élevée (w_n), mais qui demeure caractéristique d'un sédiment de dragage. Ce sédiment naturel est également caractérisé par une plasticité et un potentiel de gonflement élevés (Mouroux *et al.*, 1988). C'est une conséquence de sa finesse et de sa teneur élevée en matières organiques (11%). En effet, les limites de liquidité (w_L) et de plasticité (w_P) augmentent avec la quantité de matières organiques (MO) (Dubois, 2006).

Dans le cadre de la valorisation en technique routière, la classification des matériaux GTR selon la norme NF-P11-300 (LCPC-SETRA, 2000) permet de placer le matériau en classe F, classe correspondant aux matériaux naturels renfermant de la matière organique.

En s'appuyant sur les valeurs des données géotechniques ($D_{max} \leq 50$ mm et tamisât à 80 μ m > 35%), le matériau se repositionne en classe A, celle des sols fins. La sous-classe déterminée par les analyses granulométriques, la valeur au bleu (VBS) et les limites d'Atterberg (I_p) orientent ce matériau vers la classe A2 (Figure 3). À partir de ces analyses, l'utilisation de ce sédiment dans les structures routières demande un traitement préalable afin de répondre aux exigences demandées en termes de portance et de déformation.

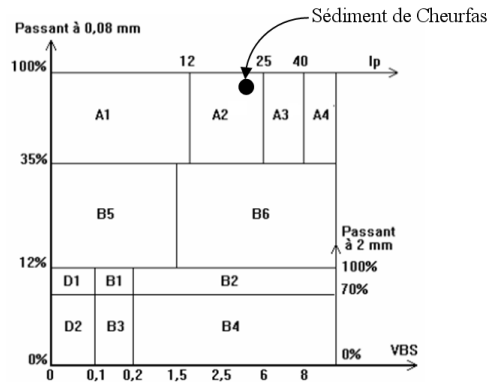


Figure 3. Classification du sédiment de Cheurfas selon la norme NF-P11-300 (LCPC-SETRA, 2000)

3. Rôle du sel et des matières organiques naturellement présents dans le sédiment

Les sédiments comportent dans leur constitution minéralogique interne du sel et des matières organiques. Afin d'évaluer l'influence de la présence de sels et de matières organiques sur les caractéristiques physico-chimiques du matériau, il est nécessaire de l'étudier en supprimant totalement ou en parties ces deux éléments.

Concernant les sels, leur élimination a été effectuée par lavages successifs du sédiment naturel trois (03) fois à l'eau claire après l'avoir laissé immergé durant 24 heures après chaque lavage (Dubois, 2006). Cette procédure n'a pas révélé de modification des propriétés des sédiments, vue que la teneur en sels n'était pas importante (% Na_2O = 0.18 %) (Tableaux 3 et 4). Concernant la teneur en M.O, des essais d'identification ont été effectués après traitement par calcination à 550°C pendant 6 heures. Les tableaux 3 et 4 résument les caractéristiques des sédiments avant et après traitement par calcination.

	Sable [%]	Limon [%]	Argile [%]
Sédiment naturel (SN)	4	43	53
Sédiment dessalé (SD)	7	74	19
Sédiment calciné (SC)	21	44	35
Sédiment dessalé calciné (SDC)	34	35	31

Tableau 3. Influence du dessalement et de la calcination sur la distribution granulométrique du sédiment.

	w _L [%]	w _P [%]	w _R [%]	I _p [%]	I _R [%]	VBS	S.S.T [m ² /g]	Ac
Sédiment naturel (SN)	62	36	9	26	53	3.22	68	0.5
Sédiment dessalé (SD)	65	42	8	23	57	2.24	47	1.2
Sédiment calciné (SC)	39	32	25	7	14	1.37	29	0.2
Sédiment dessalé calciné (SDC)	42	33	22	9	20	1.04	22	0.3

Tableau 4. Influence du dessalement et de la calcination sur les paramètres physico-chimiques du sédiment

L'analyse des résultats obtenus montre que la plasticité (I_p) diminue fortement après traitement par calcination et un décalage important est constaté dans la fraction granulométrique argileuse. On attribue cette différence de comportement à une détérioration du complexe argilo humique, et éventuellement des différences de densité et de composition structurale (moins de MO) causées par le traitement par calcination (Dubois, 2006 ; Abriak, 2007).

4. Traitement du sédiment en vue de sa valorisation en technique routière

La granulométrie et la teneur en matières organiques représentent les facteurs clés du choix de la valorisation des sédiments de dragage en technique routière. Après traitement, il est nécessaire d'obtenir un matériau qui remplit les conditions suivantes :

- Répondre aux normes de classification et de dimensionnement en vigueur GTR (LCPC-SETRA, 2000) ;
- Maintenir ses propriétés mécaniques et structurales dans le temps pour satisfaire les normes de durabilité ;
- Maîtriser les coûts de traitement et de la mise en œuvre in situ pour obtenir un matériau économiquement compétitif.

La méthodologie de traitement est constituée de deux étapes :

- Correction de la courbe granulométrique du sédiment naturel par ajout d'une fraction granulaire.
- Amélioration des caractéristiques mécaniques par traitement aux liants, en particulier la chaux et le ciment.

Le choix des dosages respectifs de ces différents composants va aussi permettre de diminuer la teneur en eau par les phénomènes d'hydratation et d'apport de matières sèches (Abriak, 2007 ; Sfar Felfoul *et al.*, 2003).

4.1. Ajout d'une fraction granulaire

L'ajout granulaire choisi est un sable (0/4) mm comportant 3 % d'éléments inférieurs à 80 μ m et 47 % de sable grossier. Il s'agit d'un sable propre bien gradué Sb (SW) selon la classification LPC-USCS (Magnan, 1998). Avec sa granulométrie étalée ($C_u = d_{60}/d_{10} = 10 > 6$), sa densité ($\gamma_{d_{OPM}}$) et sa portance (IPI_{OPM}) seront donc élevées par rapport au sédiment naturel (Tableau 5) et favorisera son utilisation en technique routière.

	w_{OPM} [%]	$\gamma_{d_{OPM}}$ [kN/m ³]	A_{OPM} [%]	IPI_{OPM}
Sédiment naturel	23.3	15.54	5.57	14
Sable d'ajout (0/4) mm	8.83	21.23	2.62	38

Tableau 5. Variation de l'Optimum Proctor Modifié pour le sédiment naturel de Cheurfas et le sable d'ajout 0/4 mm

La formulation retenue est un mélange constitué de 30% de sédiment naturel (SN) et de 70% de sable (Dubois, 2006). Les résultats d'essais de compactage-portance réalisés sur ce mélange sont représentés sur la Figure 4. On peut remarquer ce qui suit:

- Une diminution de la teneur en eau à l'OPM (w_{OPM}) clairement observée pour le mélange par rapport au sédiment naturel;
- Une augmentation moyenne de la densité à l'OPM ($\gamma_{d_{OPM}}$) du matériau de l'ordre de 26 % ;

Par ailleurs, on constate une baisse de l'indice portant immédiat (IPI) avec une baisse de la teneur en eau optimale (w_{OPM}) dans le cas du mélange par rapport au sédiment naturel. Ceci est probablement dû à l'emprisonnement de bulles d'air occluses générant une compressibilité réversible du fluide interstitiel, et donc apparition du phénomène dit de « matelassage ».

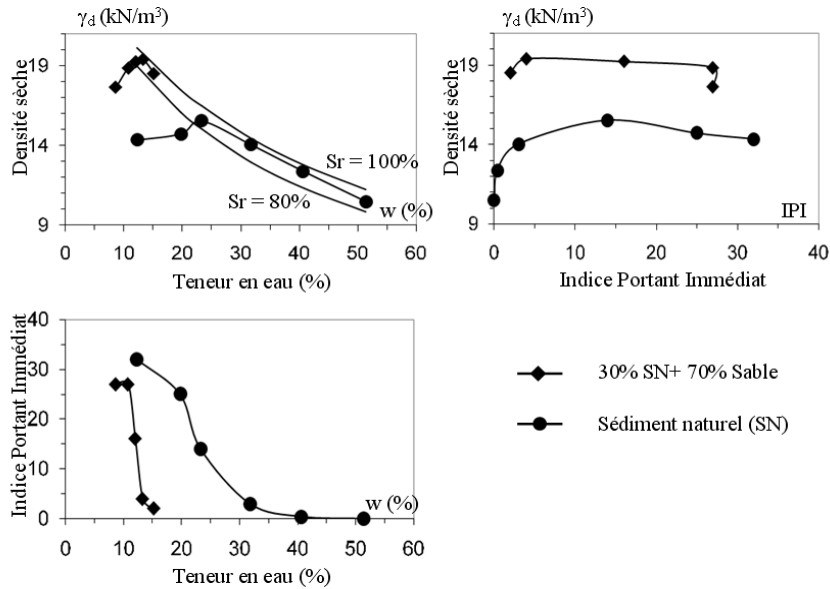


Figure 4. Variation de la compacité et la portance en fonction de la teneur en eau à l'OPM pour le sédiment traité au matériau granulaire

4.2. Ajout de liants hydrauliques

Pour améliorer les caractéristiques mécaniques du matériau traité, des ajouts de ciment ou de chaux ou une combinaison de ces deux liants ont été effectués. Le ciment utilisé est un ciment portland composé CPJ CEMII/A 42,5 et la chaux est une chaux vive 0/2mm.

Les formulations étudiées sont les suivantes :

- 30% de sédiment naturel (SN) + 70% sable ;
- 30% de sédiment naturel (SN) + 64% sable + 6% ciment ;
- 30% de sédiment naturel (SN) + 67% sable + 3% chaux ;
- 30% de sédiment naturel (SN) + 61% sable + 6% ciment + 3% chaux ;

Ces dosages sont inspirés de ce qui est habituellement utilisé en technique routière des couches d'assise pour le traitement des sols (GTS, 2000 ; Abriak, 2007). Les essais de compactage-portance effectués sur le sédiment traité aux liants hydrauliques sont représentés sur la figure 5. Les tableaux 6 et 7 regroupent les valeurs des caractéristiques géotechniques (granulométriques, physico chimiques et les valeurs à l'OPM) correspondant à chaque formulation.

Formulations de mélanges	30 % SN + 70 % Sable	30 % SN + 64 % Sable + 6 % Ciment	30 % SN + 67 % Sable + 3 % Chaux	30 % SN + 61 % Sable + 6 % Ciment + 3 % Chaux
γ_s [kN/m ³]	26.90	27.95	26.79	27.23
M.O [%]	4.45	4.56	3.55	3.25
w_L [%]	41	42	32	48
w_p [%]	21	33	23	40
w_R [%]	14	33	25	38
I_p [%]	20	9	9	8
I_R [%]	27	9	7	10
Ac	0.8	0.75	0.75	2.67
Cu	88	18	56	75
Cc	0.08	0.36	29	5.33

Tableau 6. Influence des liants hydrauliques sur les caractéristiques physico-chimiques des composants de formulations étudiées

N°	Formulations de mélanges	W_{OPM} [%]	$\gamma_{d_{OPM}}$ [kN/m ³]	A_{OPM} [%]	$I_{PI_{OPM}}$
1	30 % SN + 70 % sable	11.6	19.41	2.37	20
2	30 % SN + 64 % sable + 6 % ciment	13.28	18.83	5.25	30
3	30 % SN + 67 % sable + 3 % chaux	13.35	18.82	5.17	34
4	30 % SN + 61 % sable + 6 % ciment + 3 % chaux	13.94	18.91	3.60	28

Tableau 7. Influence des liants hydrauliques sur les valeurs de l'Optimum Proctor Modifié des formulations étudiées

L'analyse des résultats permet de faire les constatations suivantes :

– Les valeurs des coefficients d'uniformité (Cu) sont largement supérieures à la valeur référence de 6 (Magnan, 1998) satisfaisant la granulométrie étalée des mélanges. Par contre, les valeurs des coefficients de courbure (Cc) sont en deçà des valeurs recommandées ($1 < Cc < 3$). Les formulations de nos mélanges peuvent être considérées comme des sables car c'est leur fraction la plus importante. Cependant, la présence d'éléments fins est supérieure à 5%. Selon les résultats des analyses granulométriques et des limites de liquidité (w_L) et de plasticité (w_p), les mélanges de formulations obtenus sont classés dans la classification GTR selon la norme NF-P11-300 (LCPC-SETRA, 2000) en classe B5 pour les formulations 3 et 4 et en classe A1 et A2 pour les formulations 2 et 1 respectivement. Il est dit, alors, que « la proposition de fines et la faible plasticité des formulations en classe B rapprochent

beaucoup le comportement de ces sols de celui des sols A », c'est-à-dire « des sols qui changent brutalement de consistance pour de faibles variations de teneur en eau, en particulier lorsque la teneur en eau naturelle est proche de la teneur en eau de l'optimum Proctor » (Abriak, 2007).

– Une légère diminution de la densité sèche maximale (γ_{dOPM}) (variation de l'ordre de 3%) pour les trois formulations traitées avec les liants hydrauliques par rapport au traitement par ajout de matériau granulaire pulvérulent. Ces valeurs de densité restent très proches de 19 kN/m³, indiquant un niveau de compacité acceptable.

– La teneur en eau optimale (w_{OPM}) augmente en pourcentage d'environ deux points, lorsque le sédiment est traité aux liants. Cependant cette valeur reste relativement constante quelque soit la combinaison de liants ajoutés.

– Un léger aplatissement des courbes (w, γ_d) au voisinage de l'OPM est observé pour les matériaux traités avec du ciment, ce qui constitue une diminution de la sensibilité à l'eau.

– A titre indicatif, nous avons localisé sur la figure 5 les niveaux d'IPI requis pour l'utilisation de ces sédiments dans les assises de chaussées. On remarque que le sédiment traité aux liants hydrauliques présente une valeur à 95-98 % de l'OPM proche de 35 pour une utilisation comme couche de fondation et de 50 pour utilisation comme couche de base.

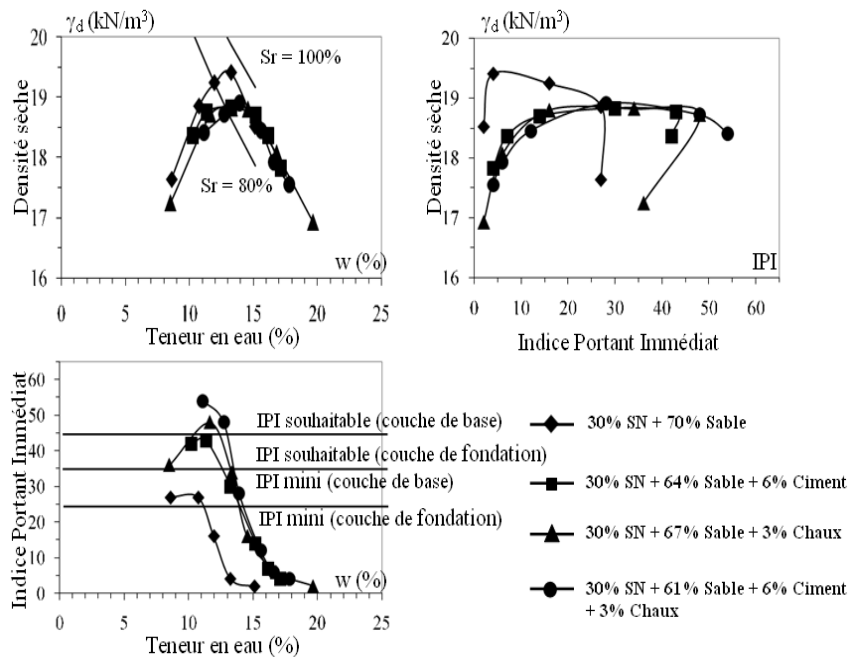


Figure 5. Variation de l'Optimum Proctor Modifié pour les formulations utilisant des liants hydrauliques.

5. Conclusion

La méthodologie générale de valorisation décrite dans cette étude a pour but l'utilisation des sédiments de dragage de barrages algériens dans une formulation de matériau routier.

La démarche de valorisation du sédiment de dragage de Cheurfas, s'appuie sur des choix de formulations simples, peu coûteuses et facilitant leurs mise en œuvre in situ.

Ce type de matériau est utilisé à des teneurs en eau variant de 10 à 25%. Or, la teneur en eau initiale du sédiment de Cheurfas dépasse 90% avec une teneur en matières organiques non négligeable (MO) (11%). Des traitements sont donc nécessaires.

Les essais d'identification réalisés sur des sédiments naturels et calcinés ont montré que la plasticité diminuait fortement après calcination, de même que le pourcentage de retrait gonflement et une diminution de la fraction granulométrique fine.

On attribue cette différence de comportement à une détérioration du complexe argilo humique, et éventuellement des différences de densité et de composition structurale (moins de MO) causées par la calcination.

L'ajout d'un matériau granulaire a montré une amélioration de la densité sèche (γ_{dOPM}) et une réduction de la teneur en eau optimale (w_{OPM}). La teneur en matières organiques (MO) n'influe pas sur la compacité du matériau, par contre elle agit défavorablement sur sa portance (IPI).

L'ajout de liants hydrauliques a permis de constater que leur influence agit en grande partie sur la portance du matériau qui se trouve nettement améliorée ($35 < IPI < 50$) pour une utilisation comme couche de fondation et de base. Du point de vu classification GTR, ces matériaux traités se situent selon la norme NF-P11-300 (LCPC-SETRA, 2000) en classe B5 pour les formulations 3 et 4 et en classe A1 et A2 pour les formulations 2 et 1 respectivement.

6. Bibliographie

- Abriak N., Améliorer la valorisation des déchets industriels en BTP, Guide Technique Régional Relatif à la méthodologie de gestion des sédiments de dragage portuaire, Démarche PREDIS Nord Pas de Calais, Groupe de travail n°5, Novembre 2007, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Douai.
- Dubois V., Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins-Valorisation en technique routière, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Douai, 2006.
- GTR., Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme, fascicules 1, principes généraux, 100p, 2000, LCPC-SETRA.

- GTS., Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques en remblai et en couche de forme, Guide technique, 240p, 2000, LCPC-SETRA.
- Hallouche W., Remini B., « Le dragage des retenues de barrages : quelques exemples algériens », *la houille blanche*, n°5, 2004, p. 95-100.
- Labioud Z., Benamra T., Benrahou H.K., Rabah M., « Auscultation des barrages en Algérie », *Séminaire National de Génie Civil SNGC'01*, Sidi Bel Abbès, 13-14 mai 2001, Algérie.
- Magnan J.P., Cours de mécanique des sols et des roches, Volume 1, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1998.
- Mouroux P., Margron P., Pinte J.C., La construction économique sur sols gonflants, Manuels et Méthodes, Rapport de recherche n°14, 1988, BRGM.
- Remini B., Envasement des retenues de barrages en Algérie : importance, mécanismes et moyen de lutte par la technique de soutirage, Thèse de doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 1997.
- Sfar Felfoul H., Rahali L., Mahmoudi M.A., Chedly S., « Traitement des sols à la chaux et au ciment en technique routière tunisienne : présentation d'un exemple », *Séminaire International de Géomatériaux*, M'sila, 10-11 mars 2003, Algérie, p. 55-66.