Aptitude au compactage et comportement mécanique de mélanges vase / limon.

Jean-Pierre Troalen

*Maître de Conférences, Laboratoire Environnement, Géomécanique, Ouvrages ;
Ecole Nationale Supérieure de Géologie, BP n°40, 54501 Vandœuvre Cédex.*

Résumé :

Dans le but d'une valorisation des vases issues du dragage, il a été abordé l'étude du comportement mécanique d'une vase d'estuaire (Seine) mélangée avec un limon quaternaire. Ces deux matériaux constituent, au sens propre, des déchets dont l'utilisation en remblais peut être envisagée, à la condition de réduire fortement la teneur en eau initiale des vases. La vase et le limon quaternaire riche en smectites, d'états initiaux très distincts mais de compositions minéralogique et granulométrique voisines, ont été mélangés puis compactés (microHarvard) pour différentes teneurs. Ces matériaux sont ensuite étudiés du point de vue de leur résistance en compression. Les résultats acquis montrent l'influence de la matière organique et de la granulométrie sur les propriétés du mélange.

Abstract :

We show the mechanical behaviour of recent sediments dredged (Seine) mixed with a quaternary silt. The current regulations allow the rejection of mud and vase in the sea and it is necessary to increase their development. The use of quaternary silt allows a change of the consistence of these dredged sediments by modifying their physical and mechanical properties. A part of the internal water of vases is absorbed by the montmorillonite of quaternary silt. The new physical state of the materials bring in an immediate gain to transportation and storage. This physical state allow their reinforcement by microHarvard densification. The mechanical properties of these mixed materials are studied by compression test. The influence of granularity and organic matter is showed.

1. Introduction

Si ce travail entre dans le cadre d'un projet destiné à valoriser les vases et boues issues du dragage, il est tout d'abord nécessaire de les stabiliser ou de les solidifier (Boutouil et al., 1997). Il faut abaisser leur teneur en eau initiale très élevée et, parallèlement, leur communiquer des propriétés telles qu'il soit alors possible de les transporter puis de les stocker avant leur traitement en vue d'une utilisation définie. Cet état de stabilisation ou de solidification doit en outre permettre d'éviter toute contamination liée aux polluants éventuellement contenus dans l'eau interstitielle.

L'idée initiale a consisté à envisager la stabilisation de vases de Seine issues de l'avant-port du Havre par l'intermédiaire d'un limon quaternaire et à étudier les propriétés mécaniques du mélange, en termes d'aptitude au compactage, de résistance en compression uniaxiale et d'évolution de la cohésion

non drainée. Le limon utilisé provient des environs de Nancy (Xeuilley, Meurthe et Moselle), mais celui-ci présente la composition minéralogique classique des limons quaternaires présents sur le bassin de la Seine (il faut en effet obligatoirement envisager l'opération de stabilisation ou de solidification des vases à proximité de leur lieu d'extraction). Ces limons sont généralement de bons sols agraires, mais ils représentent pour les exploitants de carrières une quantité importante de stérile au niveau de la découverte et il doit en être également envisagé la valorisation comme pour tout autre déchet. L'étude réalisée porte donc, après la caractérisation physico-chimique des matériaux utilisés, sur les propriétés mécaniques de différents mélanges vase / limon. Le limon agit ici comme produit de renforcement des vases : abaissement de la teneur en eau, croissance de la cohésion non drainée et acquisition de propriétés physiques et mécaniques permettant leur transport, leur stockage ou une mise en remblais.

Comme nous le montrerons, les différences essentielles observées dans le comportement mécanique des mélanges ont principalement pour origine la granulométrie et la présence de matières organiques, même si les constituants minéralogiques des deux matériaux sont analogues mais éloignés en pourcents.

2. Identification et caractérisation physique

Cette phase est un préambule obligatoire à tout traitement de vases ou de boues, que ce soit en vue de leur dépollution (Marot, 1997) ou de l'étude de leur comportement (Troalen, 1996, 1997).

La vase de Seine et le limon de Xeuilley ont été analysés par diffractométrie aux rayons x sur la fraction minérale (matières organiques détruites). Les résultats sont présentés sur le tableau 1.

<u>vase de Seine (avant-port du Havre)</u>		<u>limon de Xeuilley (54)</u>	
quartz	35 %	quartz	60 %
feldspaths	3 %	feldspaths	11 %
calcite	25 %	calcite	2 %
pyrite	1 %	micas	3 %
smectites	20 %	smectites	20 %
kaolinite	9 %	kaolinite	4 %
illite	7 %		

Tableau 1 : Analyse minéralogique par diffractométrie aux rayons x.

La première remarque concerne la composition de la phase argileuse. Une analyse fine des diagrammes de diffraction permet de dire que l'essentiel de la fraction smectites correspond à de la montmorillonite dans le cas du limon, mais qu'il s'agit de minéraux interstratifiés de type illite-montmorillonite dans le cas de la vase. La vase se distingue également par un pourcentage en minéraux argileux (au sens strict du terme) plus élevé (36 %) que le limon (24 %). Les autres différences majeures dans la composition minéralogique apparaissent nettement dans les pourcentages de quartz (60 % pour le limon, 35 % pour la vase), de calcite et de feldspaths. La fraction minéralogique "grossière", par opposition à la

fraction "fine" purement argileuse, est donc plus importante dans le cas du limon (+ 12 %), ce qui se traduira clairement sur les courbes d'analyse dimensionnelle.

Parallèlement l'activité de la fraction argileuse a été mesurée globalement par la valeur au bleu de méthylène (VBS) par l'essai dit "à la tâche" (NF P.94-068). Les résultats obtenus sont :

<u>vase de Seine (avant-port du Havre)</u>		<u>limon de Xeuilley (54)</u>	
VBS	3,82 à 3,87	VBS	5,06 à 5,40

Ces valeurs de bleu infirment l'appartenance à la classe A des sols fins (LCPC, 1992) de ces deux matériaux, et plus exactement à la sous-classe A₂ (sables fins argileux, limons argileux et marnes peu plastiques) définie par une valeur $2,5 < \text{VBS} < 6$, et une valeur de l'indice de plasticité $12 < I_p \% < 25$.

La mesure du pourcentage en carbonate (CaCO_3) a été réalisée à l'aide du calcimètre Bernard selon la procédure classique. Ce test a servi de mesure de contrôle lors de la réalisation des mélanges vase / limon et l'ensemble des résultats confirme, compte-tenu de l'incertitude liée à la méthode utilisée, ceux donnés par l'analyse minéralogique.

<u>vase de Seine (avant-port du Havre)</u>		<u>limon de Xeuilley (54)</u>	
	$29,2 < \text{CaCO}_3 \% < 31,4$		$1,35 < \text{CaCO}_3 \% < 2,1$

L'analyse granulométrique a été réalisée par la méthode de sédimentation (NF P.94-057) sur la fraction inférieure à $2 \mu\text{m}$, et par tamisage sous eau pour la fraction supérieure (NF P.18-560). Les résultats sont présentés sur la figure 1.

L'observation de ces deux distributions dimensionnelles montre un réel parallélisme entre les deux courbes (figure 1). La principale différence entre la vase de Seine et le limon de Xeuilley tient dans les valeurs des pourcentages cumulés relatifs aux classes dimensionnelles considérées. Ce constat peut être relié avec les résultats de l'analyse minéralogique, même si dans le cas des minéraux argileux, il ne peut s'agir ici que d'argiles G au sens granulométrique du terme (Lucas, Cros et Lang, 1976). Signalons toutefois que si le limon ne contient pas de matière organique, la vase de Seine elle en contient environ 2 à 3 %. Ce pourcentage de matière organique est suffisant pour lier une fraction des minéraux argileux et ainsi produire des agrégats de dimensions plus élevées.

Les teneurs en eau naturelles mesurées selon la norme NF P.94-050, étaient, en moyenne, de 150 % pour les vases de Seine et de 23% pour le limon de Xeuilley.

La moyenne des poids volumiques des grains solides mesurés (NF P.94-054) sur la vase était de $25,4 \text{ kN/m}^3$ et de $26,5 \text{ kN/m}^3$ pour le limon. Ces valeurs sont également en accord avec les résultats de l'analyse minéralogique, en particulier pour le limon (60% de quartz).

Les limites d'Atterberg mesurées selon la norme NF P.94-051 donnent les résultats suivants et confirment l'appartenance aux sols fins (sous-classe A₂) avec un indice de plasticité tel que $12 < I_p \% < 25$.

vase de Seine	limite de liquidité : $62,3 \% < w_l < 65,1 \%$ limite de plasticité : $41,9 \% < w_p < 46,4 \%$ indice de plasticité : $18,7 \% < I_p < 20,4 \%$
limon de Xeuilley	limite de liquidité : $50,1 \% < w_l < 53,1 \%$ limite de plasticité : $33,0 \% < w_p < 33,9 \%$ indice de plasticité : $17,1 \% < I_p < 19,2 \%$

Les valeurs les plus élevées pour les limites d'Atterberg de la vase correspondent aux échantillons préparés et séchés à 50°C, les valeurs inférieures celles des échantillons préparés et séchés classiquement à 105°C. Cette différence aurait été plus nette avec l'élimination totale de la matière organique(> 2,4%) avec un séchage à 400°C, mais comme pour l'analyse dimensionnelle, les différences entre les valeurs des paramètres mesurés apparaissent comme significatives.

Figure 1 : Courbes granulométriques de la vase de Seine et du limon de Xeuilley.

3. Comportement mécanique de mélanges vase / limon

Il s'agit tout d'abord d'abaisser de façon significative la teneur en eau naturelle des vases. En effet, celle-ci étant initialement très élevée ($w =$ ou $> 150\%$), les propriétés mécaniques qui en découlent sont très faibles (cohésion < 1

kPa). L'ajout de limon à l'état naturel ($w < 25 \%$), mais simplement tamisé préalablement à 2 mm, permet, lors de son mélange avec la vase, d'accroître rapidement la valeur de la cohésion de la vase en abaissant leur teneur en eau. D'une part, la différence entre les teneurs en eau naturelles va jouer, mais d'autre part le pourcentage important en smectites (essentiellement de la montmorillonite, 20 %) contenu dans le limon va accentuer le processus de "séchage" de la vase par absorption d'une partie de l'eau interstitielle.

3.1. Evolution de la cohésion non drainée du mélange vase / limon

A la vase de Seine à teneur en eau naturelle, il a été ajouté, puis mélangé successivement différents pourcentages de limon (% par rapport à la masse initiale de vase). Les mesures de cohésion sont ensuite réalisées à l'aide d'un scissomètre de laboratoire, selon la norme NF P.94-012. La teneur en eau naturelle initiale de la vase était de 151 % et sa cohésion intacte non drainée était inférieure à 0,1 kPa. En raison du caractère thixotropique des vases, nous considérons l'échantillon prélevé, arrivé au laboratoire, comme étant retourné à l'état intact. De ce fait, la première valeur de cohésion mesurée correspondra à la cohésion intacte non drainée et la seconde à la cohésion résiduelle. La troisième mesure de cohésion "cohésion remaniée" est effectuée après la mesure de la cohésion résiduelle, sur le même échantillon mais après son "remaniement". Ainsi les valeurs de la cohésion intacte, de la cohésion résiduelle et de la cohésion remaniée pour les différents mélanges sont données sur la figure 2.

La valeur de la teneur en eau est en constante diminution et passe de 151 % à 63 % pour 50 % d'ajout de limon. Parallèlement, la valeur de la cohésion intacte passe de 0,13 kPa à 2,72 kPa. Il semble que la valeur de la cohésion intacte se stabilise et n'évolue pratiquement plus pour des ajouts supérieurs à 50 % de limon. De 1 à 3 % d'ajout, les mesures sont délicates (cohésions très faibles).

Cependant, si nous observons l'évolution de la valeur de la cohésion en fonction du temps pour les différents mélanges vase / limon (figure 3), nous remarquons que les valeurs de la cohésion intacte et de la cohésion remaniée n'évoluent plus après 60 minutes, mais que celles-ci sont largement supérieures aux valeurs des cohésions "instantanées". Pour le mélange à 50 %, par exemple, la cohésion est passée de 2,7 kPa (figure 2) à plus de 8 kPa (figure 3). La réaction de stabilisation s'est donc poursuivie et nous pouvons penser que ce processus est à attribuer à l'influence des smectites présentes dans le limon, jusqu'à ce que leur réseau soit entièrement saturé par l'eau interstitielle et diminuant d'autant la teneur en eau du mélange. A ce propos, il serait intéressant de pouvoir observer l'évolution de la structure du mélange et surtout l'état des agrégats argileux au sein de cette structure.

3.2. Aptitude au compactage des mélanges vase / limon

Les valeurs de cohésion obtenues par le simple mélange des vase et limon, même après leur stabilisation dans le temps, sont encore trop faibles et ces mélanges présentent, de fait, des propriétés mécaniques difficilement utilisables.

Nous avons donc étudié la possibilité d'un compactage, ce qui nécessite en préalable une réduction très sensible de la teneur en eau initiale de la vase. Nous avons donc opéré cette fois sur des matériaux préalablement séchés et tamisés.

Deux températures de séchage (50°C et 105°C) et deux passants (400 μm et 80 μm) ont été retenus dans le même but que lors de l'identification des matériaux.

Figure 2 : Evolution de la cohésion des mélanges vase / limon.

Figure 3 : Evolution de la cohésion en fonction du temps pour le mélange vase + 50% limon.

Pour des raisons essentiellement pratiques (volume des échantillons et préparation des mélanges), les essais de compactage ont été réalisés à l'aide de l'appareillage micro Harvard. Le principe de l'essai Harvard (*dans* Elsbury et al., 1988) est identique dans ses grands traits à celui de l'essai Proctor, mais dans le cas de l'essai Harvard, il s'agit d'un compactage par pétrissage. L'appareillage permet la réalisation d'éprouvettes de 7,16 cm de hauteur et 3,3 cm de diamètre.

Ces éprouvettes seront ensuite directement testées en compression monoaxiale.

Nous ne présenterons ici que les résultats de l'essai micro Harvard correspondant à un mélange vase / 10 % limon (tableau 2), préparé selon deux températures de séchage et deux granulométries. Les autres résultats seront commentés lors des mesures de résistance à la rupture en compression monoaxiale (§ 3.3.).

Il apparaît de manière évidente et immédiate que les paramètres optimaux sont ceux obtenus avec les échantillons préparés avec la plus fine granulométrie. Pour un même intervalle de teneurs en eau ($24 < w \% < 34$), l'arrangement des constituants solides est dans ce cas plus dense et le volume total des vides plus réduit.

granulométrie	80 μm	400 μm
teneur en eau optimale	26,9 %	28,2 %
densité sèche maximale	14,4 kN/m^3	14,1 kN/m^3
indice des vides	0,359	0,367
porosité	25 %	26 %

Tableau 2 : Paramètres physiques du mélange vase / 10 % limon (température de séchage 105°C) après essai micro Harvard.

Toutefois, si cet essai met en évidence l'influence de la granulométrie sur l'aptitude au compactage du mélange vase / limon, les faibles différences entre les valeurs des différents paramètres physiques ne justifieraient pas la réalisation préalable d'une séparation en classes granulométriques des lots de vases draguées, même si les valeurs des résistances en compression monoaxiale sont elles-mêmes largement dépendantes de la granulométrie du mélange.

3.3. Résistance en compression monoaxiale des mélanges vase / limon

La valeur de la résistance maximale à la rupture en compression monoaxiale a été mesurée à l'aide d'une presse de compression 1000 kN asservie et pilotée par ordinateur. Les essais ont été directement réalisés sur les éprouvettes issues du micro-Harvard (hauteur 7,16 cm, diamètre 3,3 cm). Les résultats sont reportés sur le tableau 3.

Les résultats présentés ne concernent que les mélanges vase + 10 % limon, préparés selon deux granulométries (400 μm et 80 μm) et deux températures de séchage initial (50°C et 105°C).

Le pourcentage de matières organiques dans la vase pure a été estimé à plus de 2,4 %. Les mélanges ont été ensuite compactés à trois teneurs en eau distinctes (10, 20 et 30 %). Ceci dans le but d'étudier simultanément l'influence de la teneur en eau et de la granulométrie sur la résistance en compression du mélange compacté. Le choix du mélange vase + 10 % limon est arbitraire ; le 10 % d'ajout est estimé comme étant une limite maximale économiquement raisonnable pour un traitement de matériaux dragués.

L'analyse des résultats du tableau 3 met en évidence l'influence de plusieurs paramètres sur la valeur de la résistance à la rupture. La valeur de R_c diminue systématiquement lorsque la teneur en eau du mélange augmente. La valeur de R_c est toujours plus élevée, pour une même teneur en eau (10 %), dans le cas des éprouvettes présentant la granulométrie la plus fine (80 μm). De plus,

l'élimination, même partielle (séchage préalable à 105°C), de la matière organique initialement contenue dans les vases (2,4 %), entraîne un accroissement de la valeur à la rupture de la résistance en compression.

		w (%)	Rc (kPa)	ϵ (%)	E (kPa)
Vase + 10% limon	400 μ m (50°C)	10	275	3,5	100
		20	230	5,6	71,4
		30	130	13,2	13,5
Vase + 10% limon	80 μ m (50°C)	10	330	2,4	250
		20	320	3,5	125
		30	275	4,5	111
		w (%)	Rc (kPa)	ϵ (%)	E (kPa)
Vase + 10% limon	400 μ m (105°C)	10	345	2,1	250
		20	310	3,2	183
		30	250	6,2	71,4
Vase + 10% limon	80 μ m (105°C)	10	370	2,6	250
		20	340	4,4	125
		30	230	11,5	25

Tableau 3 : Evolution de la résistance en compression monoaxiale. Influence de la granulométrie et du mode de préparation des éprouvettes.

(w = teneur en eau ; Rc = valeur de la résistance en compression monoaxiale à la rupture ; ϵ = valeur de la déformation à la rupture ; E = module de Young).

Les résultats présentés ne concernent que les mélanges vase + 10 % limon, préparés selon deux granulométries (400 μ m et 80 μ m) et deux températures de séchage initial (50°C et 105°C).

Le pourcentage de matières organiques dans la vase pure a été estimé à plus de 2,4 %. Les mélanges ont été ensuite compactés à trois teneurs en eau distinctes (10, 20 et 30 %). Ceci dans le but d'étudier simultanément l'influence de la teneur en eau et de la granulométrie sur la résistance en compression du mélange compacté. Le choix du mélange vase + 10 % limon est arbitraire ; le 10 % d'ajout est estimé comme étant une limite maximale économiquement raisonnable pour un traitement de matériaux dragués.

L'analyse des résultats du tableau 3 met en évidence l'influence de plusieurs paramètres sur la valeur de la résistance à la rupture. La valeur de Rc diminue systématiquement lorsque la teneur en eau du mélange augmente. La valeur de Rc est toujours plus élevée, pour une même teneur en eau (10 %), dans le cas des éprouvettes présentant la granulométrie la plus fine (80 μ m). De plus, l'élimination, même partielle (séchage préalable à 105°C), de la matière organique initialement contenue dans les vases (2,4 %), entraîne un accroissement de la valeur à la rupture de la résistance en compression.

4. Discussion

L'influence des paramètres de teneur en eau et matières organiques, tout comme ceux relatifs à la granulométrie sont donc mis en évidence par les mesures de cohésion, de compactage et de résistance en compression. Ces influences ont été également démontrées sur des essais "inverses" (ajout de vase à un limon) sur les mêmes matériaux, R_c passant de 480 kPa (limon pur) à 450 kPa (limon + 25 % vase) (Delonca et Masson, 1997). Dans le cas présent, comme pour tous les autres mélanges réalisés (Diagana, 1997), les densités maximales obtenues par l'essai Harvard, comme les valeurs maximales de la résistance en compression simple, sont obtenues pour les mélanges de granulométrie inférieure à 80 μm et dont les matières organiques avaient été partiellement détruites.

Figure 4 : Histogramme des classes dimensionnelles des mélanges vase + limon.

La modification de la composition granulométrique de la vase de Seine par l'ajout d'un pourcentage donné de limon a été montrée par les analyses par sédimentation des différents mélanges (figure 4). L'observation de ces histogrammes montre que l'ajout de limon se traduit systématiquement par un enrichissement des fractions granulométriques les plus grossières (sable fin et limon) aux dépens de la fraction fine (argile). Il y a modification de la répartition dimensionnelle de l'ensemble des constituants solides aboutissant à des matériaux intermédiaires et différents de ceux identifiés initialement (figure 1). Si les valeurs de résistance en compression obtenues sur les mélanges compactés montrent que la mise en dépôt ou remblais à végétaliser de tels mélanges est possible avec des caractéristiques largement suffisantes pour permettre un léger transit, il serait cependant souhaitable de réaliser ces ouvrages en vraie grandeur sur un site expérimental.

Bibliographie sommaire

Boutouil M. et al. (1997), "Devenir des vases et boues de dragage :

solidification et stabilisation", Symposium AIGI, "Athènes 1997", Balkema Ed., pp.1635-42.

Delonca L., Masson L. (1997), "Etude de la stabilisation de vases par un limon", rapport Projet 2ème année, INPL-ENSG Nancy, 45 p..

Diagana B. H. (1997), "Solidification de la vase de Seine par ajout de limon", mémoire DEA PAE3S, 25/09/97, INPL-ENSG Nancy, 80 p.

Elsbury B. E. et al. (1988), "Field and laboratory testing of compacted soil liner", U.S. EPA, Cincinnati, pp.240-256.

Lucas G., Cros P. et Lang J. (1976), "Les roches sédimentaires", volume 2 : Etude microscopique des roches meubles et consolidées, Doin Ed., Paris.

Marot F. (1997), "Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques", Thèse de l'Université du Havre, 12/11/97, 330 p.

Troalen J.P. et al. (1996), "Traitement des vases de l'estuaire de la Seine", Revue Française de Géotechnique n°77, pp.31-36.

Troalen J.P. et al. (1997), "Caractérisation et traitement de vases d'estuaire", Symposium AIGI, "Athènes 1997", Balkema Ed., pp.1403-407.