

# Traitement de vases de l'estuaire de la Seine

**J.-P. TROALEN**

*Maître de conférences  
à l'INPL, Laboratoire  
de Géomécanique,  
École Nationale Supérieure  
de Géologie, BP 40,  
54501 Vandœuvre-lès-Nancy  
Cedex*

**C. DURON**

**C. HAGNÉRE**

*Élèves-ingénieurs ENSG*

## Résumé

Les sédiments récents et actuels annuellement dragués dans les ports et les estuaires représentent des volumes considérables. Ces boues et ces vases font aujourd'hui l'objet d'un rejet en mer, mais cette procédure est condamnée à court terme. Il est donc nécessaire de réfléchir rapidement à leur nouveau devenir. L'utilisation d'un polymère actif ou d'un ciment CPJ permet de rendre ces boues et ces vases draguées plus cohérentes, en modifiant de manière irréversible leur structure ainsi que leurs propriétés physiques et mécaniques. Le nouvel état physique de ces matériaux apporte un gain immédiat quant aux procédures de transport et de stockage, préalablement à un traitement ou à une utilisation éventuelle.

## Mud and vase of the Seine's estuary treatment

## Abstract

Recent and current sediments dredged up annually from ports and estuaries represent considerable volume. The current regulations allow the rejection of mud and vase in the sea. This procedure will be forbidden in the near future. Therefore, it is necessary to consider a solution of this problem. The use of active polymer or CPJ cement allows an irreversible change of the consistence of these dredged sediments by modifying their structure and their physical and mechanical properties. The new physical state of these materials brings in an immediate gain to transportation and storage, before the treatment or eventual use of these modified sediments.

## Introduction

Modifier l'état physique des vases issues du dragage avant tout stockage, tout transport terrestre ou fluvial, apparaît comme la première des nécessités en raison de leur caractère thixotropique (Mignot, 1989). Ces vases apparaissent comme des complexes sol-eau essentiellement variables dans le temps et possédant des propriétés très différentes de celles de leurs constituants élémentaires, particulièrement en raison de la présence de matières organiques (Lucas, Cros et Lang, 1976). Nous avons donc axé notre intervention sur les paramètres nécessaires à la compréhension du processus de modification des structures et des propriétés surfaciques des vases. En première approche, nous avons utilisé deux types de traitement : du ciment CPJ 45 (NF P 15-301) et un polymère actif (GII). L'application de ces traitements demande beaucoup de précautions et des connaissances élémentaires préalables. Ce travail est associé à celui de Bennabi et Levacher (1996) et conjointement avec Marot et Conil (1996), il entre dans le cadre de l'élaboration d'un programme commun de recherches.

## Caractérisation des vases

Les différents essais ont été réalisés sur des carottes de vases de Seine provenant de l'avant-port du Havre et prélevées directement par fonçage de tubes PVC. Cette opération de prélèvement a été effectuée par le LMF-GC de l'université du Havre. A l'ouverture des carottes, il était possible de noter macroscopiquement, une zone bioturbée de 0 à 40 cm de profondeur correspondant à une vase de couleur claire, puis une vase noire sur le reste de la longueur.

### Identification physique et chimique

Selon la norme NF P 94-050, les résultats obtenus sur l'ensemble des échantillons montrent que les valeurs moyennes des teneurs en eau pondérale permettent de distinguer quantitativement les deux domaines de vases observés à l'ouverture :

$$1H: 93,4\% < w\% < 133,2\%$$

$$2H: 140,2\% < w\% < 168,3\%$$

Cette variabilité entre les valeurs de la teneur en eau peut sans doute être expliquée par les hypothèses de différences d'état physique initial, de granulométrie et de composition minéralogique, qu'il conviendra de vérifier.

Selon la norme NF P 18-558, le poids volumique absolu est défini comme étant le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de sa matière tous vides déduits. La variabilité des valeurs moyennes du poids volumique absolu entre les deux domaines de vases apparaît encore nettement :

$$1H: \gamma_s = 25,3 \text{ kN/m}^3 \quad 2H: \gamma_s = 21,4 \text{ kN/m}^3$$

Par la méthode dite de l'essai « à la tâche » (NF P 94-068), les résultats montrent une différence assez peu significative entre les valeurs au bleu moyennes obtenues sur les deux domaines de vases :

$$1H: VB = 2,39 \quad 2H: VB = 2,45$$

Par la méthode du calcimètre Bernard, les valeurs des pourcentages en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) obtenues sur les deux domaines de vases présentent, cette fois encore, une faible variabilité :

$$1H: 30,20 < \text{CaCO}_3\% < 32,08$$

$$2H: 29,89 < \text{CaCO}_3\% < 30,09$$

En raison de la faible variabilité des valeurs au bleu et du pourcentage en carbonate de calcium, il n'a pas été tenu compte pour la suite des essais de la distinction entre les deux domaines de vases observés. En ce sens, nous rejoignons le cas d'un matériau dragué et « homogénéisé » par cette opération.

Selon la norme NF P 94-051 (limites d'Atterberg) et sur la totalité des échantillons des deux domaines de vases, la valeur moyenne de la limite de liquidité est de 79,6 % et celle de la limite de plasticité est égale à 44,1 %. L'indice de plasticité moyen est de 35,5 %. En prenant une valeur moyenne de 107,7 % pour la teneur en eau naturelle (initiale), l'indice de consistance est alors égal à -0,79 et, dans le diagramme de plasticité de Casagrande, ces vases apparaissent comme des limons très plastiques.

La composition minéralogique des vases a été obtenue par diffractométrie des rayons X et donne, pour les cinq principaux éléments minéraux (63 % de l'échantillon total), la répartition suivante :

$$\begin{array}{lll} \text{quartz} : 33\% & \text{calcite} : 25\% & \text{feldspaths} : 3\% \\ \text{dolomie} : 2\% & & \text{pyrite} : 1\% \end{array}$$

L'analyse spécifique de la fraction dimensionnelle inférieure à 2  $\mu\text{m}$  (37 %) fait apparaître la composition suivante en minéraux argileux s.s. :

$$\text{montmorillonite} : 20\%$$

$$\text{kaolinite} : 10\%$$

$$\text{illite} : 7\%$$

### Analyses dimensionnelles

Pour des raisons intéressant le développement ultérieur de notre recherche, nous avons réalisé l'analyse dimensionnelle des vases selon trois méthodes de mesure distinctes et dont les principes diffèrent totalement. Signalons ici que la quasi-totalité des échantillons possédait des dimensions inférieures à 80  $\mu\text{m}$  et qu'il était possible, dans ce cas, de négliger la fraction supérieure à 80  $\mu\text{m}$ .

#### Sédimentométrie

Selon la norme NF P 94-057, cette méthode classique est basée sur la loi de Stokes et utilise un densimètre. En considérant la fraction inférieure à 2  $\mu\text{m}$  comme celle correspondant au pourcentage en « argiles G » (G au sens granulométrique : Lucas, Cros et Lang, 1976), nous obtenons une valeur en argiles G comprise entre 26 % et 22 % pour l'ensemble des échantillons testés.

#### Sédigraph 5000

Cet appareil mesure par l'intermédiaire d'un faisceau de rayons X la concentration des particules qui

## Caractérisation mécanique et traitement

restent en suspension à une hauteur de sédimentation diminuant en fonction du temps. La vitesse de sédimentation suit comme précédemment la loi de Stokes. Les courbes de sédimentation, obtenues sur l'ensemble des échantillons de vases, donnent pour la fraction inférieure à 2 µm, une valeur du pourcentage en argiles G comprise entre 30 % et 21 %. C'est-à-dire un intervalle de valeurs proche de celui obtenu par sédimentométrie.

### 2.2.3

#### Malvern Mastersizer

Cet appareil utilise les propriétés de diffraction de la lumière (faisceau laser) par les particules solides en suspension dans un fluide. L'angle de diffraction de la lumière est alors inversement proportionnel à la taille des particules. Sur l'ensemble des échantillons de vases testés, le pourcentage de la fraction inférieure à 2 µm reste très proche de 10 %, ce qui pose nettement le problème de corrélation avec les deux méthodes d'analyse dimensionnelle précédentes.

### 2.2.4

#### Commentaires sur l'analyse dimensionnelle

Les trois méthodes utilisées, bien qu'elles considèrent chacune une forme sphérique pour les particules constituantes, ne sont pas basées sur les mêmes lois et donneront des résultats d'autant plus justes que le matériau étudié contiendra des particules de forme sphérique, ce qui semble *a priori* ne pas être le cas des sédiments très fins que sont les vases de Seine et les vases en général (Troalen, 1994).

De plus, ces trois méthodes s'appliquent à des domaines d'analyse différents (> 1 µm pour la sédimentométrie; de 0,1 à 100 µm pour la Sédigraph 5000; de 0,1 à 600 µm pour le Malvern Mastersizer), et la quantité de matériau utilisée pour l'analyse est elle-même variable (80 g pour la sédimentométrie, 4 g pour le Sédigraph et 1 g pour le Malvern Mastersizer). Ce qui va poser d'entrée le problème de la représentativité de l'échantillon à analyser.

Cette comparaison entre méthodes doit faire l'objet d'une étude bien plus approfondie, surtout si nous voulons comparer ces résultats à ceux donnés par l'analyse minéralogique. Cependant, il est possible d'utiliser comme paramètres indicateurs les « diamètres équivalents » (dimensions des particules correspondant aux pourcentages cumulés de 10, 50 et 90 %); c'est ce qui a été réalisé et présenté sur le tableau I :

**TABEAU I** Dimensions des particules exprimées en diamètres équivalents (µm) selon trois méthodes distinctes d'analyse dimensionnelle.

Particle sizes expressed in terms of equivalent diameter according to different dimensional analysis methods.

Méthode	$d_{10}$ (µm)	$d_{50}$ (µm)	$d_{90}$ (µm)
Sédimentométrie	0,2	5	40
Sédigraph	0,9	13	26
Malvern	2,9	15	47

**TABEAU II** Valeurs de la cohésion sur les vases intacts.  
Cohesion values of intact vases.

1H (cohésion, kPa)	2H (cohésion, kPa)
$2,05 < C_{int} < 6,05$	$1,64 < C_{int} > 2,77$
$1,44 < C_{rés} < 1,74$	$0,41 < C_{rés} < 1,85$
$0,61 < C_{rem} < 1,33$	$0,21 < C_{rem} < 1,03$

Les valeurs qui figurent sur le tableau III, concernent les mesures de cohésion réalisées sur les deux mêmes domaines de vases, mais après remaniement et homogénéisation de l'ensemble des matériaux correspondants. Nous nous plaçons ici dans le cas d'un mélange analogue à celui issu d'un dragage. Cette analogie est possible en raison des teneurs en eau initiales élevées.

**TABEAU III** Valeurs de la cohésion sur les vases remaniés.  
Cohesion values of remodelled vases.

1H (cohésion, kPa)	2H (cohésion, kPa)
$0,72 < C_{int} < 1,23$	$0,82 < C_{int} > 1,23$
$0,51 < C_{rés} < 1,03$	$0,72 < C_{rés} < 1,13$

### Traitement au ciment CPJ 45

Le ciment utilisé pour le mélange est un ciment de type CPJ45 (NF P 15-301) à faible chaleur d'hydratation initiale et composé par : 72 % de clinker, 11 % de cendres, 11 % de laitier et 6 % de filler calcaire.

Le mélange vase-ciment a été réalisé selon les pourcentages de 1, 2 et 3 % par rapport à la masse initiale humide de vase. Pour l'ensemble des échantillons traités, la valeur de la teneur en eau finale est nettement inférieure à celle de la teneur en eau initiale. La valeur au bleu diminue en fonction de l'élévation du pourcentage de ciment et correspond à une diminution de la surface spécifique accessible : genèse d'agrégats au sein de la vase et structure de moins en moins lâche. Ce comportement est validé par les valeurs de la porosité et de l'indice des vides qui diminuent ainsi que par la légère augmentation de la masse volumique absolue (tableau IV). La valeur de la cohésion intacte augmente en fonction du temps mais se stabilise assez vite, mais il est nécessaire d'atteindre 3 % de ciment pour que cet accroissement soit significatif d'une amélioration réelle des propriétés mécaniques. L'évolution de la cohésion en fonction du temps de prise montre que celle-ci croît très rapidement dans le cas du mélange à 3 % de ciment et la stabilisation est atteinte au bout de 5 à 6 minutes (Fig. 1).

La valeur de la cohésion intacte passe ainsi de 0,8 kPa (témoin) à près de 1,5 kPa (3 %); les teneurs en eau passent, parallèlement, de 143 % (initiale) à 131 % (finale). La valeur de stabilisation de la cohésion peut être interprétée comme le seuil optimal d'un mélange donné, c'est-à-dire qu'elle représente le rapport optimal entre la quantité de ciment ajoutée et la quantité d'eau disponible dans le matériau. Ce rapport est naturellement influencé par la nature de la structure, elle-même dépendante du rapport eau contenue/pourcentage et nature des matières organiques. Les matières organiques, notamment les gels, sont l'un des processus majeurs de la formation des liens interparticulaires de la structure. Et, il est donc nécessaire de « briser » au maximum ces liens lors de l'ajout du ciment et du malaxage qui lui fait suite. Cette accessibilité au ciment par la structure et l'eau contenue va donc conditionner en grande part l'efficacité du traitement et la création de la nouvelle structure (Troalen, 1996).

### Traitement au polymère actif

Le polymère utilisé, fourni par la société GTI est un copolymère acrylique. Ce polymère a été utilisé ici sous sa forme « sèche », c'est-à-dire qu'il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine. Cette poudre va se montrer très « absorbante » en présence d'eau. En fait, il s'agit d'un processus de prise qui résulte de réactions chimiques immédiates dès le contact du polymère avec l'eau et les matières qui constituent le matériau traité. Il est alors possible de parler d'un « greffage » ou de polymère actif, puisque la réaction entraîne la création d'un matériau de composition « différente ».

Dans le cas présent, les vases de Seine ont été traités cette fois par le polymère actif. Les pourcentages adoptés sont les mêmes que pour les mélanges avec le ciment CPJ 45 et la méthode de préparation des mélanges est identique.

La variabilité des valeurs de la cohésion des vases remaniées apparaît bien entendue comme plus faible que celle observée pour les vases intacts. D'une façon générale, les valeurs de la cohésion des vases intacts et celles des vases remaniés doivent être considérées comme le reflet de comportements distincts de vases dont la structure a été modifiée par les remaniements successifs. La variabilité des valeurs de la cohésion entre les deux domaines de vases intacts devrait pouvoir être interprétée au regard des teneurs en eau initiales plus élevées dans la série 2H (tableau II). Or, cette interprétation ne peut être uniquement validée que pour les seules valeurs de la cohésion intacte des vases dans leur état initial naturel. La valeur maximale de la cohésion résiduelle de la série 2H pose un problème, lequel est encore plus accentué dans le cas des vases remaniés, puisque les valeurs des cohésions intactes et résiduelles de la série 2H peuvent être supérieures à celles de la série 1H, à l'inverse de ce qui se passe dans les vases naturelles intacts.

Il est sans doute possible d'interpréter ces données par l'étude de l'évolution des structures, mais la solution viendra certainement de l'étude des matières organiques contenues, puisque celles-ci jouent un rôle important dans l'organisation et dans l'établissement des liaisons interparticulaires qui caractérisent la structure (Troalen, 1996).

## Amélioration des propriétés mécaniques

Les deux traitements proposés ont été réalisés sur l'ensemble des vases de Seine prélevées, après malaxage et homogénéisation des échantillons. L'état physique initial des vases, avant leurs traitements respectifs, sera donc *a priori* considéré comme identique. Il est alors possible, par la mesure des paramètres spécifiques de cet état physique, d'en suivre l'évolution à l'issue du traitement. La mesure de l'évolution de ces mêmes paramètres en fonction du temps est relativement difficile à réaliser en raison même des vitesses de réaction de prise du mélange, surtout dans le cas de l'utilisation du polymère actif.

### Procédure d'essai

Après prélèvement, malaxage et homogénéisation des vases, il a été procédé à un stockage provisoire, en chambre à humidité constante, destiné à maintenir les échantillons dans le même état physique initial. Ensuite, pour chaque essai, il est procédé à la mesure de la cohésion de l'échantillon témoin, puis à la mesure de la cohésion de l'échantillon immédiatement après son traitement. La procédure de traitement a été rigoureusement la même dans les deux cas : prélèvement d'une masse définie de vase, pesée et ajout de 1, 2 et 3 % de la masse initiale humide en ciment ou en polymère actif. Cet ajout s'effectue par simple saupoudrage (ciment ou polymère actif sous la forme d'une poudre anhydre), suivi d'un malaxage du matériau réalisé directement dans le récipient les contenant et destiné à la mesure de la cohésion qui est aussitôt pratiquée.

De la même manière, les mêmes paramètres ont été mesurés, et ils sont reportés sur le tableau IV.

L'évolution de la cohésion est très brutale et le mélange acquiert très rapidement une certaine rigidité. La différence principale entre le mélange vase-polymère actif et celui vase-ciment CPJ 45 tient dans les processus de réaction de prise. En effet et même si dans les deux cas la teneur en eau initiale joue un rôle important, la réaction de prise du polymère actif avec les vases se traduit par une sorte de « greffage à froid » et la création d'un réseau de liens qui résulte des réactions chimiques entre le polymère actif, l'eau contenue

et la phase organo-minérale des vases. Cette réaction sera d'autant plus importante que les vases seront plus riches en carbonate de calcium (Troalen, 1996).

Il en résulte un comportement particulier des vases traitées, et la mesure des paramètres devient délicate y compris celle de la cohésion. C'est notamment le cas de la mesure de la teneur en eau finale puisqu'une part de l'eau initiale va être utilisée par la réaction de prise avec le polymère actif (comme dans le cas du ciment CPJ 45) et que, d'autre part, une fraction de l'eau initiale va se trouver piégée dans le réseau structural ainsi créé; cette eau ne sera pas « libérée » par le passage

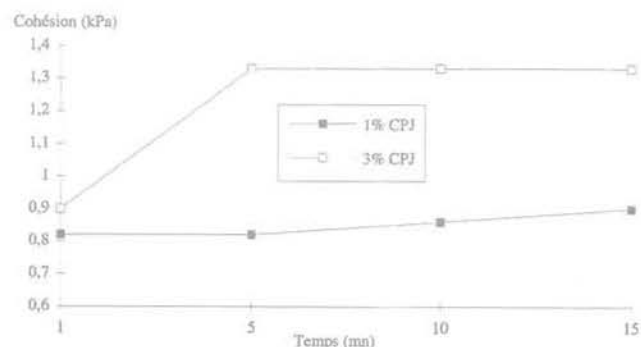


FIG. 1 Évolution de la cohésion intacte en fonction du temps. Cas des vases traités avec le ciment CPJ 45. Evolution of intact cohesion with time. Example of treated with cement CPJ 45 to 1% and 3%.

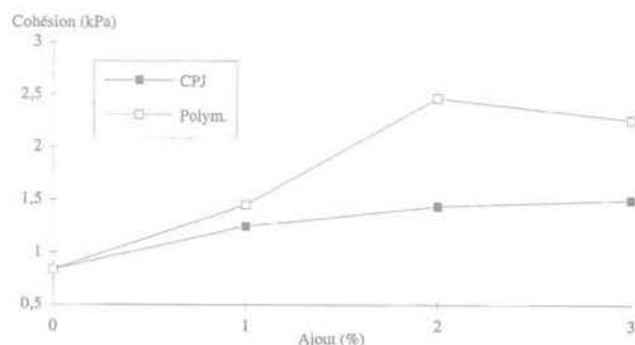


FIG. 2 Évolution de la valeur de la cohésion en fonction du traitement. Evolution of cohesion with treatment.

TABLEAU IV Paramètres physiques et mécaniques des vases après traitement par le ciment CPJ 45 et par le polymère actif. Physical and mechanical parameters of vases after cement and actif polymer treatments.

Paramètres	Traitement ciment			Traitement polymère actif		
	1%	2%	3%	1%	2%	3%
$w_{init}$ (%)	143			143		
$w_{final}$ (%)	138	135	131	137	129	125
$C_{init}$ (kPa)	0,84			0,84		
$C_{final}$ (kPa)	1,25	1,43	1,49	1,45	2,46	2,25
$\gamma_s$ init (g/cm <sup>3</sup> )	2,52			2,52		
$\gamma_s$ final (g/cm <sup>3</sup> )	2,57	2,58	2,59	2,49	2,41	2,44
$n_{init}$ (%)	78,6			78,6		
$n_{final}$ (%)	78,5	78,1	77,7	78,0	76,7	77,6
$e_{init}$	3,668			3,668		
$e_{final}$	3,655	3,570	3,500	3,560	3,295	3,461
$VB$ init	4,38			4,38		
$VB$ finale	3,64	3,58	3,73	0,57	0,57	0,57
$S_r$ initial (%)	98,8			98,8		
$S_r$ final (%)	97,9	98,4	97,1	96,6	95,3	89,1

(w = teneur en eau; C = cohésion;  $\gamma_s$  = masse volumique absolue; n = porosité; e = indice des vides; VB = valeur au bleu;  $S_r$  = degré de saturation).  
(w = water content; C = cohesion;  $\gamma_s$  = volumetric density; n = porosity; e = void ratio; VB = blue value;  $S_r$  = saturation degree).

nécessaire à l'étuve 105 °C lors de la mesure de la teneur en eau finale; ce qui ne se produisait pas dans le cas du mélange vase-ciment. Nous parlerons donc dans ce cas de la teneur en eau finale apparente.

Si les paramètres de porosité et d'indice des vides peuvent être mesurés, ils suivent d'ailleurs une évolution à peu près analogue à celle observée dans le cas du mélange vase-ciment, la valeur au bleu et la valeur de la cohésion finale deviennent difficiles à saisir. Le réseau qui se crée par le mélange vase-polymère actif empêche toute dispersion du matériau et, en conséquence, il ne peut y avoir fixation du bleu de méthylène: les surfaces spécifiques sont, globalement, non accessibles.

De même, en raison de la prise très rapide du mélange, l'évolution de la cohésion dans le temps est difficile à mesurer. Malgré tout, nous n'avons pas observé de stabilisation de la valeur de la cohésion (Fig. 2), mais au contraire une décroissance de cette valeur (dès le mélange à 2 % atteint). Ce qui est remarquable dans le cas d'un mélange vase-polymère actif, c'est l'accroissement pratiquement immédiat de la cohésion. Cependant, cette augmentation de la valeur de la cohésion n'est réelle que pour un pourcentage de polymère actif compris entre 1 et 2 %. Dès le seuil des 2 % dépassé, l'homogénéisation du mélange par malaxage devient impossible. La réaction de prise est alors trop rapide et les agrégats créés ne peuvent pas se lier entre eux, d'où la chute de la valeur de la cohésion. Bien entendu, tout comme dans le cas du mélange vase-ciment, le type de structure et la teneur en eau ini-

tiale influencent la réaction de prise; cette influence sera d'autant plus importante que la teneur en matières organiques sera initialement élevée.

4

## Conclusion

Les deux traitements réalisés sur des échantillons de vases de l'estuaire de la Seine ont abouti à une modification immédiate de l'état physique des vases. La cohésion croît très rapidement en fonction de la diminution apparente de la teneur en eau. Nous constatons que la valeur de la cohésion est fonction du pourcentage de produit ajouté, mais que passé une certaine valeur de ce pourcentage, la cohésion n'évolue plus. L'existence d'un seuil à partir duquel les propriétés de la vase traitée se stabilisent est facilement mise en évidence dans le cas du ciment CPJ 45. Par contre, dans le cas de l'utilisation du polymère actif, le seuil se traduit cette fois par une valeur limite à partir de laquelle les propriétés mécaniques de la vase chutent rapidement. Ce comportement est à relier aux processus de prise qui sont fonction de la teneur en eau initiale, de la nature minéralogique et granulométrique des constituants solides, ainsi que l'importance du pourcentage initial en matières organiques. Ces paramètres conditionnent la structure des vases et, en conséquence, leur accessibilité aux produits traitants et le comportement mécanique qui résulte des propriétés acquises par ce nouveau matériau.

## Bibliographie

- GTI Process, 79 RN 10, 78310 Coignières (France) – LMF-GC: Laboratoire de Mécanique des Fluides et de Génie Civil, Université du Havre (France).
- Bennabi A., Levacher D. – Expériences de stabilisation des vases. Étude et perspectives, 4<sup>es</sup> Journées nationales Génie Côtier-Génie Civil, Dinard (France), 17-19 avril 1996, Centre Français du Littoral, p. 463-469.
- Lucas G., Cros P., Lang J. – Étude microscopique des roches meubles et consolidées, Paris, Doin, 1976.
- Marot F., Conil P., Levacher D., Clauzel B. – Caractérisation et traitement de boues et dragage contenant des polluants métalliques: exemple d'une boue de canal, 4<sup>es</sup> Journées nationales Génie Côtier-Génie Civil, Dinard (France), 17-19 avril 1996, Centre Français du Littoral, p. 455-462.
- Mignot C. – Tassement et rhéologie des vases, *La Houille Blanche*, n° 2, p. 95-111, 1989.
- Troalen J.-P. – A propos d'une nouvelle approche des vases et des boues d'estuaire: caractérisation et devenir, 3<sup>es</sup> Journées nationales Génie Côtier-Génie Civil, Sète (France), 2-4 mars 1994, Centre Français du Littoral, 1994.
- Troalen J.-P. – Modifications des propriétés physico-mécaniques et structurales de vases d'estuaire par mélange avec un super-absorbant, *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, n° 53, p. 105-113.