

---

# Valorisation des sédiments marins par solidification/stabilisation à base de ciment et additifs dans le domaine routier

Salim MEZAZIGH <sup>1</sup>, Ernesto SILITONGA <sup>2</sup>

Université de CAEN, Laboratoire "Morphodynamique Continentale et Côtière" M2C

24, rue des Tilleuls 14000

(1) [salim.mezazigh@unicaen.fr](mailto:salim.mezazigh@unicaen.fr);

(2) [ernesto.silitonga@unicaen.fr](mailto:ernesto.silitonga@unicaen.fr)

---

*RÉSUMÉ. L'étude présentée dans cet article définit les modalités d'étude, ayant pour objet la valorisation des sédiments de dragage du Port En Bessin (Basse Normandie) en vue d'obtention d'un matériau final utilisable en techniques routières. Ainsi la première phase de l'étude consiste en une caractérisation des boues aussi bien dans leur composition que dans leur comportement aux contraintes mécaniques.*

*ABSTRACT. The study presented in this paper defined the terms of study, with the purpose of enhancing sediment dredging Port En Bessin (Normandy) to obtain a final material used in road engineering. Thus the first phase of the study is a characterization of the sludge in both their composition and in their behavior to mechanical stress.*

*MOTS-CLÉS : Sédiments marins, vase de dragage, la chaux, fumée de silice, cendre volante, lixiviation, gel-dégel, mouillage-séchage, résistance à la compression simple, résistance en traction, techniques routières.*

*KEYWORDS : Marine sediments, silt dredging, lime, silica fume, fly ash, leaching, freeze-thaw, wetting-drying, the compressive strength, tensile strength, road engineering.*

---

## 1. Introduction

L'accumulation des sédiments, et leurs pollutions éventuelles, au fond des voies de navigation telles que les chenaux, des cours d'eau et dans les installations portuaires est souvent accentuée par l'activité humaine. Pour maintenir ou restituer l'accès de ces infrastructures aux bateaux, il s'avère indispensable de procéder régulièrement à des dragages d'entretien. En moyenne 50 millions de m<sup>3</sup> de sédiments sont dragués par an dans les ports français et rejetés dans le milieu marin ou stockés dans des zones de dépôt à terre. Les sédiments de dragage sont également utilisés, sous différentes formes, dans le domaine du génie civil en tant que matériau de construction d'où le développement d'une valorisation des sédiments en utilisant la technique de solidification/stabilisation à base de liants. Cette technique nécessite une étude continue et rigoureuse des caractéristiques intrinsèques des matériaux (porosité, perméabilité, saturation...etc.).

Dans le domaine routier, l'utilisation des matériaux à base de liants hydrauliques nécessite une étude de caractérisation physico-chimique et géotechnique complète afin de maîtriser au mieux la mise en oeuvre du matériau en techniques routières. A partir des résultats de l'étape de caractérisation des sédiments une méthodologie de valorisation peut être mise en place.

Dans le cas des matériaux poreux, la microstructure entraîne une conséquence de détérioration inévitable. La surface interne totale des matériaux (constituée par les surfaces limites des vides intérieures) est exposée aux attaques de l'environnement (gel-dégel, mouillage-séchage, lixiviation des métaux lourds), si les vides communiquent avec l'extérieur, les agents étrangers peuvent alors pénétrer jusqu'au «cœur» du matériau. Par conséquent, il est important que les sédiments traités aient une porosité aussi faible que possible par l'utilisation des liants (cendres volantes, fumée de silice et ciment). Dans cet article on présente les résultats de caractérisation des paramètres physiques, du comportement mécanique, de la nature minéralogique et chimique, de l'impact sur l'environnement sont présentés. Ces paramètres ont permis par la suite d'évaluer les performances mécaniques de ces matériaux.

## 2. Les sédiments marins

### 2.1. Origines des sédiments.

Les sédiments utilisés dans cette étude proviennent du Bassin du Porte de Port en Bessin en Basse Normandie. Le Bassin du Port en Bessin est divisé en 3 parties : un avant port (extérieure et intérieure), le bassin n°1 et le bassin N°2. Les déblais de dragages du bassin n°1 et de l'avant port sont immergés en mer. Par contre, pour le bassin n° 2, les caractéristiques géochimiques des sédiments ne permettent pas

d'envisager cette solution à cause de leur contamination par des métaux lourds (cf.§3.8).

## **2.2. Mode de prélèvement, transport et chambre de ressuyage**

Le prélèvement des sédiments est un dragage mécanique réalisé par une pelle sur ponton. La pelle effectue le prélèvement des sédiments sur le fond, ensuite, les vases sont transportés dans la trémie de chargement sur le quai par le biais d'une conduite et d'une pompe puis jusqu'à la chambre de dépôt située à environ 1,3 km du port.

La solution pour déshydrater le sédiment revient à réaliser un bassin de ressuyage dans lequel les sédiments vont évacuer leurs eaux interstitielles sous l'action de la gravité et par séchage à l'air libre. La chambre de ressuyage a été réalisée avec une isolation du sol par une couche de géomembrane qui assure l'étanchéité de l'ensemble. Le premier mois, après déversement des sédiments dans la chambre de dépôt par camions, la teneur en eau des sédiments était très élevée et avoisinant 115-130%.

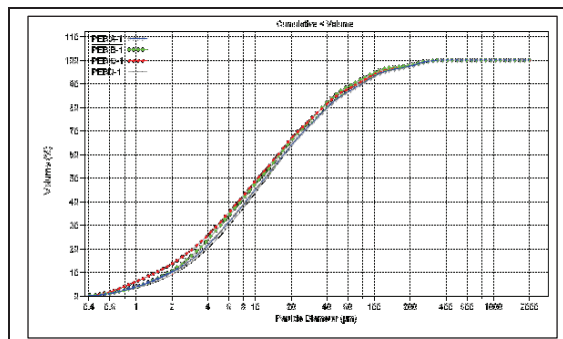
Au cours des onze mois de la période déshydrations, la surface est devenue plus solide et les fissurations pelletables. La teneur en eau s'est baissée jusqu'environ 65-75%. Cependant, avec cette teneur en eau très élevée, le procédé de traitement est du point de vue économique impossible à réaliser.

Quatre mois après la période de déshydratation, les sédiments ressemblaient physiquement à une terre avec une formation de croûtes sur la partie supérieure du dépôt. A cette époque, la teneur en eau initiale s'est fortement diminuée d'environ 60% par rapport à l'origine et est passé à 35-45%.

## **3. Caractéristiques physico-chimiques des sédiments**

### **3.1. Analyse granulométrique par laser.**

Une analyse granulométrique a été effectuée sur des sédiments prélevés sur le site du Port-en-Bessin en 4 points différents, dénommés A, B, C, D. La figure 3 montre la distribution granulométrique des sédiments obtenue pour les 4 points de prélèvement. On constate que cette distribution est similaire pour les 4 points de prélèvement ce qui confirme l'homogénéité de la vase prélevée. Cette homogénéité est également observée sur les fractions minérales données dans le tableau 1 et illustrée avec la Figure 1.

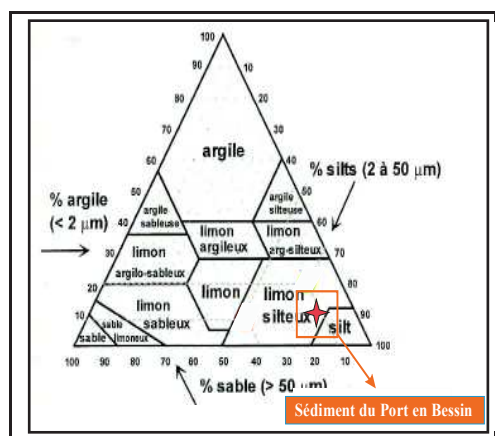


**Figure 1.** Distribution granulométrique des sédiments du Port-en-Bessin

Comme le montre le Tableau 1 et figure 3, la fraction argileuse pour ces sédiments marins est comprise entre environ 9 et 14%, la fraction silteuse est comprise entre environ 75 et 79% et la fraction sableuse entre environ 11 et 13%. Avec ces résultats nous pouvons dire que la vase du Port-en-Bessin est majoritairement silteuse.

**Tableau 1.** Données granulométriques des sédiments de Port-en-Bessin

	<b>PEB A-1</b>	<b>PEB B-1</b>	<b>PEB C-1</b>	<b>PEB D-1</b>
D10 (µm)	2	1.92	1.5	2.2
D50 (µm)	12	11.1	10.6	12.5
D90 (µm)	78.4	66.7	72	75.6
Fraction argileuse (<2 µm) (%)	10.7	10.6	13.8	9
Fraction silteuse (2 à 63 µm) (%)	77.2	78.8	74.8	78.8
fraction sableuse (> 63 µm) (%)	12.6	10.6	11.5	12.2



**Figure 2.** Classification triangulaire des sols fins

Par ailleurs, sur la base du diagramme de triangulaire de Taylor (figure 2), le sédiment de Port en Bessin est classé en limon-silteux.

### 3.2. La masse volumique absolue des particules solides par pycnomètre

La masse volumique des particules solides des sédiments obtenue par pycnomètre dans notre cas correspond à la moyenne des mesures effectuées sur cinq échantillons de sédiments est vaut 4,08 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.3. Teneur en matières organiques

La teneur en matière organique des sédiments a été déterminée par la méthode de perte au feu. Les résultats obtenus montrent que teneur en matière organique des sédiments varie de 3,97% à 4,22%. Par conséquent, les sédiments du Port en Bessin peuvent être classés en sédiments organiques ( $C_{MO} > 3$ ). Selon le Guide français de classification des matériaux routiers, avec une proportion en matière organique supérieure à 3 % et inférieure à 10% notre sédiment appartient à la classe F regroupant les sols organiques, et plus particulièrement à la sous-classe F11.

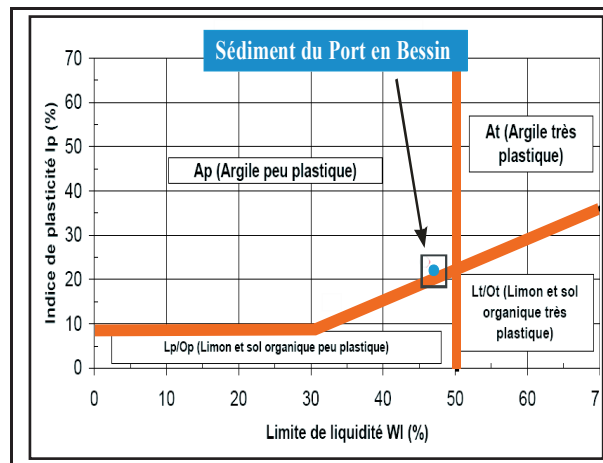
### 3.4. Limites d'Atterberg des sédiments (NF P 94-051)

La limite de liquidité est déterminée à l'aide de la méthode de Casagrande (norme NF P 94 051). La valeur de la teneur en eau correspondant à 25 chocs de la coupelle est d'environ 47%.

Pour les sédiments utilisés dans notre étude, la limite de plasticité ( $W_p$ ) déterminée est de 49,5. Le tableau ci-dessous présente les limites d'Atterberg des sédiments. Sur la base du diagramme de plasticité de Casagrande (figure 3), les sédiments du Port en Bessin est associé à la classe de matériaux dits argileux-limoneux moyennement plastique.

**Tableau 2.** Limites d'Atterberg des sédiments du Port en Bessin

Limite de plasticité (%)	Limite de liquidité (%)	Indice de plasticité Activité (%)
25,2	47	21,8



**Figure 3.** Diagramme de plasticité de Casagrande pour les sédiments du Port en Bessin

### 3.5. Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068)

L'essai au bleu de méthylène permet d'identifier la réactivité de la fraction argileuse (inférieure à  $2 \mu\text{m}$ ) présente dans un sédiment par mesure de la capacité des éléments fins à absorber le bleu de méthylène. Les smectites s'identifient avec des valeurs moyennes de bleu de méthylène comprises entre 20 et 35 et les illites entre 3 et 6. Cinq essais au bleu de méthylène ont été réalisés sur des échantillons de notre sédiment. Une moyenne de 4,32 est obtenue. Ces résultats confirment le classement des sédiments utilisés en limon peu plastiques à moyennement plastique moyenne. Par ailleurs, selon la classification GTR, les sédiments étudiés sont classés dans la catégorie  $A_2$  désignant les limons.

### 3.6. Essais Proctor Normal et Modifié (NF P 94-093)

La caractérisation des conditions optimales à mettre en œuvre pour réaliser un bon compactage, et en particulier la définition de la teneur en eau correspondante, nécessite une simulation en laboratoire qui permet de définir les conditions opératoires du compactage en place. Simultanément, on étudie l'influence de la teneur en eau sur la portance du matériau après compactage.

Figure 4. Courbe Proctor Modifié des sédiments dragués

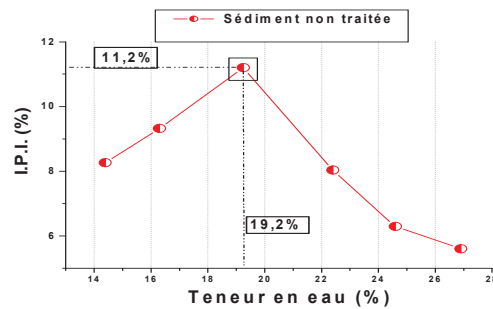
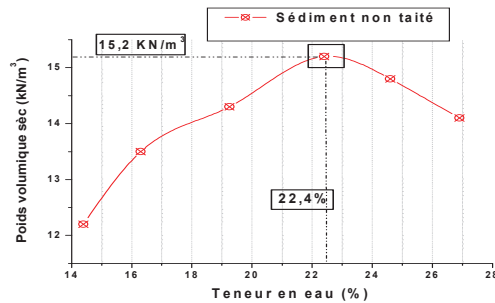


Figure 5. Indice de Portance immédiat des sédiments dragués

Les figures 4 et 5 montrent que pour les sédiments étudiés, la teneur en eau optimale correspondant au maximum poids volumique sec est de l'ordre de 22,4% avec poids volumique sec correspondant de l'ordre de 15,2 KN/m<sup>3</sup>. La valeur de l'indice de portance immédiat obtenue est de l'ordre de 11,2% avec un poids volumique sec de l'ordre de 19,24. Ces résultats a mis en évidence la difficulté de

circulation des engins sur le chantier et qu'un mauvais compactage de ces matériaux est à craindre.

### 3.7. Analyse minéralogique des sédiments par diffraction rayon X (DRX)

L'analyse par DRX permet de déterminer plus précisément la composition des sédiments. La détermination de la minéralogie précise des sédiments bruts et traités n'est pas un objectif, mais plus un outil permettant une meilleure compréhension des mécanismes liés à l'interaction entre les sédiments et la matrice cimentaire lors de leur valorisation. La smectite peut poser des problèmes de gonflement pendant la durée de traitement des sédiments par des liants hydrauliques. Une analyse des espèces argileuses des sédiments du Port en Bessin a été réalisée (figure 6). Les pourcentages de chaque espèce sont exprimés en pourcentage de minéraux argileux présents dans la fraction inférieure à 2 µm. Ils sont arrondis à la classe de 5 % la plus proche (tableau 3). Trois espèces composent le cortège argileux des sédiments : l'illite, La kaolinite et la smectite.

**Tableau 3.** Pourcentages relatifs des espèces argileuses présentes dans les sédiments

Minéraux argileux		Pourcentage
Nom	Symbole	
Smectites associées à un minéral interstratifié	14Sm-(10-14Sm)	32
Chlorite associée à un minéral interstratifié	14C-(14C-14Sm)	5
Minéral interstratifié	(10-14C)	9
Illite	I	29
Kaolinite	K	25

De ces résultats, il apparaît que les phases argileuses des sédiments Port en Bessin sont équitablement constituées de Smectites, d'Illites, et de Kaolinite. La présence des deux premières (Illite et Kaolinite) est sans conséquence pour le futur traitement du matériau, celle par contre de Smectite est assez problématique.



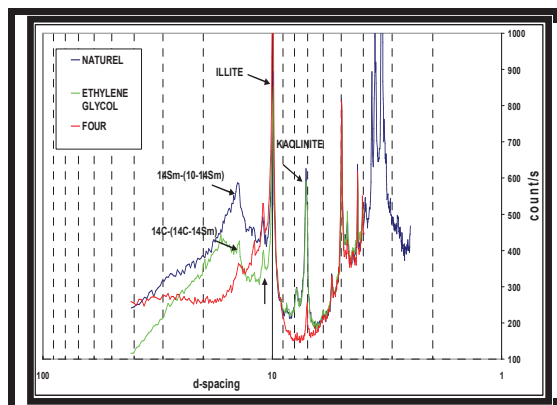


Figure 6. Caractéristiques minéralogique de sédiment du Port en Bessin.

### 3.8. Analyse géochimiques par l'essai de lixiviation

Des modifications peuvent intervenir lors du séchage à l'air libre notamment des polluants organiques. C'est la raison pour laquelle nous avons fait le choix de définir la filière de destination des sédiments à la fin de la période de déshydratation. Ce choix dépend de la qualité géochimique finale du déblai, de sa qualité géotechnique pour des opportunités d'utilisations pour des travaux de remblayage.

#### 3.7.1. Résultats des analyses (2001-2009)

Pour identifier les caractéristiques géochimiques des sédiments représentatifs du bassin n°2 avant traitement, des essais de lixiviations ont été effectuées en 2001, 2002, 2003 et 2004. Les résultats en 2003 ont montré les valeurs en chrome (Cr) proches de seuil N1 (Réfèrentiel de qualité d'immersion ; arrêté du 14 juin 2000) et des teneurs élevées en cuivre (Cu) sur les résultats de trois années d'observations. La teneur en Cuivre était plus élevée que celle la valeur N2 d'environ 3 fois plus en 2002, de 1,9 fois en 2003 et de 1,6 fois en 2004. Malgré la tendance décroissante de l'évolution de la teneur en cuivre, ces valeurs restent comme même très élevées par rapport au seuil référentiel d'immersion. Les teneurs en zinc (Zn) se situent entre les seuils N1 et N2 depuis 2001 mais augmente avec le temps pour se rapprocher en 2004 du seuil N2. La présence élevée de cuivre, est dûe aux activités de carénage et de réparation navale dans le bassin n°2. Cet élément est constitutif des peintures antifouling utilisées sur les navires. La teneur en plomb en 2002 dépasse le seuil N1.

Par ailleurs, des teneurs en HAP assez importantes ont été révélées en 2003. Deux congénères atteignent le seuil N1 (Fluoranthène et Benzo (k) fluoranthène) et deux autres proches de N1 (Indéno (1, 2, 3-cd) pyrène et Benzo (ghi) pérylène). En

2004 ces teneurs en HAP diminuent pour le Benzo (k) fluoranthène et le Indéno (1,2,3-cd) pyrène et se rapprochèrent de la valeur N1.

La Décision du Conseil n°2003/33/CE établie les valeurs de références concernant les critères d'acceptation dans les décharges de déchets inertes, non dangereux et dangereux. Ces valeurs concernent des éléments contenus dans les lixiviats et non dans les matériaux bruts. Des prélèvements d'échantillons ont été effectués en 2008 et 2009 dans la chambre ressuyage. Les échantillons de 2008 ont montré un taux d'Arsenic inférieur au seuil toléré pour une entrée en décharge en tant que déchet dangereux. Par conséquent, les vases de dragage sont classées dans la catégorie de déchet non dangereux. En 2008, les résultats ont montré un dépassement du seuil de déchet non dangereux pour le nickel et un dépassement du seuil déchet dangereux pour le taux de Zinc.

De tous les échantillons effectués, seul l'échantillon en 2009 a été prélevé dans la chambre de dépôt. Par contre, les autres échantillons ont été directement prélevés du bassin n°2. Par conséquent, les résultats des analyses géochimiques des échantillons en 2009 ne mettent pas en évidence des concentrations élevées en métaux lourds nécessitant des solutions particulières. Dans cette comparaison, la valeur référentielle de qualité est définie par la Décision du Conseil n° 2003/33/CE.

Les taux de métaux lourds dans la vase de dragage du bassin n°2 nous emmène à la classer comme déchet non-dangereux. Les concentrations en chrome, cuivre, plomb et zinc sont importantes. Ces teneurs sont supérieures au seuil des déchets dangereux. Par conséquent, au travers la grille référentielle pour une qualité d'immersion, les sédiments du bassin n°2 sont jugés comme présentant un risque écotoxicologique non négligeable sur l'écosystème marin. Pour cette raison, les déblais de dragages du bassin n°2 doivent être traités avant toute application en technique routière. En effet, un déchet dangereux ne peut pas être valorisé ou recyclé, et sa destination finale est obligatoirement un centre de stockage de déchet ou un centre de traitement spécifique.

#### 4. Conclusion

Il ressort de l'étude de caractérisation physico-chimique les points importants suivants : d'après les résultats, les sédiments utilisés sont rangé dans la classe limon-silteux. Par rapport à leur granulométrie et leur teneur en matières organiques, selon le guide GTR., nos sédiments sont rangés dans la classe F<sub>4</sub>F<sub>11</sub>. La valeur de l'indice de portance immédiat obtenue, à la teneur en eau optimale, a mis en évidence la difficulté de circulation des engins sur le chantier et qu'un mauvais compactage de ces matériaux est à craindre. D'après les résultats d'essai DRX les phases argileuses des nos sédiments constituées de rangés d'Illites, de Kaolinite, et de Smectites. L'évaluation des impacts environnementaux des sédiments a été approchée au travers de l'essai de lixiviation XP X 31211. Au regard des résultats obtenus et fonction de la législation choisie, il apparaît que certains seuils pour une

classification en déchets inerte pour les sédiments marins étudiés sont dépassés. Pour les sédiments du Port en Bessin, ces matériaux peuvent être classés en tant que déchet non-dangereux.

Une valorisation d'un sédiment par ajout de liant hydraulique (ciment) et liant pouzzolanique (cendre volante et fumée de silice) en prenant en compte l'aspect économique a été réalisée. Ce travail s'est orienté vers la technique de formulations de matériaux à base de sédiments fins par ajout de correcteurs granulaires. Pour atteindre la résistance nécessaire à la construction routière, des liants sont indispensables.

- Les résultats montrent que l'ajout de la fumée de silice dans les mélanges ont toujours conduit à une meilleure résistance par rapport aux mélanges sans fumée de silice. Le choix d'un dosage en ciment jusqu'à 5 % permet d'améliorer les performances mécaniques requises pour la résistance aux cycles de mouillage-séchage afin d'obtenir des valeurs dépassant 1 MPa pour l'ensemble des mélanges. Les mélanges avec un pourcentage de 5% de sable donnent les meilleures performances mécaniques pour l'ensemble des essais effectués.

- L'analyse des essais de lixiviation, ont révélé que des valeurs de métaux lourds, en deçà des seuils tolérés par les références fixées par la décision du Conseil n°2003/33/CE pour les sédiments traités.

## 5. Références bibliographique

- 1) AFNOR NF P 94-051, Sols: reconnaissance et essais. «Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau», (1993),15p.
- 2) AFNOR NF P 94-068, Sols: reconnaissance et essais. «Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache», (1998), 7p.
- 3) AFNOR NF P 98-234-1, Partie 1: Essai de résistance au gel-dégel des graves et sables traités. « Comportement au gel des matériaux traités aux liants hydrauliques», (1992), 6p.
- 4) AFNOR NF X 31-210, Déchets. «Essai de lixiviation», (1998), 16p.
- 5) Arrêté du 14 juin 2000 relatif aux niveaux de référence à prendre en compte lors d'une analyse de sédiments marins ou estuariens présents en milieu naturel ou portuaire, J.O n° 184 du 10 août 2000, page 12415.
- 6) Behmanesh J. . « Etude de la durabilité d'un sédiment, traité au ciment et additifs » Thèse de doctorat de l'Université de Caen. (2008), 214p
- 7) GTS, Guide Technique, «Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydraulique. Application à la réalisation des remblais et des couche de forme», LCPC-SETRA (Paris-Bagneux), (2000), 240 p.
- 8) GTR : "Guide Technique pour la Réalisation des remblais et des couches de forme », fascicule I, principes généraux, (1992) , 100 p.
- 9) Silitonga E., " Valorisation des sédimentsmarins contaminés par solidification / stbilsation à base de liants hydrauliques et de fumée de silice ". Thèse de doctorat, Université de Caen, 2010, 216p.
- 10) Taylor H.F.W., « Cement chemistry», Edition: Thomas Telford, (1997), 459 p.