
Traitement des sédiments de dragage : un enjeu du développement durable

A. Benamar¹, F. Baraud², A. Alem¹

¹Laboratoire de Mécanique, Physique et Géosciences 53 rue de Proni BP 540,
76058 Le Havre cedex

²Equipe de Recherche en Physico-Chimie et Biotechnologies, Sciences 2, Campus 2,
Bd du Maréchal Juin, 14032 Caen.

benamar@univ-lehavre.fr

RESUMÉ. Les pratiques de dragage constituent un enjeu pour le développement et le maintien des activités portuaires. Elles présentent également un risque de contamination des eaux côtières pouvant affecter durablement les écosystèmes. Parmi les procédés de traitement des sédiments pollués l'électromigration permet d'éliminer des substances ionisées ou ionisables contenues dans un sol. Des échantillons prélevés dans trois bassins différents du port du Havre ont été testés au laboratoire pour déterminer l'efficacité de ce procédé de traitement. Les essais ont consisté à déterminer l'influence des différents paramètres sur la pertinence du traitement par électromigration. Les résultats ont montré une diminution de l'intensité électrique dans l'échantillon durant l'essai mettant en évidence la saturation du potentiel d'électromigration. Le volume des solutions extraites augmente avec la puissance électrique. L'utilisation de trois électrodes de matériaux différents a montré l'interaction de celles-ci avec le milieu et leur influence sur l'efficacité du traitement.

MOTS-CLÉS : sédiment, dragage, décontamination, électromigration, polluants.

ABSTRACT. Activities of dredging are necessary for the development of the ports and to maintain sufficient sailing depth. Dredging is also a crucial operation for some engineering works. Dredged sediments are frequently accumulating chemicals and present an effective contamination risk of coastal waters, affecting the ecosystems durably. Among the treatment processes of contaminated sediments the process is a promising decontamination technique for removal of heavy metals. An experimental study which aimed at investigating the efficiency of this technique is performed for three samples of sediments dredged in the port of Le Havre. The results showed a decrease of the electric current in the sample during the, highlighting the saturation of the electrokinetic potential. Electric power and material electrodes are also the parameters controlling the electroremediation process.

KEYWORDS: dredged sediment, electrokinetic, remediation, pollutants.

1. Introduction

Les pratiques de dragage constituent un enjeu pour le développement et le maintien des activités portuaires et fluviales. Elles présentent également un risque de contamination des eaux côtières pouvant affecter durablement les écosystèmes. La réglementation française et européenne prévoit que les vases polluées ne peuvent plus être rejetées dans le milieu marin obligeant à terme les collectivités à prévoir un traitement à terre coûteux en raison des volumes considérables à valoriser et de la complexité d'un tel processus. La question des sédiments marins des zones portuaires prend ainsi une importance toute particulière : les exigences écologiques d'aujourd'hui ne permettent plus de draguer les ports sans se soucier du devenir de ces boues polluées. Un recyclage est d'autant plus important que ce sont des millions de mètres cubes de boues polluées qui doivent être extraits des ports européens. La réglementation relative aux dragages et immersions a été révisée et complétée à partir de juin 2000. Quatre textes traitent des conditions relatives à l'évaluation de la qualité des sédiments. La gestion des sédiments contaminés soulève des défis technologiques, économiques et environnementaux de plus en plus importants. Divers scénaris s'offrent aux promoteurs, depuis la décision de ne pas intervenir jusqu'à celle d'éliminer en partie ou en totalité les contaminants présents dans le sédiment. Le prétraitement et le traitement des sédiments sont des technologies répondant à ce dernier point. Elles permettent de rendre aux sédiments contaminés des teneurs en polluants acceptables pour qu'ils soient, éventuellement, réutilisés. La phase de caractérisation des sédiments prend alors toute son importance : elle permet de choisir la technologie adéquate et d'en estimer le coût. Certaines de ces technologies peuvent avoir des répercussions environnementales par l'intermédiaire des rejets d'eau ou de gaz, d'autres nécessitent beaucoup d'énergie ou de grands espaces. Les sédiments peuvent techniquement être mis en dépôt à terre, sous l'eau ou sur des îles. Toutefois, les dispositions liées à la protection de l'environnement marin contre les risques écologiques potentiels des immersions tendent à privilégier les dépôts terrestres.

Les quantités de matériaux dragués annuellement sont considérables : 40 millions de m³ pour la France et 45 millions de m³ pour les Pays-Bas. En France, la quantité de vase draguée s'élève à 24 millions de m³ par an (GEODE) et représente 75% des matériaux dragués (Boutouil, 1998). Près de 11 millions de m³ et 9 millions de m³ de sédiments sont dragués annuellement dans les ports du Havre et de Rouen (chenal d'accès) respectivement.

Parmi les procédés de traitement des sédiments pollués l'électromigration permet d'éliminer des substances ionisées ou ionisables contenues dans un sol. Sous l'influence d'un champ électrique (courant électrique) appliqué entre deux électrodes les espèces ionisées migrent vers l'anode ou la cathode selon leur charge (figure 1). Des phénomènes d'électrolyse de l'eau et d'électroosmose apparaissent lors de l'électromigration; ces phénomènes nécessitent une adaptation des conditions expérimentales pour favoriser la migration des polluants concernés (maintien de l'humidité et contrôle de PH). Il est également possible d'utiliser le phénomène d'électroosmose (qui induit un mouvement de l'eau en général vers la cathode) pour

éliminer certains polluants non ionisables. L'application d'un champ électrique dans le milieu par la création d'une différence de potentiel entre des électrodes provoque d'une part des mécanisme de transport, appelés électrocinétiques, qui sont responsables du transport des espèces dans la phase liquide vers l'une ou l'autre électrode et d'autre part des réactions d'oxydoréduction. Ces réactions électrochimiques permettent entre autre la fermeture du circuit.

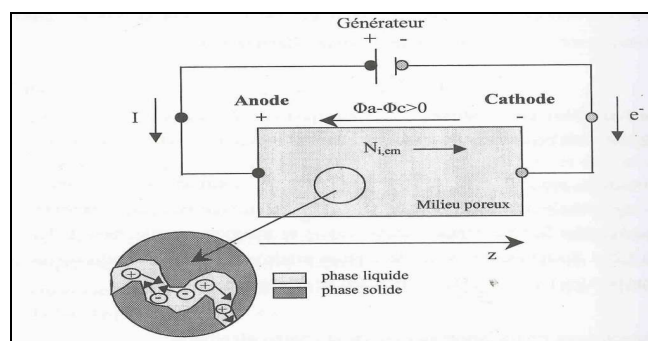


Figure 1. Schéma de principe du procédé d'électromigration (Pomès, 2002).

D'une manière générale, le but de cette étude est d'avoir une meilleure connaissance de l'électromigration, d'identifier des grandeurs utiles pour la mise en place et l'application reproductible du procédé.

2. Etude expérimentale d'électromigration

L'étude envisagée consiste à étudier l'écoulement des fluides (eau et solutés) à travers un milieu poreux sous l'effet d'un champ électrique. On s'intéressera à caractériser l'influence du champ électrique sur l'amélioration de la conductivité hydraulique et la vitesse d'écoulement dans les sols. L'intensité de la conductivité électrique dépend essentiellement des propriétés conductrices de la phase fluide et des caractéristiques du réseau poreux. L'objectif est de caractériser l'effet d'un mécanisme réactionnel précis à l'écoulement naturel des fluides et polluants dans les sols.

Les trois échantillons utilisés dans le cadre de cette étude sont extraits à la drague dans les bassins du port du Havre. La figure ci-contre montre les points de prélèvement pour les trois vases : CIM2, BN03 et Bassin (figure 2). Ce dernier point de prélèvement étant situé dans un bassin arrière du port. Les courbes granulométriques de ces échantillons sont représentées sur la figure 3. Le dispositif expérimental est constitué d'une cellule constituée d'un compartiment central contenant l'échantillon et de deux autres latéraux servant à recueillir les solutions extraites des vases. Deux électrodes sont placées aux extrémités de l'échantillon et dont la tension électrique continue ou alternative appliquée est contrôlée. Les essais consistent à déterminer l'influence des différents paramètres sur la pertinence du

[illegible]

Diamètre (μm)	CIM2 (%)	Bassin (%)	BN03 (%)
1	2	2	2
2	5	5	5
3	7	7	7
4	10	10	10
5	15	15	15
6	20	20	20
7	25	25	25
8	30	30	30
10	40	40	40
15	60	60	60
20	75	75	75
30	90	90	90
40	95	95	95
50	98	98	98
60	99	99	99
75	100	100	100

La densité de flux de matière d'une espèce i par électromigration $J_{i,em}$ peut être estimé à partir de la mobilité ionique caractéristique de l'espèce selon l'équation :

Avec :

- $\nabla \Phi$: Le gradient de potentiel imposé aux bornes du milieu ($V.m^{-1}$) définit comme la différence entre la tension à l'anode et à la cathode par unité de longueur ;
- c_i : la concentration de l'espèce i en solution ($mol. M^{-3}$) ;
- u_i^* : la mobilité ionique effective de l'espèce i dans le milieu ;
- z_i : charge de l'espèce i ;

En négligeant la diffusion, la quantité totale de matière transportée par électromigration est régie par la densité de courant j ($A.m^{-2}$) [Newman, 1991].

$$j = F \sum_i z_i \vec{J}_{i,em} = k \vec{\nabla} \Phi \quad (2)$$

avec $k = F \sum_i z_i u_i^* c_i$ la conductivité ionique du milieu poreux (S.m⁻¹).

La plupart des auteurs considèrent que les réactions électrochimiques prédominantes sont des réactions d'électrolyse de l'eau [Acar et al, 1993; Baraud, 1997]. Cependant, la nature des électrodes, la nature et la concentration des espèces présentes dans la solution, le pH ou la température sont autant de facteurs rendant possible l'apparition d'autres réactions électrochimiques si le potentiel rédox est plus favorable que celui de l'eau (Ribeiro et al, 1997).

3. Résultats et discussion

L'intensité électrique correspond à la charge de la quantité totale d'espèces chimiques transposées dans le système. Elle dépend de la différence de potentiel délivré et aussi de la somme des résistances des compartiments. L'évolution de l'intensité électrique indique des fluctuations importantes.

Les résultats obtenus montrent que sous certaines conditions, la dépollution électrocinétique permet d'extraire une partie importante de la phase liquide contenant des métaux lourds. Le pourcentage pondéral d'extraction est voisin de 15 %. La masse de vase utilisée dans le pilote de laboratoire est proche de 2 kg; le volume de solution extraite par électromigration varie selon la puissance électrique pour une durée de traitement fixée (voir le tableau I ci-dessous).

Puissance électrique (J)	12	18	22	36
Volume extrait (ml)	48	70	112	149

Table 1 : Effet de l'énergie électrique sur le volume de soluté extrait (Electrode Al)

La figure 4 montre que l'efficacité d'extraction de solution du sédiment dépend aussi de la nature des électrodes utilisées. L'aluminium est le matériau qui présente le meilleur rendement mais il interagit (altération de la cathode) avec le milieu.

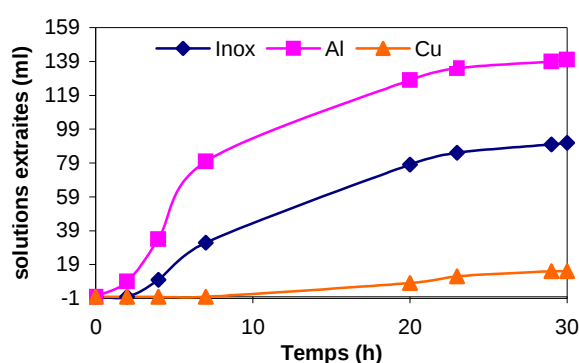


Figure 4. Variation du volume de solution extraite avec la nature de l'électrode.

Les résultats de rentabilité du procédé (dans les conditions utilisées sur ce pilote) montrent que pour extraire 15 % de solution, il faut une énergie de 52 Wh pour la masse de 2 kg de vase. L'application d'un courant alternatif permet une élévation de température dans le sol (42°C contre 20°C en courant continu) qui provoque une dessiccation importante du sol, atténuant considérablement le procédé.

Les résultats des analyses par ICP effectuées sur quelques échantillons prélevés dans les solutions extraites sont présentés dans la figure 5. A travers ces résultats, la réduction de concentration est variable pour les différents éléments chimiques et paraît intéressante dans les conditions de l'essai à l'élément Cuivre.

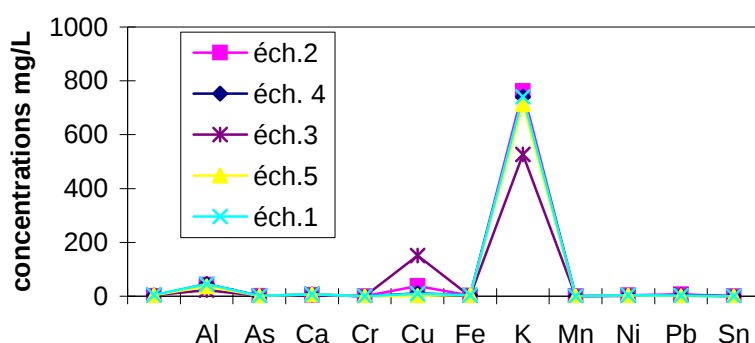


Figure 5. Résultats de spéciation sur quelques échantillons des solutions.

4. Conclusion

Cette étude a montré que le traitement électrocinétique des sédiments pollués peut, sous certaines conditions, être un procédé intéressant. Il convient alors de moduler les paramètres électrochimiques (pH, température, teneur en eau, nature des électrodes, puissance électrique, durée de traitement, niveau de pollution du sédiment) en fonction des espèces à extraire. A travers les résultats de ces essais, la réduction de concentration est variable selon les espèces. Il importe donc de rechercher les conditions optimales de réduction de polluants dans les sédiments selon ce procédé en fonction des conditions expérimentales. Cette étude a permis de montrer que le procédé d'électromigration permet d'extraire certains éléments chimiques de façon satisfaisante avant d'envisager une stabilisation par solidification dans le but d'une valorisation ultérieure des sédiments de dragage. L'apparition rapide de fissures dans le matériau pour de fortes puissances électriques réduit la durée du traitement et son efficacité.

5. Références

Acar Y.B., Alshawabkeh A.N. (1993), A novel Electrokinetic Technology for Soil Remediation and Engineering, Env. Sc. and Tech. 27, (13), p. 2638-2647.

Baraud F. (1997), Approche de la vitesse électrocinétique du transport des ions dans les pores d'un modèle de sol en électrodécontamination, Thèse de l'Université de Pau.

Boutouil M. (1998), « Traitement des vases de dragage par solidification/stabilisation à base de ciment et additifs », thèse de l'Université du Havre.

Jardani A. (2002), « Transferts de polluants dans un milieu poreux », rapport de stage de DESS Génie Portuaire et Côtier, Laboratoire de Mécanique, Université du Havre.

Ribeiro A.B., Mexia J.T. (1997), A dynamic model for the electrokinetic removal of copper from a polluted soil, J. of Hazardous Materials 56, p. 257-271.