

# Réhabilitation d'une lagune de déballastage par combinaison enceinte active / stabilisation in situ : une solution originale et économique

J.-J. Kachrillo<sup>a</sup>, G. Coatanlem<sup>a</sup>, P.-Y. Klein<sup>a</sup>, M.-C. Magnié<sup>b</sup>

<sup>a</sup> : Soletanche-Bachy – 6, rue de Watford, 92000 Nanterre

<sup>b</sup> : Inertec – 6, rue de Watford, 92000 Nanterre

La réhabilitation présentée concerne une lagune située dans le port de Brest, dédiée à la récupération de résidus provenant du déballastage des navires.

La solution retenue associe deux techniques complémentaires :

- Traitement par inertage in situ pour réduire le relargage des hydrocarbures ;

- Construction d'une barrière active permettant de récupérer les éventuels lixiviats résiduels.

Grâce aux améliorations géotechniques apportées par le traitement d'inertage ainsi qu'aux garanties à long terme fournies par la barrière active, cette solution permet la réutilisation du site à des fins industrielles telles que la construction de réservoir, parkings, routes d'accès...

Cette approche paraît être un bon compromis en termes de coût et de considérations techniques pour la réhabilitation de lagunes industrielles.

## INTRODUCTION

La lagune de déballastage de Brest a été mise en service à la fin des années 1970. Elle a recueilli une partie des déchets du naufrage de l'Amoco Cadiz puis, d'une manière plus récurrente, les déchets provenant du déballastage des navires à quai au port de commerce de Brest. A la fin des années 1990, il a été décidé de fermer ce site et de le réhabiliter afin de le rendre utilisable industriellement, c'est-à-dire constructible.

## SOLUTION RETENUE

La réglementation française précise qu'un site doit être réhabilité "en fonction de son usage futur". La solution choisie différera donc selon que le site aura vocation à être à usage industriel ou résidentiel.

### Principales caractéristiques du site

La lagune de 2 ha se trouve à proximité d'une aire accueillant des réservoirs pétroliers. Une couche d'argile imperméable a été mise en place lors de sa création pour séparer le déchet contaminé de l'aquifère. La lagune contient essentiellement un

mélange d'huiles (jusqu'à 35 %), des silts et de la matière organique qui présentent une consistance liquide à pâteuse ne pouvant pas être pompée. La profondeur de la lagune varie de 0,5 mètre sur les bords à plus de 2,5-3 mètres à certains endroits (voir figure 1). L'une des caractéristiques importantes du site est la faible qualité géotechnique du substratum se trouvant sous la lagune.

### Objectifs de l'appel d'offre

Le propriétaire du site a décidé en 1998 de réorganiser la totalité du site en le fermant et en étendant l'aire voisine de stockage de réservoirs.

En 1999, un appel d'offres a été lancé avec les objectifs suivants :

- Garantir le meilleur résultat environnemental possible en prenant en compte l'usage futur du site ;
- Permettre la construction de nouveaux réservoirs sur le site ;
- Etre parachevé dans un délai court (avant fin 2001).

Trois principaux types de solutions ont été proposés :

1. Excavation totale et traitement du déchet pour stockage hors site ;
2. Excavation totale et traitement sur site par désorption thermique ou incinération ;
3. Traitement in situ ou sur site avec ou sans dispositif de protection complémentaire.

### Choix de la solution

Les solutions impliquant une excavation ont été abandonnées en raison de leur prix et des difficultés à extraire la totalité du déchet de la lagune.

Trois types de solutions d'inertage restaient en compétition après cette première évaluation :

1. Inertage poussé des résidus permettant de respecter les seuils de relargage imposés par la réglementation française (arrêtés de décembre 1992).
2. Inertage des résidus et utilisation d'une géomembrane en PEHD (fond et couverture).
3. Inertage des résidus en association avec une barrière perméable réactive de façon à traiter les lixiviats résiduels provenant de la stabilisation.

L'une des principales caractéristiques de la lagune étant la faible portance de son substratum, l'usage futur du site, à savoir la construction de réservoirs, imposait des contraintes géotechniques spécifiques. Il a en outre été décidé de prendre des précautions supplémentaires de façon à limiter les risques potentiels de relargage de polluants du déchet traité.

Une géomembrane en PEHD pouvant supporter au maximum 1 à 2 t/m<sup>2</sup> et les réservoirs de stockage nécessitant une résistance de 20 t/m<sup>2</sup>, il est apparu que la seule solution envisageable était un couplage stabilisation / enceinte active.

Les principes de cette solution sont simples (voir figure 1) :

- Le déchet est traité par stabilisation au moyen de liants hydrauliques et d'additifs, de façon à réduire le taux de lixiviation.
- Les éventuels lixiviats résiduels sont piégés par l'enceinte active.
- Les eaux de pluie peuvent lixivier le déchet traité : les polluants éventuellement libérés sont alors piégés par les portes filtrantes.

Dans le cas où le déchet traité est remanié par des tassements différentiels ou suite à des travaux de construction de type pieux ou micropieux, les polluants éventuellement libérés sont également arrêtés par les cartouches des portes filtrantes.

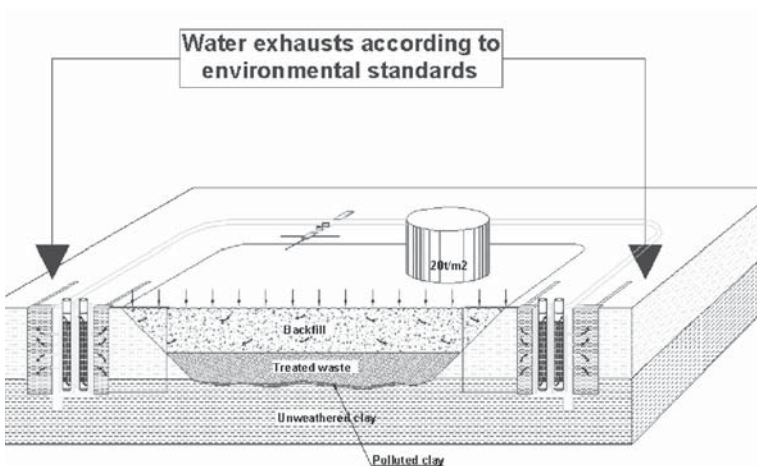


Figure 1. Schéma de principe de la solution enceinte active/stabilisation in situ.

### Principe général d'une enceinte active

Une barrière active laisse passer l'eau et retient les polluants. Elle est dimensionnée en fonction du débit prévisionnel, de la concentration moyenne de polluants en amont de la barrière et de la concentration à atteindre en aval (voir figure 2).

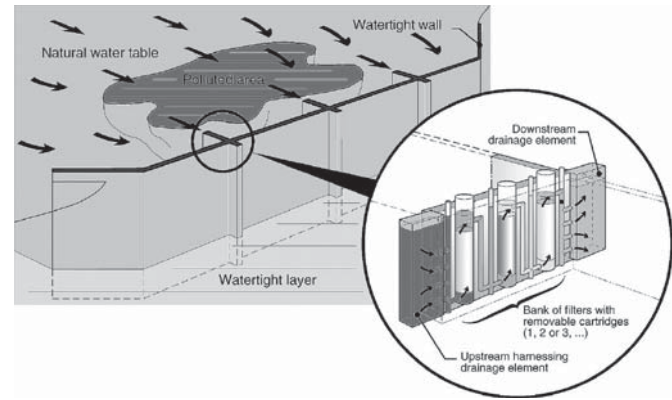


Figure 2. Schéma de principe d'une barrière active.

Quand le flot est trop important, que l'écoulement ne présente pas de direction préférentielle ou que la concentration en polluants est trop élevée, une enceinte active peut être mise en place tout autour de la zone, permettant de traiter les eaux de pluie qui circulent dans la zone polluée (voir figure 3).

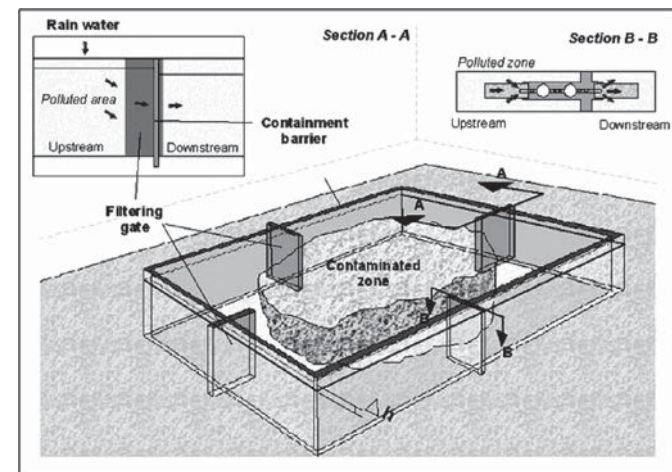


Figure 3. Schéma général du site.

Dans ce cas de figure, le modèle est simple. Il suffit de prendre en compte les précipitations moyennes, les niveaux moyens de contamination en amont ainsi que les niveaux à atteindre en aval.

## DESCRIPTION DES TRAVAUX

Comme décrit dans le paragraphe précédent, la stratégie de réhabilitation est basée sur la combinaison de la stabilisation du résidu avec la mise en place d'une barrière active autour du site.

### Traitement de stabilisation

Les pressions élevées d'eaux souterraines au-dessous de la lagune rendant l'excavation du déchet difficile, l'étape de stabilisation a été effectuée par mélange avec les réactifs in situ.

*Objectifs généraux du procédé de stabilisation :*

En regard de la stratégie globale de réhabilitation de la lagune, les objectifs généraux du procédé de stabilisation ont été définis comme suit :

- Réduire la lixiviation des résidus de façon à limiter le flux de contaminants au travers des portes filtrantes.
- Obtenir un matériau suffisamment résistant pour permettre la circulation de véhicules de chantier et la construction de nouvelles structures industrielles telles que des réservoirs pour le stockage d'hydrocarbures.
- Obtenir un traitement chimiquement et mécaniquement stable à long terme.

L'un des avantages de la combinaison de la stabilisation et de la barrière active est la possibilité de déterminer l'équilibre optimum entre les deux solutions complémentaires qui sont :

- Solidification du déchet sans objectif de rétention et barrière active de haute capacité.
- Rétention maximale des polluants sans barrière active.

*Comportement du déchet au contact de l'eau*

De façon à définir précisément les objectifs techniques de la stabilisation et à dimensionner la barrière active (nombre et taille des filtres), la première étape a consisté à caractériser le déchet. Après plusieurs campagnes d'échantillonnage et de nombreuses analyses, les caractéristiques globales ont été évaluées :

Aspect / rhéologie	Moyenne	Limites
	<b>Boue noire, comportement liquide visqueux</b>	
Eau	45 %	40 à 60 %
Hydrocarbures	20 %	15 à 30 %
Sables	35 %	20 à 50 %

Figure 4. Composition de la lagune

Le déchet a également été caractérisé selon l'essai de lixiviation normalisé en France (norme NF X31-210) : l'échantillon est mis au contact d'une masse d'eau déminéralisée 10 fois supérieure à sa masse pendant 24 heures. L'eau est ensuite analysée de façon à quantifier les polluants passés en solution. Les résultats suivants ont été observés :

- Faible relargage des métaux lourds en raison des faibles teneurs dans le déchet de départ.
- Fort relargage des hydrocarbures totaux dans l'eau.

*Définition d'objectifs techniques précis*

Les principaux critères permettant d'optimiser le système entre les deux solutions extrêmes (stabilisation poussée / barrière active seule) sont les suivants :

- Complexité technique de la barrière et coût,
- Faisabilité d'un procédé de stabilisation poussée et coût,
- Extension de la pollution hors de la lagune.

Dans le contexte présent, considérant la faible profondeur à laquelle la barrière devait être construite, et les difficultés et le coût important liés à la stabilisation, il a été décidé de définir un niveau intermédiaire pour la stabilisation, avec une barrière active de faible coût.

*Mise au point d'une formule de stabilisation*

Dans un premier temps, une formulation adaptée a été développée à l'échelle du laboratoire, avec les spécifications suivantes :

- Rc moyenne > 0,3 MPa après 28 jours.
- Abattement moyen sur lixiviats en métaux lourds de 99 %.
- Abattement moyen sur lixiviats en hydrocarbures de 90 %.
- Rhéologie des réactifs adaptée de façon à permettre un traitement in situ.
- Vitesse de prise adaptée.

Les principales difficultés qui ont été rencontrées pour le traitement du déchet ont été les suivantes :

- Le déchet présentait une importante variabilité.
- Les hydrocarbures ralentissent la prise des liants hydrauliques.
- La faible quantité de matière minérale limite le développement de la résistance à la compression.
- La quantité d'eau importante rend la prise plus difficile.
- Le pH basique imposé par les liants hydrauliques peut engendrer le relargage de certains hydrocarbures.

Grâce à l'expérience capitalisée et après un grand nombre d'essais, une formulation adaptée a été développée avec plusieurs réactifs :

- Liants hydrauliques pour permettre d'obtenir une résistance mécanique suffisante.
- Additifs spécifiques permettant la prise des liants hydrauliques en présence de composés organiques, ainsi qu'une bonne rétention des polluants organiques dans la matrice cimentaire.
- Accélérateurs et modificateur de rhéologie de façon à obtenir les propriétés physiques requises.

*Résultats du procédé de stabilisation*

Les essais réalisés sur les échantillons prélevés pour vérification donnent les résultats suivants :

Date	Rc moyenne (MPa)
15/08/01	1,37
21/08/01	0,58
18/09/01	0,70
04/10/01	0,77
06/11/01	1,17
20/11/01	1,19
11/12/01	1,08

Figure 5. Résistance à la compression après 28 jours

Date	HC (mg/kg MS)	Abattement (% MS)
Non traité	58014	
15/08/01	1165	97,99
21/08/01	27	99,95
18/09/01	58,7	99,9
04/08/01	< 5,2	> 99,99
06/11/01	< 6,94	99,9
20/11/01	12,27	99,9
11/12/01	278,41	99,5

Figure 6. Abattement en HC après 28 jours

### Mise en œuvre

En utilisant la technique décrite précédemment, 20 000 m<sup>3</sup> ont été traités en trois mois. Chaque jour, des échantillons ont été prélevés pour tests internes et externes.



Figure 7. Traitement in situ de la lagune



8. Aspect du matériau après stabilisation in situ

### Enceinte active

#### Caractéristiques de l'enceinte active

Le but est de piéger les polluants contenus dans les eaux ayant été en contact avec le matériau stabilisé.

- Surface: 19 800 m<sup>2</sup>.
- Précipitations moyennes : 850 mm par an.
- Précipitations efficaces : 40 %.
- Quantité à traiter par an : 6 730 m<sup>3</sup>.

- Paroi au coulis :

- Longueur : 610 m.
- Profondeur : 4 à 7 m.
- Perméabilité :  $K < 5 \cdot 10^{-9}$  m/s.

#### Modélisation des portes filtrantes

Les quatre portes ont été conçues en fonction de la quantité annuelle d'eau de pluie potentiellement infiltrée à traiter (6 730 m<sup>3</sup>), des concentrations à atteindre après stabilisation du déchet et également en prenant en compte la réglementation française.

Les objectifs à atteindre ont été définis à partir de la qualité moyenne des eaux souterraines de la zone industrielle :

- HCT < 1 mg/l.
- Métaux lourds (As, Zn, Pb, Ni, Ba, Mo) < 0,1 mg/l.

La stabilisation piégeant la totalité des métaux lourds, il est apparu inutile d'inclure de réactif particulier supplémentaire dans le filtre. Il a donc été décidé d'installer uniquement un filtre à charbon actif permettant de retenir la pollution organique. Le nombre de portes et la taille des filtres ont ensuite été conçus de telle façon qu'il suffise de les changer une fois par an.

#### Réalisation de la barrière active

Paroi au coulis

Une pelle rétro classique a été utilisée pour creuser la paroi au coulis, la seule difficulté rencontrée étant liée à la présence de blocs de pierre dans une digue qui existait préalablement à l'aménagement de la lagune de déballastage.

Caractéristiques :

- $K < 5 \cdot 10^{-9}$  m/s.
- Rc > 6 bars après 28 jours.

#### Portes filtrantes

Les principaux avantages de ce procédé sont les suivants : Opérations simples et fiables. Filtres faciles à remplacer. Ne nécessite pas de source d'énergie. Cinq sites sont déjà équipés de telles barrières en France, Belgique, Suisse et Espagne permettant de traiter des pollutions aux HCT ou aux solvants chlorés. Les portes filtrantes mises en place à Brest présentent les caractéristiques suivantes :

- Acier inoxydable (norme US 304 SL)
- Longueur : 3 m.
- Profondeur : 5 à 7 m.
- Equipées de deux cartouches de 200 L au charbon actif.

Figure

efficacement l'environnement et autorise la réutilisation de sites à des fins industrielles dans des conditions économiques et sans autre contrainte que l'entretien de l'enceinte active. Cette approche est particulièrement bien adaptée aux lagunes issues de l'industrie chimique ou pétrolière comme dans le cas de la lagune de Brest.

### Bibliographie

P.-J. BARKER, J.-J. KACHRILLO. Active barriers and containments – a concept with promise. ERTC 2000, Brussels.

M.-C. MAGNIE, A. BARBIER, J.-J. KACHRILLO. Une solution innovante par enceinte active et stabilisation in situ : la réhabilitation de la lagune de déballastage de Brest. L'eau, l'Industrie, les Nuisances n° 264, août-septembre 2003.

A. BOUCHELACHEM, M.-C. MAGNIE. Inertage et mise en forme des déchets industriels. Les Techniques de l'ingénieur, septembre 2001.



Figure 9. Mise en place de la porte filtrante



Figure 10. Remplacement d'un filtre



Figure 11. Vue générale de la porte filtrante

## CONCLUSION

L'association du procédé de traitement par stabilisation in situ et de l'enceinte active à portes filtrantes permet de proposer un nouveau concept intéressant et économique pour la réhabilitation des lagunes de stockage. Cette double enceinte à la fois microscopique et macroscopique permet de protéger