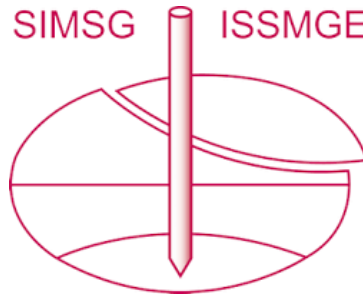


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Réhabilitation d'une décharge par stabilisation in-situ

Landfill remediation by in-situ stabilisation

A. Esnault & A. Deniau – *Bachy, Rueil-Malmaison, France*

RESUME : La décharge d'Ardeer de l'usine ICI Explosives, sur la côte ouest de l'Ecosse, a servi de dépôt pour les déchets du site pendant 40 ans. Pour préserver l'environnement local, ICI Explosives a élaboré, en accord avec les autorités locales et le « Clyde River Purification Board » un programme de recherches et de planification qui a abouti au traitement in-situ de 10.000 m³ de déchets sur la décharge par une méthode de malaxage en profondeur, le procédé COLMIX. L'article décrit le traitement effectué, depuis les recherches jusqu'à la réalisation sur site et mentionne les résultats des contrôles après traitement.

ABSTRACT : The Ardeer Land fill site at ICI Explosives factory on the west coast of Scotland had been a repository for waste from the site for 40 years. In order to safeguard the local environment ICI Explosives, with approval of Local Authorities and the Clyde River Purification Board put into action a programme of investigation and planning which culminated in the in-situ treatment of 10,000 m³ of waste within the landfill by a deep mixing method using the « Colmix » system. The paper describes the remediation from investigation to the execution of the in-situ stabilisation and presents the post construction monitoring results.

1 INTRODUCTION

La décharge se trouve sur la côte ouest de l'Ecosse, à 50 km environ au sud-ouest de Glasgow. Elle est située sur une péninsule bordée par la First of Clyde à l'ouest et l'estuaire de la Garnock au sud et à l'est. La ville d'Irvine lui fait face, de l'autre côté de l'estuaire. Le propriétaire du site, ICI Explosives, en est également l'exploitant. La décharge se prolonge jusqu'à l'extrémité sud est de la péninsule où elle est utilisée, depuis 40 ans environ, pour le stockage des déchets en provenance des unités de fabrication du site. L'estuaire de la Garnock est connu comme « site d'intérêt scientifique spécial » (SSSI).

2 HISTORIQUE

Avant que les opérations de mise en décharge ne commencent, au milieu des années 50, cette zone était un marais salant. La décharge a fonctionné jusqu'en 1993. L'observation a fait ressortir le risque potentiel d'acidification de la nappe par lessivage de certains déchets, principalement des résidus de fabrication de silicone.

ICI Explosives et le Conseil de purification de la Clyde ont procédé à une évaluation des résultats obtenus au fil des ans par l'analyse des échantillons de déchets de la zone. Cette évaluation a révélé que, bien que la pollution ne représentait pas un problème majeur immédiat, il existait néanmoins un risque réel d'accroissement de l'acidité et une teneur en métaux lourds non négligeable dans le lixiviat. D'autres investigations, échantillonnages et analyses furent donc entrepris, selon les procédures internes de ICI.

3 INVESTIGATIONS SUR SITE

3.1 Caractéristiques du site

L'hydrogéologie du site se caractérise par l'existence de deux zones aquifères, séparées par une argile à blocs relativement imperméable. L'aquifère inférieur, dans un horizon carbonifère, est naturellement protégé. La zone aquifère supérieure, dans les alluvions et les sables éoliens ainsi que dans l'argile à blocs, traverse le site d'Ardeer dans sa totalité et se prolonge dans l'estuaire de la Garnock vers la mer. La nappe phréatique dans la décharge et ses environs se trouve à une profondeur de 3 à 4 mètres.

Des essais de perméabilité, réalisés dans 11 puits de contrôle, ont

révélé des valeurs comprises entre 4×10^{-6} et 1×10^{-5} m/s, avec une moyenne de 2×10^{-5} m/s. L'analyse des échantillons a montré que les eaux de la nappe sous la décharge étaient acides, avec des concentrations de métaux élevées, et un léger prolongement de la contamination vers l'estuaire. Les eaux de la nappe en amont de la décharge se sont révélées, quant à elles, de bonne qualité.

3.2 Investigations

Les puits de surveillance avaient permis d'identifier des secteurs d'eaux souterraines à pH faible. La distribution géographique de ces secteurs touchés demeurait, quant à elle, inconnue. Une série d'investigations fut donc entreprise à l'aide d'une sonde hydraulique, la « Geoprobe ». Ce système, qui permet de prélever un échantillon d'eau plutôt que d'installer et d'utiliser un puits présente un avantage certain car il permet de prélever un grand nombre d'échantillons rapidement, en divers endroits du site. Le coût de ce système est, en outre, considérablement réduit par rapport à l'installation d'un puits conventionnel. Une fois le forage effectué, l'outil est remonté à la surface. Ensuite, une sonde crépinée est introduite dans le sol.

L'échantillon d'eau est prélevé avec une pompe à vide, et son pH, sa température et sa conductivité électrique sont mesurés sur place.

Des prélèvements sont également envoyés en laboratoire pour analyse chimique. Les résultats des analyses, communiqués à midi le jour suivant à l'équipe restée sur place, permettent de faire progresser la recherche vers les secteurs à forte concentration en matériaux polluants et de mieux définir les limites de la zone contaminée. Les résultats de l'analyse des eaux souterraines à travers la décharge toute entière ont révélé que les fortes concentrations de métaux dominaient dans les zones à pH faible. (figure 1)

4 EVALUATION DES RISQUES

Une évaluation des risques a été réalisée par ICI Explosives pour comprendre l'impact potentiel de la décharge sur l'homme et l'environnement.

Les effets potentiels furent évalués selon quatre aspects: les polluants en suspension dans l'air, ceux à la surface de la décharge, les eaux circulant sous la décharge et le transfert vers l'estuaire. Les recherches ne firent apparaître aucun risque majeur pour les trois premiers aspects. Il s'avéra, par contre, que les eaux souterraines sous la décharge avaient été contaminées et que la contamination

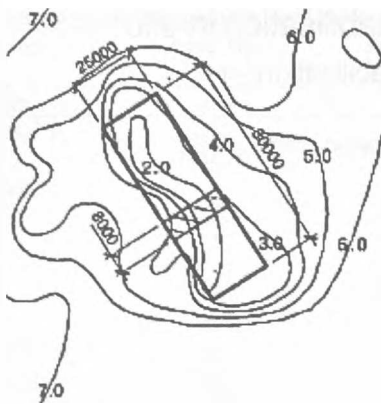


Figure 1 : délimitation du traitement avec profil des pH.

se déplaçait vers les rives adjacentes à l'estuaire. Cette zone fit donc l'objet de recherches plus poussées afin de tenter de déceler tout impact potentiel sur la faune et la flore.

Bien que l'étude des données accumulées fit ressortir un faible risque, à long terme, sur la flore et la faune, elle permit d'arriver à la conclusion qu'il serait préférable de neutraliser les déchets à pH faible de la décharge afin de réduire la dissolution et la mobilité des métaux dans les eaux souterraines.

5 CHOIX DU TRAITEMENT

En même temps que la reconnaissance, différentes techniques curatives étaient envisagées, en termes de faisabilité et d'adéquation au problème posé. Ici invita plusieurs entreprises spécialisées à donner leur opinion sur les différentes options possibles. Les techniques furent classées selon trois grandes options.

La première option : «Extraire la pollution» comprenait le lavage des sols, l'extraction des gaz, la désorption thermique ainsi que l'excavation et l'élimination vers une décharge extérieure. Les trois premières solutions furent considérées comme irréalisables en raison de la diversité des contaminants, des conditions hydrogéologiques et de la quantité importante de déchets. La quatrième solution fut rejetée en raison des risques majeurs sur la santé, la sécurité et l'environnement, liés à l'excavation, à la manipulation et au transport de quantités aussi importantes de déchets, ainsi qu'aux difficultés susceptibles d'être rencontrées pour trouver une décharge agréée susceptible d'accepter les déchets contaminés.

La deuxième option : «Immobiliser ou confiner» comprenait le confinement hydrodynamique, la vitrification et la dispersion chimique. Ces solutions furent considérées comme irréalisables en raison de la nature et de la diversité des contaminants, des conditions hydrogéologiques et de la quantité importante de déchets. La confinement de surface, seul ou combiné à une paroi, fut considéré comme une solution digne d'intérêt. Une modélisation hydrogéologique, faisant varier les zones de couverture et des longueurs de paroi, fut réalisée sur ordinateur. Elle révéla que cette méthode pourrait permettre d'assez bien contrôler le débit des eaux vers la rivière et ses rives marécageuses. Cependant, elle ne permettrait pas de traiter ou d'éliminer la contamination. On estima alors que la solidification représentait la seule option viable. Au fur et à mesure que la reconnaissance permettait de localiser les zones à faible pH, l'aspect réaliste de l'option «stabilisation» se confirmait.

Pour la troisième option : «Traiter pour rendre inoffensif», la seule technique applicable consistait à faire du lavage par circulation d'eau. Mais des doutes ont été émis quant aux volumes d'eau nécessaire et à la durée du traitement. Il fut donc décidé de faire un plot d'essai de stabilisation in situ par le procédé COLMIX, avant de procéder au traitement définitif. Ce plot d'essai serait centré sur la zone de pH la plus faible du site.

6 ESSAIS EN LABORATOIRE

Après avoir vérifié que les caractéristiques mécaniques des déchets

pouvaient le forage et le malaxage, une étude a été menée au laboratoire Bachy pour évaluer la faisabilité du traitement d'un point de vue chimique. Le traitement devait neutraliser les déchets acides et augmenter le pH à un niveau où la mobilité des métaux lourds serait réduite. Il devait, en outre, solidifier la masse pour réduire la perméabilité et le lessivage.

Les spécifications sur les déchets solidifiés étaient les suivantes :

- pH : supérieur à 9
- capacité tampon :
 - supérieure à 5 meq H+/g pour le coulis
 - supérieure à 2 meq H+/g pour le mélange déchets-coulis
- perméabilité : inférieure à 10⁻⁷ m/s
- résistance mécanique :
 - supérieure à 100 kPa à 7 jours
 - supérieure à 200 kPa à 28 jours

Les agents de stabilisation ont été utilisés sous forme de coulis. Le mélange devait également présenter des caractéristiques compatibles avec le processus Colmix, c'est-à-dire, une faible viscosité et une bonne stabilité. Les matériaux retenus pour le traitement furent les suivants : de l'hydroxyde de calcium (chaux éteinte) comme agent de neutralisation, du ciment Portland comme liant, des cendres volantes pour la stabilisation et la réduction de perméabilité.

Les performances des mélanges durcis ont été évaluées au niveau « chimique » par deux types de tests : mesure de la capacité tampon [Acid Neutralisation Capacity (ANC)] et lixiviation selon la procédure décrite dans la norme expérimentale X31 211 « Essai de lessivage d'un déchet solide initialement massique ou généré par un procédé de solidification ».

Le test ANC reflète la capacité du mélange à maintenir un pH alcalin sous l'effet d'ajout d'acide. Dans la zone tampon, le pH varie lentement lorsque l'on ajoute de l'acide. Cet effet d'amortissement de la variation de pH est appelé « effet tampon ». La capacité tampon est évaluée en mesurant la magnitude des variations du pH sous l'effet d'addition de quantités croissantes d'acide chlorhydrique. La valeur de ANC s'exprime par rapport à un pH donné, en nombre de milliéquivalents d'ions H⁺ (1 meq H⁺ = 1 mg H⁺) nécessaire pour faire chuter le pH depuis la valeur d'origine du matériau à celle du pH fixé. Le pH de 9 a été choisi comme référence.

Plus la valeur de meq est élevée, plus la capacité tampon du mélange est grande.

L'essai de lessivage est pratiqué en France pour évaluer l'efficacité des processus de stabilisation/solidification sur les déchets ultimes devant être traités avant mise en décharge. Ce test est également appliqué aux traitements in situ. Il a été utilisé uniquement « pour mémoire » pour la formulation du coulis car le test ANC était considéré comme étant beaucoup plus représentatif des conditions réelles rencontrées sur le site.

Après des essais préliminaires sur différentes compositions de coulis à base de ciment et examen des caractéristiques physiques et chimiques des déchets, deux mélanges potentiels (Mix N° 47 et 48) furent retenus. Leurs performances furent évaluées en fonction de leurs propriétés rhéologiques, mécaniques et de lessivage.

L'essai ANC est directement lié à la composition du coulis. Les essais ont montré que pour obtenir de bons résultats, il est indispensable d'utiliser des cendres volantes et de la chaux en quantités suffisantes.(figure 2)

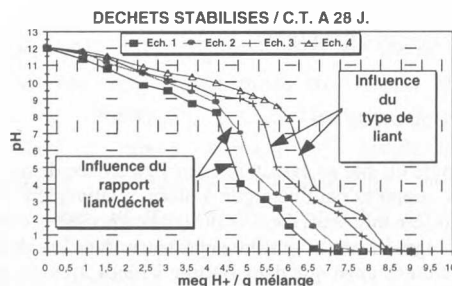


Figure 2 : capacité tampon ANC, influence du type de coulis et de son dosage.

Les essais de lessivage réalisés avec deux fluides d'extraction, de l'eau et de l'acide acétique, ne révélèrent pas de différences significatives entre les mélanges testés.

Les résultats des essais de perméabilité sur les mélanges sont de $3 \text{ et } 6 \times 10^{-8} \text{ m/s}$, ce qui soit nettement inférieur à la perméabilité initiale des déchets qui est de $2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ en moyenne.

L'utilisation du mélange N° 48 fut alors recommandé pour les premiers essais sur site, à un dosage de 310 l/m^3 de déchets, la composition finale et le taux de coulis devant être optimisés au cours des essais sur le site.

7 ESSAIS SUR SITE

7.1 Principe et mise en oeuvre du procédé Colmix

Développé à la fin des années 80, le processus Colmix crée des colonnes de terre stabilisée dans le sol. Pendant le forage, le sol est destructuré par plusieurs tarières, imbriquées de pas opposés et tournant en sens inverses. Le coulis est introduit à la pointe de l'outillage pendant le forage. Le débit des pompes est asservi à l'avance des tarières pour réguler le dosage dans le sol. Lorsque la profondeur requise est atteinte, le sens de rotation des tarières est inversé et elles sont remontées lentement afin de parfaire le mélange et surtout de le compacter. (figure 3)

On obtient ainsi un traitement de masse par désagrégation des déchets par voie mécanique, addition et mélange simultané avec les agents stabilisants puis compactage.

Chaque traitement unitaire prend la forme d'une colonne de matériaux solidifiés identiques à celle utilisée en géotechnique pour le renforcement des sols. (figure 4)

L'exécution d'un ensemble de colonnes jointives permet de traiter des volumes entiers. Le but était de réaliser un bloc le plus continu possible jusqu'à 5 mètres de profondeur.

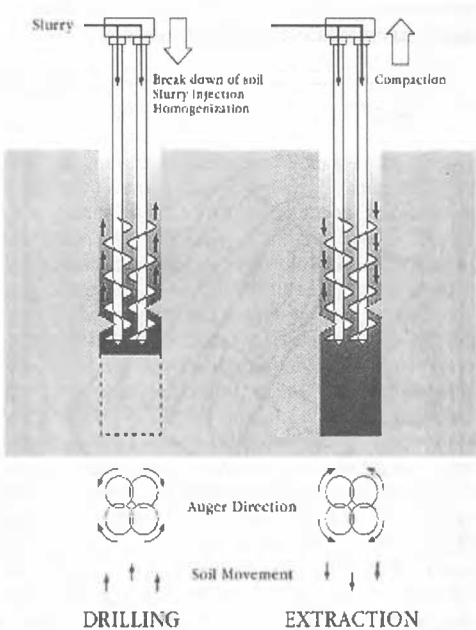


Figure 3 : construction de colonnes Colmix.

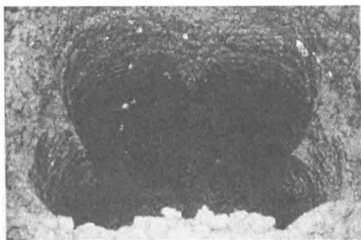


Figure 4 : empreinte d'une colonne après compactage.

Il fallait donc un système stable, tant pour le porteur que pour la ligne d'outils. L'équipement COLMIX a été monté sur une Banut 500, retenue pour sa stabilité (mauvais état de surface) et son couple (passage d'obstacles). On a retenu un outillage à 4 tarières de 500 mm, montées en carré, qui présente l'avantage d'être dynamiquement équilibré, donc peu susceptible de dévier. (figure 5)

Le coulis était fabriqué de façon classique et pompé par chacune des quatre tarières. L'ensemble était géré par un système d'acquisition et d'asservissement des paramètres de pompage (débit, volume, pression) et de forage (vitesse, profondeur, couple). Les informations s'affichaient sur un écran dans la cabine de l'opérateur et étaient stockées numériquement pour permettre d'obtenir des logs synoptiques pour chaque colonne.

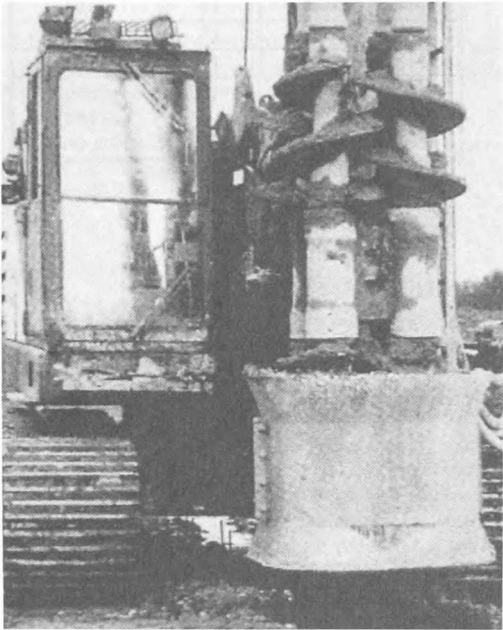


Figure 5 : atelier de Colmix.

7.2. Travail sur site

Les essais sur site commencèrent en septembre 1994 et devaient se terminer à la fin de l'année. ICI et Bachy avaient mutuellement convenu d'un cahier des charges technique qui couvrait les matières premières (ciment, chaux, cendres et eau), le coulis (densité, viscosité, stabilité, pH et ANC) ainsi que les déchets stabilisés (ANC, perméabilité, résistance mécanique; lixiviation pour mémoire). Des contrôles furent pratiqués régulièrement sur le coulis et sur les déchets stabilisés.

Le plot comprenait la construction de 261 colonnes, pour traiter une zone de 25 mètres par 8 mètres, à une profondeur de 5 mètres.

Ceci représentait environ 10 % de la totalité de la zone à traiter. (figure 6)

Au cours des essais, le coulis retenu fut remplacé par le Mix N° 47 pour permettre de comparer les deux options.

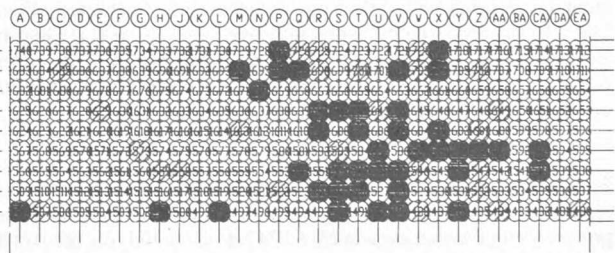


Figure 6 : plan de la zone d'essais : disposition des colonnes.

Sample Ref.	Slurry Ref.	AGE days	ANC @ pH9 meq H+ / g
F1	48	7	7,77
F5	48	18	8,67
F6	48	18	8,64
BS1	48	14	6,25
BS5	48	14	6,25
F16	48	14	9,60
F19	48	14	9,00
F22	48	14	9,50
MIX 48 mini			6,25
max			9,60
average			8,21
F8	47	14	9,25
F11	47	14	10,00
BS4	47	14	6,50
F13	47	14	12,00
MIX 47 mini			6,50
max			12,00
average			9,44

Figure 7 : essais ANC sur coulis.

8 EVALUATION DES ESSAIS SUR SITE

Les essais furent évalués par rapport au cahier des charges. Des échantillons furent prélevés en cours de travaux. Les tests de ANC portaient à la fois sur le coulis et sur les déchets traités. Les échantillons de coulis frais ont été prélevés directement à la centrale de fabrication, pour analyse à 14 jours. Les échantillons de déchets traités ont été prélevés sur les tarières COLMIX, pour analyse à 14 jours, ainsi que in-situ avec un carottier foncé, après 28 jours minimum. Tous les résultats étaient conformes aux limites spécifiées, soit : ANC > 5 meqH/g à pH 9 (figure 7) pour le coulis et ANC > 2 meqH/g pour les déchets traités. Les résultats obtenus avec le Mix n° 47 étaient légèrement meilleurs que ceux obtenus avec le Mix n° 48.

Les premières mesures de la résistance à la compression simple sur des échantillons provenant tant des tarières que des carottes n'ont pas été considérées comme représentatives; ceci pour deux raisons, le remaniement des échantillons pendant le fonçage et l'hétérogénéité du mélange à l'échelle des échantillons. On décida alors de réaliser des essais in-situ, en utilisant un pénétromètre dynamique ultra léger, le « Panda ». Au total, 18 colonnes ont ainsi été contrôlées, plus 3 autres situées hors de la zone traitée. Avec plus de 99% des résultats supérieurs à la valeur spécifiée (> 200 kPa à 28 jours), le traitement faisait la preuve de son efficacité. La comparaison avec les résultats obtenus dans la zone non traitée montre la nette amélioration mécanique du sol (figure 8).

Quatre essais de perméabilité ont été effectués à 28 jours sur des échantillons prélevés sur les tarières, lors de la construction des colonnes. Quatre échantillons supplémentaires ont été prélevés in-situ. Les valeurs de perméabilité étaient légèrement supérieures aux valeurs spécifiées à savoir < 1 x 10⁻⁷ m/s. On considéra pourtant que les procédures d'échantillonnage ne rendaient pas, là non plus, une image fidèle de la véritable nature des déchets traités, car ils surestimaient la perméabilité. Les deux coulis ne présentaient aucune différence apparente.

Sept échantillons ont été lixiviés mais comme indiqué précédemment, les résultats ne faisaient pas l'objet de spécifications particulières. Les analyses ont fait apparaître une baisse des métaux lourds lessivés et une augmentation du pH en comparaison avec les teneurs initiales des déchets. Aucune différence significative n'a été observée entre les deux coulis.

En conclusion, la plupart des spécifications ayant été atteintes, les résultats des essais ont été jugés satisfaisants. On décida alors de procéder aux travaux avec le Mix N°47 dosé à 230 litres par mètre de colonne, ce qui, pensait-on, devait permettre de satisfaire aux exigences spécifiées.

Column Location	Slurry Type	Age at test (d)	Length tested (m)	Cumulation (cm) where qd < 1MP	% where qd > 1 MPa
1618	48	75	3,25	0	100 %
1619	47	85	5	19	96,5 %
1630	48	78	4,25	0	100 %
1631	48	91	3	0	100 %
1635	48	91	3,5	0	100 %
1636	48	90	3,5	20	94,5 %
1671	48	74	2,5	0	100 %
1672	47	84	3,25	0	100 %
1602	48	76	3	0	100 %
1604	48	76	5	2	99,6 %
1645	48	91	5	4,5	99,1 %
1647	48	91	3	0	100 %
1686	X	WASTE	5	84	
1628	X	WASTE	5	4,5	
1870	X	WASTE	5	114	
1985	47	7	3	0	100 %
1927	47	7	3	0	100 %
1869	47	7	5	18,5	96,3 %
2399	47	28	5	0	100 %
2300	47	28	3,25	0	100 %
2242	47	28	3,5	0	100 %

Figure 8 : essais in situ avec pénétromètre dynamique.

9 LES TRAVAUX

Les travaux concernaient une zone de 80 mètres par 25 mètres, soit environ 2000 m², à une profondeur de 5 mètres. 2668 colonnes devaient être construites au total, dont 2407 entre janvier et juin 1995.

Afin d'optimiser la production, de légers changements furent apportés tant aux équipements qu'à la méthode de travail. L'échantillonnage et le contrôle des travaux suivirent au début la même fréquence que celle adoptée pour les essais. A mi-chemin du programme pourtant, cette fréquence fut réduite. On préleva des échantillons sur 39 colonnes pour les essais d'ANC, qui faisaient ressortir une conformité absolue (100 %) avec la spécification, soit > 2 meqH⁺/g à pH9. Pour tester la perméabilité, on préleva des échantillons sur 19 colonnes. Les résultats variaient entre 1.1 x 10⁻⁷ et 4.8 x 10⁻⁷ m/s. et le degré d'étanchéité a été considéré comme suffisant. Le pénétromètre dynamique ultra léger fut à nouveau utilisé pour contrôler la résistance mécanique. Sur les 49 colonnes contrôlées au total, 99 % étaient supérieures à la spécification, soit > 200 kPa à 28 jours.

10 SURVEILLANCE APRES TRAITEMENT

Les travaux prirent fin en juin 1995 et, en novembre 1995, 14 puits de contrôle des eaux de la nappe furent forés à l'intérieur et autour de la zone traitée. Des relevés ont été effectués tous les 3 mois. On pense qu'une période de 18 à 24 mois sera nécessaire pour valider la méthode. Au moment où nous écrivons, seulement deux jeux de résultats étant disponibles sur 1996, il est encore trop tôt pour préciser une tendance. D'une façon générale toutefois, les observations montrent que les valeurs de pH les plus faibles, entre 1,5 et 2, ont disparues : la valeur minimum relevée est de 3. Globalement, les concentrations de métaux semblent être en baisse. Dans les puits immédiatement adjacents à la zone traitée, la température est supérieure à la moyenne ce qui semblerait venir de la chaleur de la neutralisation. Compte tenu des faibles vitesses de percolation, il n'est pas anormal d'avoir une évolution aussi lente.

En plus de la surveillance des eaux, une analyse écologique distincte est actuellement en cours dans l'estuaire de la Garnock. Cette étude comprend des enquêtes annuelles menées sur les communautés de flore et de faune de la zone de marnage adjacente à la décharge. La première analyse fut réalisée en été 1994 (c'est-à-dire avant le traitement). Elle fut suivie d'une deuxième analyse en été 1995 (à la fin de la période de construction) puis d'une autre en été 1996. Au moment où nous écrivons, le rapport 1996 n'est pas disponible et nous ne pouvons pas donner de conclusions définitives.

11 REFERENCES

- Grinell A.J., Rumford S.P. & Murray-Smith R.J. (1994) - Ardeer Landfill, Probing Survey.
- Barker P., Wyllie M., Esnault A. (1996) - Investigation, planning and execution of the remediation of Ardeer Landfill, Scotland.
- Wyllie M., Esnault A., Barker P. (1996) - Remediation/stabilisation of Ardeer landfill, Scotland.