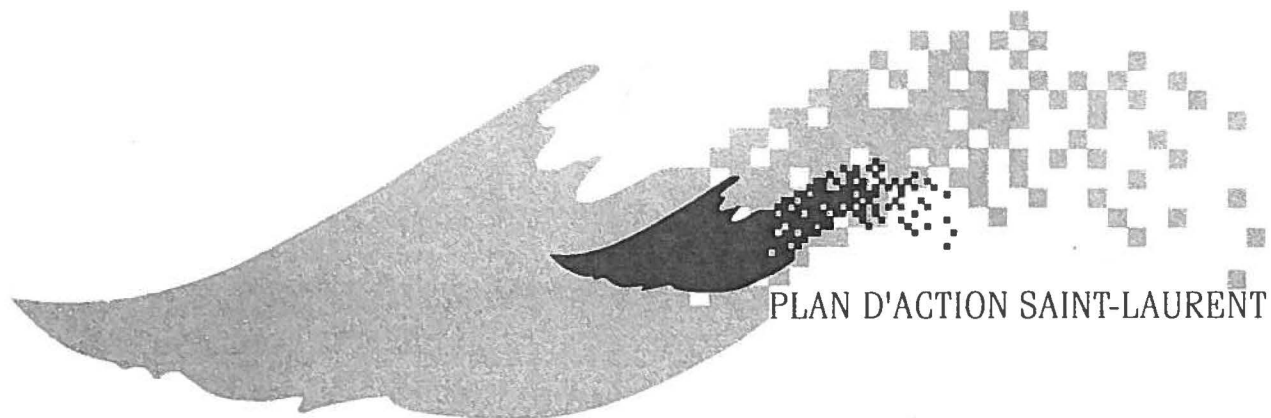


Environnement
CanadaEnvironment
Canada

Guide pour l'évaluation et le choix des technologies de traitement des sédiments contaminés



PLAN D'ACTION SAINT-LAURENT

**GUIDE POUR L'ÉVALUATION ET
LE CHOIX DES TECHNOLOGIES
DE TRAITEMENT DES SÉDIMENTS
CONTAMINÉS**

**Division des technologies de restauration
Direction du développement technologique
Centre Saint-Laurent
Environnement Canada**

Avril 1993

ÉQUIPE DE TRAVAIL

Ce document a été préparé par Jean-René Michaud sous la supervision de René Rochon, chef de la Division des technologies de restauration. Les personnes suivantes ont également apporté leurs commentaires et suggestions : Lucie Olivier, Jacques Bérubé et Monique Simon.

AVIS AUX LECTEURS

Les mentions de marque de commerce et de produits commerciaux qui apparaissent dans ce rapport ne signifient aucunement que leur utilisation est recommandée. Pour obtenir de plus amples informations sur le présent guide et les recommandations qu'il contient, s'adresser à :

Direction du développement technologique
Centre Saint- Laurent
105, rue McGill, 4e étage
Montréal (Québec)
H2Y 2E7
(514) 283-7000

Ce document devra être cité de la façon suivante:

Centre Saint- Laurent (1993). *Guide pour l'évaluation et le choix des technologies de traitement des sédiments contaminés*. Document rédigé par Jean-René Michaud, Direction du développement technologique. N° de catalogue : En40-450/1993F.

Ce document est publié avec l'autorisation du ministère de l'Environnement

Ministère des Approvisionnements et Services Canada 1993
N° de catalogue: En40-450/1993F
ISBN 0-662-98133-2

PERSPECTIVE DE GESTION

Le présent **Guide sur l'évaluation et le choix des technologies de traitement des sédiments contaminés** vise à assister les promoteurs et les gestionnaires dans la planification, la conception, l'évaluation et la réalisation de projets de dragage et d'assainissement de sédiments contaminés. En présentant les avantages et les limites des technologies démontrées et en cours de démonstration pour le pré-traitement et le traitement des sédiments et pour le traitement des effluents des opérations de traitement et de mise en dépôt des sédiments, ce guide vise également à encourager le développement de technologies innovatrices pour la dépollution de sédiments contaminés.

Ce guide s'ajoute aux autres documents publiés par la Direction du développement technologique du Centre Saint-Laurent (*Guide méthodologique de caractérisation des sédiments, Critères intérimaires pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent, Guide pour le choix et l'opération des équipements de dragage et pratiques environnementales qui s'y rattachent*).

MANAGEMENT PERSPECTIVE

The ***Guide to Evaluating and Selecting Treatment Technologies for Contaminated Sediment*** is designed to assist promoters and managers in planning, designing, assessing and conducting contaminated sediment dredging and cleanup projects. This guide aims to encourage the development of innovative technologies for cleaning contaminated sediment. To this end, it presents the advantages and limitations of technologies demonstrated or under demonstration to pre-treat sediment, treat sediment and the resulting effluent, and treat effluent from sediment disposal operations.

This guide is the latest addition to other documents published by the Technology Development Branch of the St. Lawrence Centre: the *Methods Manual for Sediment Characterization; Interim Criteria for Quality Assessment of St. Lawrence River Sediment and Selecting and Operating Dredging Equipment : A Guide to sound Environmental Practices*.

RÉSUMÉ

En raison des enjeux environnementaux et économiques liés à la présence de sédiments contaminés, à la gestion des matériaux de dragage contaminés, à la dépollution de sites aquatiques contaminés, toute décision de traitement doit faire l'objet d'une analyse au cas par cas afin de bien comprendre l'ensemble de la problématique. La présence de sources actives de pollution, la nature et l'importance de la contamination, les risques de remise en suspension ou en solution des contaminants par des phénomènes naturels ou artificiels et la présence de ressources et usages sensibles sur ou à proximité du site à restaurer, doivent être considérés.

Les différents scénarios de traitement de sédiments contaminés, avec les variantes possibles qui 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 les sédiments, sont précisés en faisant référence au degré de décontamination exigé par la réglementation en vigueur. Les avantages et désavantages de chacun des scénarios sont sommairement énumérés et des critères d'évaluation et de choix de scénarios sont également proposés.

Les technologies de pré-traitement qui se traduisent généralement par une réduction significative des volumes de sédiments à manipuler et à traiter sont ensuite décrites en précisant pour chaque type de technologie, le stade de développement ainsi que les avantages et limites.

Les diverses technologies de traitement (thermique, extraction, biologique, chimique et d'immobilisation) qui ont été expérimentées un peu partout à travers le monde pour les sols et les sédiments, ou qui font actuellement l'objet de projets de démonstration de décontamination de sédiments sont présentées. Pour chaque type de technologie, les informations suivantes sont rapportées : principe de base; techniques ou procédés disponibles; domaines d'application; avantages et limites inhérents à chaque technologie; avantages et limites pour le traitement des sédiments; procédés démontrés pour les sédiments; procédés faisant actuellement l'objet de projets de démonstration et ceux retenus pour des projets de dépollution de sédiments contaminés.

Compte tenu des volumes d'eau plus ou moins contaminée résultant de la manipulation et du traitement des sédiments, les technologies démontrées ou en cours de démonstration pour le traitement des effluents ou des lixiviats sont également présentées.

Afin de comparer les diverses technologies, les principes, les avantages, les limites et les coûts de traitement anticipés pour chaque groupe de technologies sont ensuite rappelés. Pour les mêmes raisons, les impacts potentiels de certaines technologies de traitement sur l'environnement et la santé humaine sont sommairement décrits et visualisés dans une matrice d'impact. Une liste de critères d'évaluation et de choix des technologies de traitement visant à prendre en compte l'ensemble de ces considérations, est enfin proposée.

SUMMARY

There are environmental and economic concerns associated with the presence of contaminated sediment, its management as dredged material and the cleanup of contaminated aquatic sites. As a result, cleanup operations must be decided upon on a case-by-case basis. Factors to consider include the presence of active sources of pollution, the nature and significance of the contamination, the risks linked to the natural or artificial source resuspension and solution of contaminants, and the presence of sensitive resources and uses at or near the site to be restored.

Various treatment scenarios for contaminated sediment are offered in reference to the degree of decontamination demanded by the environmental laws in effect. The advantages and disadvantages of each scenario are briefly described, as are criteria for their assessment and selection.

Pre-treatment technologies are then described which generally lead to significant reductions in the volumes of sediment for handling and treatment. Further details, such as each technology stage of development and its advantages and disadvantages, are included.

Next follows a description of the various treatment technologies (thermal, extraction, biological, chemical and immobilisation) that have been tested worldwide on soil and sediment and/or are currently under study in sediment decontamination demonstration projects. The following information is reported for each technology : basic principle; technique or process available; fields of application; advantages and limitations of each technology; advantages and limitations for treating sediment; processes demonstrated on sediment; processes currently being tested in demonstration projects, and those adopted for contaminated sediment cleanup projects.

The guide also takes into account the volumes of more or less contaminated water which result from handling and treating sediment, and the technologies demonstrated or under demonstration for the treatment of effluents or leachates.

As a means of comparison, the various technologies, principles, advantages, limitations and treatment costs expected for each group of technologies are also presented. The potential impacts of some treatment technologies on the environment and on human health are briefly described and shown in a matrix. A list of assessment and selection criteria for treatment technologies is also offered which takes all these factors into consideration.

TABLE DES MATIERES

ÉQUIPE DE TRAVAIL/AVIS AUX LECTEURS	iii
PERSPECTIVE DE GESTION/MANAGEMENT PERSPECTIVE	iv
RÉSUMÉ	v
SUMMARY	vii
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES FIGURES	xvi
LISTE DES TABLEAUX	xxiii
1 INTRODUCTION	
1.1 Contexte	1
1.2 Plan d'action Saint-Laurent (PASL)	1
1.3 Plan d'action pour les Grands Lacs (PAGL)	3
1.4 Programme de développement ou démonstration de techniques d'assainissement de lieux contaminés (DÉTALC)	4
1.5 Objectifs du document	5
1.6 Sources d'information	6
1.7 Contenu	7
2 SCÉNARIOS DE TRAITEMENT ET DE DÉPOLLUTION DES SÉDIMENTS	10
2.1 Objectifs	10
2.2 Caractéristiques physico-chimiques des sédiments influençant la mobilité des contaminants	11
2.3 Substances à considérer dans les projets de dépollution des sédiments	12
2.4 Critères intérimaires d'évaluation de la qualité des sédiments	15
2.4.1 Application des critères pour la gestion des matériaux dragués	15

2.4.2	Application des critères pour la restauration des sites aquatiques contaminés	19
2.5	Scénarios de traitement des sédiments contaminés	20
2.5.1	Catégorisation des scénarios de traitement	20
2.5.2	Avantages et inconvénients des scénarios de traitement	23
2.5.3	Critères d'évaluation et de choix des scénarios de traitement	26
3	TECHNOLOGIES DE PRÉ-TRAITEMENT	29
3.1	Objectifs	29
3.2	Procédés de pré-traitement	29
3.2.1	Déshydratation	29
3.2.2	Injection de produits dans les boues draguées	31
3.2.3	Classification des particules	32
3.3	Applications et limites des procédés de pré-traitement	33
3.4	Exemples de procédés démontrés de pré-traitement des sédiments	39
3.4.1	Procédé néerlandais	39
3.4.2	Procédé français	42
3.4.3	Procédé belge	43
3.4.4	Procédé canadien	44
3.5	Procédés retenus pour l'assainissement des Grands Lacs	45
3.5.1	Critères d'évaluation et de sélection des procédés	46
3.5.2	Procédés retenus	51
4	TECHNOLOGIES DE TRAITEMENT DES SÉDIMENTS CONTAMINÉS	54
4.1	Objectifs de traitement	54
4.2	Procédés de traitement des sols et sédiments	55
4.3	Traitement biologique	64
4.3.1	Principe de traitement	64
4.3.2	Technologies disponibles	65
4.3.2.1	Biodégradation sur/hors site	65

	4.3.2.2	Biodégradation in situ	70
	4.3.2.3	Biofixation	71
	4.3.3	Domaines d'application	71
	4.3.4	Avantages, limites et applications démontrées de chaque technologie	74
	4.3.5	Avantages et limites pour le traitement des sédiments	76
	4.3.6	Technologies démontrées pour le traitement des sédiments	81
	4.3.7	Technologies en démonstration pour le traitement des sédiments	88
	4.3.8	Technologies retenues pour des projets de dépollution des sédiments	92
	4.3.9	Conclusions	94
4.4		Traitement par extraction physico-chimique	95
	4.4.1	Principe de traitement	95
	4.4.2	Technologies disponibles	97
	4.4.2.1	Lavage	97
	4.4.2.2	Flottation	99
	4.4.2.3	Extraction sous vide	101
	4.4.2.4	Extraction aux solvants	103
	4.4.2.5	Extraction avec des fluides aux conditions critiques ou supercritiques	106
	4.4.2.6	Séparation électrique/électroacoustique	109
	4.4.2.7	Extraction/aération mécanique	110
	4.4.3	Domaines d'application	112
	4.4.4	Avantages, limites et applications démontrées de chaque technologie	112
	4.4.5	Avantages et limites pour le traitement des sédiments	116
	4.4.6	Technologies démontrées pour le traitement des sédiments	116
	4.4.7	Technologies en démonstration pour le traitement des sédiments	125
	4.4.8	Technologies retenues pour des projets de dépollution des sédiments	133
	4.4.9	Conclusions	135
4.5		Traitement chimique	136
	4.5.1	Principe de traitement	136
	4.5.2	Technologies disponibles	136
	4.5.2.1	Oxydation/réduction	136
	4.5.2.2	Déchloration	139
	4.5.2.3	Hydrolyse	142
	4.5.2.4	Électrolyse	143

	4.5.2.5	Photolyse	143
4.5.3		Domaines d'application	146
4.5.4		Avantages, limites et applications démontrées de chaque technologie	146
4.5.5		Avantages et limites pour le traitement des sédiments	147
4.5.6		Technologies démontrées pour le traitement des sédiments	149
4.5.7		Technologies en démonstration pour le traitement des sédiments	154
4.5.8		Technologies retenues pour des projets de dépollution des sédiments	154
4.5.9		Conclusions	154
4.6		Traitement thermique	156
4.6.1		Principe de traitement	156
4.6.2		Technologies disponibles	157
	4.6.2.1	Incinération	157
	4.6.2.2	Pyrolyse	163
	4.6.2.3	Vitrification	166
	4.6.2.4	Sels fondus	167
	4.6.2.5	Désorption	167
	4.6.2.6	Oxydation à air humide	170
4.6.3		Domaines d'application	171
4.6.4		Avantages, limites et applications démontrées de chaque technologie	173
4.6.5		Avantages et limites pour le traitement des sédiments	177
4.6.6		Technologies démontrées pour le traitement des sédiments	180
4.6.7		Technologies en démonstration pour le traitement des sédiments	192
4.6.8		Technologies retenues pour des projets de dépollution des sédiments	196
4.6.9		Conclusions	197
4.7		Traitement par immobilisation	200
4.7.1		Principe de traitement	200
4.7.2		Technologies disponibles	201
	4.7.2.1	Stabilisation/solidification	201
	4.7.2.2	Sorption	209
	4.7.2.3	Macro-encapsulation	209
	4.7.2.4	Vitrification in situ	210
	4.7.2.5	Autres procédés	212
4.7.3		Domaines d'application	213

4.7.4	Avantages, limites et applications démontrées de chaque technologie	215
4.7.5	Avantages et limites pour le traitement des sédiments	217
4.7.6	Technologies démontrées pour le traitement des sédiments	221
4.7.7	Technologies en démonstration pour le traitement des sédiments	223
4.7.8	Technologies retenues pour des projets de dépollution des sédiments	224
4.7.9	Conclusions	226
4.8	Chaînes de traitement	228
4.9	Confinement sécuritaire	233
4.9.1	Principe de traitement	233
4.9.2	Technologies disponibles	234
4.9.2.1	Cellule de confinement en milieu terrestre	234
4.9.2.2	Décharges contrôlées	236
4.9.2.3	Sites d'enfouissement à sécurité accrue ou maximale	236
4.9.3	Avantages et limites des technologies de mise en dépôt sécuritaire	237
4.9.4	Conclusions	237
4.10	Ensemble des technologies en cours de démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs	238
5	TRAITEMENT DES EFFLUENTS OU LIXIVIATS	242
5.1	Objectifs	242
5.2	Procédés de traitement des effluents ou lixiviats	242
5.2.1	Enlèvement des métaux	243
5.2.2	Enlèvement des solides en suspension	243
5.2.3	Enlèvement des substances organiques	243
5.3	Applications et limites des procédés de traitement des effluents ou lixiviats	245
5.4	Procédés retenus pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs	246
5.4.1	Rappel des critères d'évaluation et de sélection des procédés	246
5.4.2	Procédés retenus	246

6	CONSIDÉRATIONS GLOBALES DANS LE CHOIX DES TECHNOLOGIES DE TRAITEMENT	252
6.1	Critères proposés pour l'évaluation et le choix des technologies de traitement des sédiments	253
6.2	Rappel des principes/avantages/limites de chaque type de technologie de traitement	253
6.3	Impacts potentiels des technologies de traitement sur l'environnement et sur la santé	258
6.4	Coûts de traitement anticipés pour la dépollution des sédiments	268
7	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	277
7.1	Gestion des matériaux de dragage	278
7.2	Gestion des sédiments contaminés	279
7.3	Technologies de traitement	280
7.4	Impacts potentiels des technologies de traitement sur l'environnement et la santé humaine	283
8	RÉFÉRENCES	286

ANNEXES

- A** - Programmes disponibles de financement des projets de développement technologique
- B** - Liste des contaminants dans chaque grande catégorie définie par l'USEPA
- C** - Adresses des promoteurs ou développeurs de technologies de traitement

D - Sources d'information additionnelle

E - Glossaire

LISTE DES FIGURES

2.1	Scénarios de restauration possibles pour les sédiments contaminés	21
3.1	Options de pré-traitement des sédiments considérées pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs	30
3.2	Scénarios de traitement des sédiments contaminés en Hollande	40
3.3	Vue en coupe de l'unité mobile S.A. Extract de pré-traitement des sédiments	43
3.4	Schéma de principe de l'installation Silt N.V. de pré-traitement des sédiments	44
3.5	Schéma de principe de l'installation Acres-Derrick de pré-traitement des sédiments	45
3.6	Classification des technologies (26) de pré-traitement des sédiments considérées et retenues pour des projets de démonstration pour l'assainissement des Grands Lacs	52
4.1	Options de traitement des sédiments considérées pour l'assainissement des Grands Lacs par le gouvernement américain	56
4.2	Options de traitement des sédiments enregistrées dans la banque canadienne SEDTEC du Plan d'Action des Grands Lacs	58
4.3	Classification des technologies de traitement des sols/ sédiments en fonction du lieu et du niveau de traitement	61
4.4	Classification des technologies selon le type de procédé	62

4.5	Intrants et extrants des technologies biologiques de traitement sur/hors site	66
4.6	Schéma de principe des procédés de biodégradation en phase humide	68
4.7	Intrants et extrants des technologies biologiques de traitement in situ	70
4.8	Vue en coupe d'un bassin de biodégradation en phase solide des sédiments	77
4.9	Vue en coupe d'un bioréacteur rotatif en phase humide pour le traitement des sédiments	78
4.10	Scénarios hollandais pour le traitement des sédiments par biodégradation	82
4.11	Schéma de principe du bioréacteur de SNC-Lavalin	87
4.12	Schéma de principe des procédés d'extraction	96
4.13	Intrants et extrants des procédés de lavage des sols	97
4.14	Schéma de principe des procédés aqueux de lavage des sols	98
4.15	Schéma de principe du procédé de lavage des sols avec ultrasons, de la lumière UV et de l'ozone	100
4.16	Schéma de principe du procédé de lavage des sols par flottation	101
4.17	Intrants et extrants des procédés d'extraction sous vide	102

4.18	Schéma de principe des procédés d'extraction sous vide	103
4.19	Intrants et extrants des procédés d'extraction aux solvants	104
4.20	Schéma de principe des procédés d'extraction aux solvants	105
4.21	Schéma de principe des procédés d'extraction avec des fluides aux conditions critiques	107
4.22	Schéma de principe des procédés d'extraction avec des fluides aux conditions supercritiques	108
4.23	Schéma conceptuel de la technologie d'extraction par électro-acoustique	109
4.24	Schéma de principe du procédé d'extraction de la compagnie CF Systems	120
4.25	Schéma de principe du procédé d'extraction BEST	122
4.26	Schéma de principe du procédé d'extraction LEEP	124
4.27	Schéma de principe du procédé de lavage Bergmann	128
4.28	Schéma de principe du procédé Métanétic	130
4.29	Intrants et extrants des procédés d'oxydo-réduction	137
4.30	Schéma de principe des procédés d'oxydo-réduction	138
4.31	Intrants et extrants des procédés de déchloration	140
4.32	Schéma de principe des procédés de déchloration APEG	141

4.33	Schéma de principe du procédé EcoLogic	151
4.34	Intrants et extrants des procédés d'incinération	157
4.35	Schéma de principe d'une unité mobile d'incinération	158
4.36	Vue en coupe d'un incinérateur à four rotatif	160
4.37	Vue en coupe d'un incinérateur à lit mobile	161
4.38	Vue en coupe d'un incinérateur à radiations infrarouges	162
4.39	Intrants et extrants des procédés de pyrolyse	164
4.40	Schéma de principe du procédé de pyrolyse	165
4.41	Intrants et extrants des procédés de vitrification	166
4.42	Intrants et extrants des procédés de désorption	168
4.43	Schéma de principe des procédés de désorption	169
4.44	Schéma de principe du procédé de désorption DAVÉS	182
4.45	Schéma de principe du procédé de désorption LTTS	184
4.46	Schéma du réacteur AOSTRA-Taciuk	186
4.47	Schéma de principe du procédé AOSTRA-Taciuk	188
4.48	Schéma de principe du procédé Lurgi	190
4.49	Schéma de principe du procédé Zimpro/Passavant d'oxydation à air humide	192

4.50	Schéma de principe du procédé ReTeC de désorption à haute température	195
4.51	Intrants et extrants des procédés d'immobilisation	201
4.52	Schéma de principe des procédés de stabilisation/solidification	202
4.53	Schéma de principe des procédés de stabilisation/solidification à base de ciment Portland	203
4.54	Schéma de principe des procédés de stabilisation/solidification à la chaux	204
4.55	Schéma de principe des procédés de stabilisation/solidification avec des silicates	207
4.56	Schéma de principe des procédés de stabilisation/solidification avec des chlorananes	208
4.57	Intrants et extrants des procédés de vitrification in situ	210
4.58	Vue en coupe du procédé de vitrification in situ	211
4.59	Schéma de principe du procédé de vitrification in situ	212
4.60	Schéma de principe d'une chaîne de traitement utilisée en Hollande	229
4.61	Schéma de principe de la chaîne de traitement de l'unité du Toronto Harbour Commission (THC)	231
4.62	Diagramme conceptuel d'une cellule de confinement en milieu terrestre	234

4.63	Vue en coupe d'une cellule de confinement sécuritaire en milieu terrestre	235
4.64	Classification des 79 technologies de traitement des sédiments évaluées et retenues par l'USACE et l'USEPA pour des projets de démonstration pour l'assainissement des Grands Lacs	240
5.1	Options de traitement des effluents et lixiviats des sédiments considérées pour l'assainissement des Grands Lacs	244
5.2	Classification des 41 technologies de traitement des effluents considérées et retenues pour des projets de démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs	250
6.1	Matrices des impacts potentiels des technologies de traitement sur l'environnement et la santé humaine	261
6.2	Comparaison des coûts de traitement des sédiments d'un projet de traitement des sédiments basée sur l'expérience hollandaise	274
6.3	Comparaison des coûts des diverses composantes d'un projet de traitement des sédiments basée sur des expériences américaines et canadiennes	275

4.9	Avantages, désavantages et applications des technologies d'extraction pour la dépollution de sols contaminés	113
4.10	Évaluation de la performance anticipée des technologies d'extraction pour la dépollution des sédiments	117
4.11	Technologies d'extraction démontrées pour la dépollution des sédiments	118
4.12	Technologies d'extraction en démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs	126
4.13	Liste des projets de dépollution de sédiments par des technologies d'extraction dans le cadre du programme américain d'innovation technologique	134
4.14	Efficacité des technologies de traitement chimique par groupe de contaminants et par type de déchets	144
4.15	Avantages, désavantages et applications des technologies chimiques pour la dépollution des sols	145
4.16	Évaluation de la performance anticipée des technologies chimiques pour la dépollution de sédiments	148
4.17	Technologies chimiques démontrées pour la dépollution de sédiments	150
4.18	Technologies chimiques en démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs	153
4.19	Efficacité des technologies de traitement thermique par groupe de contaminants et par type de déchets	172

4.20	Avantages, désavantages et applications des technologies thermiques conventionnelles de traitement des sols contaminés	174
4.21	Avantages, désavantages et applications des technologies thermiques non conventionnelles de traitement des sols contaminés	176
4.22	Évaluation de la performance anticipée des technologies thermiques pour la dépollution des sédiments	179
4.23	Technologies thermiques démontrées pour la dépollution des sédiments	181
4.24	Technologies thermiques en démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs	193
4.25	Efficacité des technologies d'immobilisation par groupe de contaminants et par type de déchets	214
4.26	Avantages, désavantages et applications des technologies d'immobilisation pour le traitement des déchets	216
4.27	Évaluation de la performance anticipée des technologies d'immobilisation pour le traitement des sédiments contaminés	218
4.28	Technologies d'immobilisation démontrées pour le traitement des sédiments contaminés	220
4.29	Technologies d'immobilisation en démonstration pour le traitement des sédiments contaminés des Grands Lacs	225
4.30	Technologies de dépollution des sédiments en démonstration en Hollande	230

5.1	Évaluation de la performance anticipée des technologies de traitement des effluents	247
6.1	Critères à considérer pour le choix des technologies dans la chaîne de traitement des sédiments contaminés	254
6.2	Rappel des principes, des avantages et des limites de chaque catégorie de traitement pour la dépollution des sédiments	255
6.3	Critères d'évaluation des impacts sur l'environnement et sur la santé des technologies de traitement des sols utilisés par la Ville de Toronto	259
6.4	Catégories de coûts considérées dans le études de traitabilité du Superfund américain	270
6.5	Comparaison des coûts hollandais de dragage de capitalisation, d'entretien et de dépollution des sédiments	271
6.6	Principales différences entre un dragage d'entretien et un dragage à des fins de dépollution des sédiments	272

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Les activités industrielles, agricoles et le développement urbain autour des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent ont entraîné depuis plusieurs années une accumulation de contaminants dans la colonne d'eau et dans les sédiments qui menacent ce grand écosystème fluvial, le plus important de l'Est de l'Amérique du nord. Dans plusieurs secteurs, l'eau est de moins en moins propre à la consommation, la baignade est interdite et les habitats sont détériorés au point de menacer la survie de plusieurs espèces fauniques et floristiques et de compromettre sérieusement la pêche commerciale et sportive.

Bien que les efforts des deux paliers de gouvernement visent la réduction à la source des contaminants, la présence dans certains secteurs du fleuve, de sédiments contaminés risque d'entraîner pendant plusieurs années encore une dégradation de la qualité de l'eau et des habitats aquatiques. D'autre part, la navigation commerciale et de plaisance avec les activités de dragage qu'elles requièrent, les périodes de forte hydraulité en périodes de crues et de forts orages ainsi que les vents violents, sont susceptibles d'entraîner régulièrement une remise en suspension et en solution dans la colonne d'eau des contaminants présents dans les sédiments.

Conscients de cette problématique, les gouvernements fédéral et provincial ont développé des programmes de protection, de dépollution ou d'assainissement des habitats aquatiques les plus menacés.

1.2 Plan d'action Saint-Laurent (PASL)

Le 3 juin 1988, les gouvernements du Canada et du Québec signaient une convention de collaboration visant la protection et la dépollution du Saint-Laurent. Le 1er juillet de la même année, le Conseil du Trésor approuvait des crédits fédéraux de 110 millions de dollars répartis sur cinq ans pour la réalisation du Plan d'action Saint-Laurent (PASL). L'un des objectifs poursuivis par le PASL consiste à évaluer les

problèmes liés aux sédiments contaminés dans les principales zones portuaires fédérales afin d'élaborer des plans de décontamination en collaboration avec les responsables de la gestion de ces ports.

Dans le cadre du volet Restauration du PASL, deux programmes gérés par la Direction du développement technologique du Centre Saint-Laurent (CSL) ont été établis. Le premier programme, *Technologies de dragage*, vise à développer pour les promoteurs de projets de dragage et pour les experts-conseils, des outils qui permettront d'identifier et de décrire la problématique environnementale associée au dragage de sédiments et d'améliorer la gestion des interventions reliées ou rattachées au dragage. C'est dans ce contexte que le *Guide pour le choix et l'opération des équipements de dragage et des pratiques environnementales qui s'y rattachent* a déjà été publié (Centre Saint-Laurent, 1992).

En vue de leur assainissement, les sites contaminés le long du Saint-Laurent ont été inventoriés et priorisés, et les sédiments des ports de Montréal, Trois-Rivières et Québec ont fait l'objet d'une caractérisation qualitative et quantitative par la Direction de la Protection, d'Environnement Canada. Des scénarios de restauration ont été élaborés pour deux de ces trois secteurs. Pour guider ces scénarios et pour tous les autres projets impliquant la gestion de sédiments, la Division des technologies de restauration du CSL, en collaboration avec la Direction de la Protection de l'environnement et le Service canadien de la faune d'Environnement Canada, Pêches et Océans et le ministère de l'Environnement du Québec, a procédé à la révision des critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent.

Une des prochaines étapes probables en vue de la restauration des deux ports prioritaires (Montréal et Québec), du canal de Lachine et éventuellement d'autres sites fédéraux le long du Saint-Laurent, sera la réalisation de projets de démonstration de technologies de traitement de sédiments contaminés, de façon à en évaluer les limites, l'efficacité, les coûts et l'intérêt global en fonction des conditions propres au Saint-Laurent.

C'est dans ce cadre que le second programme, *Technologies de disposition des sédiments*, vise à favoriser la recherche, le développement, la démonstration et l'application de nouvelles technologies pour la mise en dépôt sécuritaire des sédiments, qu'ils soient pollués ou non.

1.3 Plan d'action pour les Grands Lacs (PAGL)

Après le Plan d'action Saint-Laurent amorcé en juin 1988, le gouvernement fédéral lançait à l'automne 1989 le *Plan d'action pour les Grands Lacs (PAGL)* dans le cadre duquel 125 millions de dollars devaient être consacrés au rétablissement de la qualité de l'eau des Grands Lacs. Grâce au Fonds d'assainissement des Grands Lacs, Environnement Canada dispose d'une somme de 55 millions de dollars pour financer le développement et la démonstration de technologies et de programmes d'assainissement qui permettront au gouvernement fédéral de remplir ses obligations dans 17 secteurs canadiens sur les 43 du bassin des Grands Lacs identifiés par la Commission mixte internationale (CMI) comme étant les secteurs les plus préoccupants.

Le PAGL constitue pour le gouvernement canadien la contrepartie d'un plan américain similaire, l'*Assessment and Remediation of Contaminated Sediment (ARCS)*, amorcé en 1987 et dirigé par le *Great Lakes National Program Office (GLNPO)* de l'U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). Le programme ARCS vise à étudier et à réaliser des projets de démonstration pour contrôler et enlever les polluants toxiques présents dans les sédiments des Grands Lacs.

Dans le programme américain, 17 technologies initialement conçues pour le traitement des sols contaminés, font présentement l'objet de projets de démonstration, en banc d'essais (13) ou à l'échelle pilote (4), dans les cinq secteurs prioritaires suivants des Grands Lacs : rivière Sheboygan, Wisconsin; port d'Indiana et rivière Grand Calumet, Indiana; rivière et baie Saginaw, Michigan; rivière Ashtabula, Ohio et rivière Buffalo, New York. Les résultats de ces projets de démonstration seront publiés l'an prochain en même temps que toutes les études connexes reliées à la caractérisation des sédiments, au développement de bioessais, de modèles de dispersion et de bilans de masse, aux études de risques, à l'élaboration de scénarios de dépollution, de programmes assurance-qualité et de programmes de communication et de diffusion des résultats auprès du public.

Du côté canadien, des projets de démonstration de techniques d'enlèvement des sédiments et de techniques nouvelles et innovatrices dans le

domaine du traitement des sédiments contaminés ont été ou sont déjà planifiés jusqu'en 1993-1994, dans les secteurs préoccupants suivants : rivière Niagara, ports de Toronto, Hamilton, Port Hope et Collingwood, canal Welland et Thunder Bay.

Suite à une demande de soumissions publiée en décembre 1990, plus de 80 déclarations d'intérêt représentant plus de 140 technologies ont été soumises au Bureau de l'environnement des Grand Lacs, d'Environnement Canada. Après analyse, 42 soumissionnaires ont été retenus pour présenter une offre de services pour des travaux à échelle réduite. En ce qui a trait à l'enlèvement des sédiments contaminés, 12 techniques innovatrices proposées par ces soumissionnaires ont été retenues pour des projets de démonstration. En ce qui concerne le pré-traitement et le traitement des sédiments contaminés, 17 projets de démonstration en banc d'essais et projets à l'échelle pilote avaient déjà été financés en janvier 1993.

1.4 Programme de développement ou de démonstration des techniques d'assainissement des lieux contaminés (DÉTALC)

Tout en profitant des enseignements de ces programmes de démonstration de technologies au Canada et aux États-Unis, et de ceux en cours en Europe, en particulier en Hollande, les gouvernements canadien et québécois désirent réaliser au Québec des projets de démonstration innovateurs dans le domaine des sédiments contaminés dans le cadre du Programme de développement ou de démonstration de techniques d'assainissement de lieux contaminés (DÉTALC), connu également sous le vocable anglais *Development and Demonstration of Site Remediation Technology (DSERT)*.

Dans le cadre de cette entente fédérale-provinciale d'une durée de cinq ans et venant à échéance le 31 mars 1995, le ministère de l'Environnement du Québec et Environnement Canada disposent d'un fond de 12,75 millions de dollars pour le développement ou la démonstration, au Québec, de techniques d'assainissement dans le domaine des sédiments et des sols contaminés, des résidus miniers et des eaux souterraines. Les priorités de recherche et les critères d'admissibilité au programme DÉTALC sont présentés à l'Annexe A.

1.5 Objectifs du document

Dans le cadre du programme *Technologies de disposition des sédiments*, le PASL vise à favoriser le développement, la démonstration et l'application de nouvelles technologies environnementales pour le traitement des sédiments contaminés. En publiant le présent document sur les scénarios et les technologies de traitement, le CSL désire assister les intervenants dans le choix et le développement de technologies de traitement des sédiments contaminés basés sur les expériences canadiennes, américaines et européennes.

En présentant la revue des technologies de traitement qui ont été utilisées ou qui font actuellement l'objet d'analyses et de démonstration pour le traitement de sédiments contaminés, le CSL souhaite contribuer au développement de centres d'expertises québécois et canadien en technologies de traitement de sédiments contaminés.

Plus spécifiquement, les objectifs de ce document sont :

- d'identifier les divers scénarios possibles de traitement de sédiments contaminés et leurs avantages/limites respectifs;
- d'identifier les grandes composantes d'un scénario de traitement;
- d'identifier les diverses options possibles pour le pré-traitement et le traitement des sédiments contaminés et le traitement des effluents liquides générés pendant les opérations de dragage, de pré-traitement et de traitement des sédiments;
- de présenter les stades de développement de l'ensemble de ces technologies, leurs domaines d'application, leurs limites et leurs coûts d'utilisation;
- de présenter une liste des facteurs et critères d'évaluation à considérer pour réaliser des projets de restauration et sélectionner des technologies de traitement des sédiments.

1.6 Sources d'information

Pour réaliser ce document portant sur les scénarios et les technologies de traitement des sédiments contaminés, la Division des technologies de restauration du CSL a effectué une analyse et une synthèse de plusieurs documents produits dans le cadre des programmes de démonstration technologique mentionnés précédemment et réalisés par ou pour les agences suivantes :

- Agence américaine de protection de l'environnement (USEPA) dans le cadre du Superfund Innovative Technology Evaluation (SITE);
- US Army Corps of Engineers pour la restauration du Port de New Bedford (Massachusetts) et pour le programme ARCS pour l'assainissement des Grands Lacs;
- Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée (Netherlands Organization for Applied Scientific Research, TNO);
- Bureau de l'environnement des Grands Lacs, d'Environnement Canada et publiés par le Centre de traitement des eaux usées de Burlington (CTEU);
- Environnement Canada, dans le cadre des programmes de développement et de démonstration de technologies d'assainissement de lieux contaminés (DÉTALC) et du National Groundwater and Soil Remediation Program (GASReP).
- Enfin, les documents analysés ou produits pour la validation de procédés de traitement des sédiments contaminés du canal de Lachine (Centre Saint-Laurent, 1992b).

Les documents de référence sont présentés dans la bibliographie et seront cités tout au long du document.

1.7 Contenu

Ce document sur les technologies de traitement des sédiments contaminés comporte sept chapitres. Le chapitre 1 rappelle le contexte, les programmes visant à encourager des projets de démonstration, ainsi que les objectifs du document. Le

chapitre 2 présente les scénarios de restauration et d'assainissement de sédiments contaminés disponibles pour les divers intervenants.

Le chapitre 3 est consacré aux technologies de pré-traitement des sédiments pouvant s'appliquer aussi bien aux sédiments propres que contaminés. Ces technologies de pré-traitement visent essentiellement une réduction du volume des matériaux à manipuler et à traiter, un conditionnement des matériaux dragués en vue de leur valorisation à des fins de construction ou d'aménagement, ou encore un conditionnement indispensable en prévision d'un traitement subséquent.

Le chapitre 4 présente les technologies proprement dites de traitement des sédiments qui peuvent avoir pour fonction : de détruire les contaminants, de les traiter pour les rendre moins toxiques et dangereux, de séparer les contaminants de la partie des sédiments non contaminés pour le traitement ou la mise en dépôt subséquents ou d'immobiliser, de fixer ou de confiner de façon sécuritaire les contaminants afin d'éviter leur libération dans l'environnement.

Comme la plupart des technologies de traitement des sédiments nécessitent un traitement des effluents associés au procédé lui-même ou en raison du fort contenu en eau des sédiments, le chapitre 5 est consacré à la description des technologies de traitement des effluents ou lixiviats.

Le chapitre 6 présente une perspective globale dans le choix des technologies en considérant l'ensemble des travaux tant aux plans technique, économique qu'environnemental (ce dernier critère incluant la protection de la santé publique et les considérations sociales).

Les conclusions et recommandations qui découlent de cette revue des scénarios et des technologies de traitement des sédiments sont présentées au chapitre 7. Ce document est complété par une bibliographie des références citées tout au long du document et cinq annexes, à savoir : la liste des divers programmes gouvernementaux pour le financement de projets de développement et de démonstration de technologies environnementales; la liste des contaminants dans chaque grande catégorie de contaminants; les adresses des détenteurs des technologies présentées dans ce document; les coordonnées des agences, organismes

et ministères pour obtenir les documents de référence ou plus d'informations sur les technologies; un glossaire des termes techniques utilisés.

2 SCÉNARIOS DE TRAITEMENT ET DE DÉPOLLUTION DE SÉDIMENTS CONTAMINÉS

2.1 Objectifs

Les contaminants présents dans les sédiments non remaniés représentent parfois un risque de se retrouver dans d'autres composantes de l'environnement : eau, végétation et organismes aquatiques, faunes semi-aquatique et avienne et éventuellement chez les humains. Le niveau de risque est plus ou moins élevé selon les conditions hydrodynamiques, les caractéristiques physico-chimiques des sédiments, l'abondance et la vulnérabilité des ressources biologiques retrouvées sur le site ou à proximité, et des facteurs d'exposition liés aux activités humaines pratiquées sur le site ou dans les parages.

Dans les sites où les sédiments contaminés sont régulièrement remaniés par la circulation des navires ou à l'occasion par les activités de dragage à des fins d'entretien des voies navigables, les risques de remise en suspension et en solution des contaminants dans la colonne d'eau et de transfert de ces contaminants dans les autres composantes de l'environnement sont plus élevés. La mise en dépôt de sédiments dragués dans de tels sites, tant en milieu aquatique qu'en milieu terrestre, risque de contaminer d'autres milieux et d'autres composantes de ces milieux (air, eaux de surface, sols, eaux souterraines, végétation et faunes terrestre et riveraine), si des mesures adéquates ne sont pas prises.

Lorsque les risques pour l'environnement et la santé humaine sont trop élevés et requièrent une intervention, il faut prendre en considération que les travaux de traitement et de dépollution des sédiments représentent également des risques de contamination pour d'autres milieux, et ce à toutes les étapes (dragage, transport, pré-traitement et traitement des sédiments, traitement des effluents liquides et élimination des résidus de traitement) dépendant du scénario, des technologies et des mesures de protection retenues à toutes les phases des travaux.

Par conséquent, il est important que les scénarios envisagés pour la restauration des sédiments contaminés puissent satisfaire les objectifs suivants :

- a) assurer que les interventions soient justifiées compte tenu du degré de contamination et de la vulnérabilité des ressources et des activités humaines du milieu;
- b) assurer l'efficacité et la durabilité de l'intervention à moyen et long termes;
- c) assurer que les risques liés à toutes les phases des travaux de restauration ne seront pas plus élevés que ceux associés à une non intervention;
- d) prendre en compte les caractéristiques physico-chimiques des sédiments contaminés;
- e) prendre en compte les possibilités de recontamination du site.

2.2 Caractéristiques physico-chimiques des sédiments influençant la mobilité des contaminants

Les caractéristiques physiques et chimiques des sédiments exercent une très grande influence sur la biodisponibilité des contaminants présents dans les sédiments. Ces caractéristiques, qui varient d'un site à l'autre, peuvent avoir une grande influence sur le scénario de dépollution (USEPA, 1991a).

La première caractéristique physique est la granulométrie, à savoir le pourcentage de sable, d'argile et de limon. Généralement, les sédiments sablonneux présentent une faible attraction pour les métaux et les substances organiques synthétiques (pesticides et substances organiques industrielles). Par contre, toutes les classes de contaminants ont une plus grande affinité pour les sédiments fins (limon et argile). Le contenu en matière organique, incluant l'humus, est aussi important puisque la matière humique possède une forte affinité pour les métaux et les contaminants non polaires et sert de source d'énergie pour les populations microbiennes présentes dans les sédiments. Le contenu en eau des sédiments est également un élément important à considérer lors du choix des technologies à toutes les phases (dragage, transport, entreposage et traitement) d'un projet de restauration.

Les caractéristiques chimiques des sédiments influencent également la mobilité et la biodégradabilité des contaminants. Parmi les propriétés chimiques des sédiments importantes à analyser, mentionnons : le pH, le potentiel d'oxydo-réduction, la salinité, le contenu en sulfures, le nombre et le type de cations et d'anions présents et les teneurs en oxydes de fer et manganèse potentiellement réactifs.

Les contaminants peuvent être par ailleurs mobilisés ou immobilisés par les modifications physico-chimiques des sédiments pendant les travaux de dépollution. Par exemple, les carbonates de métaux peuvent relarguer leurs métaux si le pH est abaissé au moment du dragage et du traitement. Il est donc très important de connaître la chimie des sédiments lors de l'élaboration et du choix du scénario de traitement (USEPA,1991a).

2.3 Substances à considérer lors de projets de dépollution des sédiments

Le tableau 2.1 présente la liste des substances qui doivent être analysées de façon routinière dans tout projet d'évaluation de la qualité des sédiments du fleuve Saint-Laurent (Centre Saint-Laurent, 1992a). Selon les conditions particulières au site où sont entrepris des travaux de dragage ou de restauration, le gestionnaire peut être appelé à ajouter ou à retrancher une ou plusieurs substances de cette liste.

La liste présentée au tableau 2.1 ne regroupe que les contaminants les plus importants généralement présents dans les sédiments (p.ex., métaux lourds, HAP) ou des indicateurs importants de la nature des sédiments et de leur contamination (p.ex., carbone organique total, les différents Aroclor). Enfin, cette liste regroupe les substances les plus souvent retenues par les principaux organismes chargés de prioriser les substances contaminantes.

Le tableau 2.2 regroupe les substances dont il faut tenir compte lorsque les projets de dragage ou de restauration impliquent le rejet en mer de sédiments contaminés (partie VI de la *Loi canadienne pour la protection de l'environnement* pour les projets d'immersion de déchets en mer).

Tableau 2.1 Liste de substances retenues pour l'évaluation routinière de la qualité des sédiments du Saint-Laurent (avril 1992)

SUBSTANCES INORGANIQUES	SUBSTANCES ORGANIQUES
<p>Arsenic extractible Cadmium extractible Chrome extractible Cuivre extractible Mercure total Nickel extractible Plomb extractible Zinc extractible</p>	<p>Aroclor 1016 Aroclor 1248 Aroclor 1254 Aroclor 1260 Carbone organique total Huiles et graisses minérales* HAP totaux HAP détaillés: Acénaphène Acénaphylène Anthracène Benzo(a)anthracène Benzo(a)pyrène Benzo(b)fluoranthène* Benzo(g,h,i)pérylène Benzo(j)fluoranthène* Benzo(k)fluoranthène* Benzo(e)pyrène* Chrysène Dibenzo(a,e)pyrène* Dibenzo(a,h)anthracène Dibenzo(a,h)pyrène* Dibenzo(a,i)pyrène* Dibenzo(a,j)acridine* Fluoranthène Fluorène Indéno(1,2,3-cd)pyrène Naphtalène Phénanthrène Pyrène Méthyl 3- cholanthrène* Méthyl 5- chrysène* Dibenzo-7H(c,g)carbazole* Diméthyl 7,12-benzo(a)anthracène*</p>

* Aucun critère de qualité n'a été proposé pour cette substance à partir des approches retenues.

REMARQUE : Cette liste de substances est recommandée mais non limitative; elle regroupe des substances qui pourraient être analysées de façon routinière dans tout projet d'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent. Selon les circonstances et le site d'échantillonnage, le gestionnaire pourrait être appelé à ajouter ou à retrancher de la liste une ou plusieurs substances. Elle pourra de plus être révisée à la lumière de nouvelles données toxicologiques.

Tableau 2.2 Liste des substances à considérer dans le cadre de la partie VI de la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (avril 1992)

SUBSTANCES INORGANIQUES	SUBSTANCES ORGANIQUES
<p>Arsenic extractible Beryllium extractible* Cadmium extractible Chrome extractible Cuivre extractible Cyanures totaux* Mercure total Nickel extractible Plomb extractible Vanadium extractible* Zinc extractible</p>	<p>Aroclor 1242* Aroclor 1254 Aroclor 1260 Carbone organique total Carbone total Dioxines* Furannes* HAP (bas poids moléculaire) HAP (haut poids moléculaire) HCB Huiles et graisses totales* Phosphore total Pesticides: Aldrine α-BHC β-BHC Cis-chlordane* Trans-chlordane* o,p-DDD* o,p-DDT p,p'-DDD p,p'-DDE p,p'-DDT Dieldrine Endrine α-endosulfan* β-endosulfan* Heptachlore Heptachlore époxyde Lindane Méthoxychlore* Mirex</p>

* Aucun critère de qualité n'a été proposé pour cette substance à partir des approches retenues.

2.4 Critères intérimaires pour l'évaluation de la qualité des sédiments

Les critères intérimaires pour l'évaluation de la qualité des sédiments retenus pour le fleuve Saint-Laurent sont présentés au tableau 2.3. Ces critères sont regroupés en trois niveaux :

- Seuil sans effet (SSE) : teneur de base, sans effets chroniques ou aigus;
- Seuil d'effets mineurs (SEM) : teneur où sont observés des effets cependant tolérés par la majorité des organismes benthiques;
- Seuil d'effets néfastes (SEN) : teneur produisant des effets nuisibles pour la majorité des organismes benthiques.

Pour en connaître davantage sur les approches qui ont permis de sélectionner les critères de chaque seuil, le lecteur est invité à se procurer le document complet intitulé *Critères intérimaires pour l'évaluation de la qualité des sédiments* publié par le Centre Saint-Laurent (1992a).

Basé sur ces trois niveaux d'évaluation, le tableau 2.4 présente le processus décisionnel général d'intervention proposé pour la gestion des matériaux dragués et la restauration des sites aquatiques contaminés.

2.4.1 Application des critères pour la gestion des matériaux dragués. - Les matériaux dragués réfèrent essentiellement aux matériaux résultant d'un processus de sédimentation qui sont enlevés du fond d'un cours d'eau généralement pour améliorer le tirant d'eau principalement pour la navigation commerciale et, à l'occasion, pour la navigation de plaisance.

Tel qu'indiqué au tableau 2.4, les sédiments dragués sont considérés de classe 1 lorsque la concentration (non normalisée par rapport au carbone organique) de toutes les substances prioritaires, exprimée en poids sec, se situe au premier niveau (SSE) ou au-dessous de celui-ci. Les matériaux dragués sont alors jugés exempts de pollution et peuvent être utilisés sans restriction.

Tableau 2.3 Critères intérimaires retenus pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent (avril 1992)

PARAMÈTRES en µg/g ou µg/g pour 1 % COT ^a	NIVEAU 1 ^b (SSE)	NIVEAU 2 (SEM)	NIVEAU 3 (SEN)
Arsenic extractible	3,0	7	17
Cadmium extractible	0,2	0,9	3
Chrome extractible	55	55	100
Cuivre extractible	28	28	86
Mercure total	0,05	0,2	1
Nickel extractible	35	35	61
Plomb extractible	23	42	170
Zinc extractible	100	150	540
BPC (totaux)	0,02	0,2	1
Aroclor - 1016	-	0,01	0,4
Aroclor - 1248	-	0,05	0,6
Aroclor - 1254	-	0,06	0,3
Aroclor - 1260	-	0,005	0,2
Aldrine	0,0006	0,002	0,04
BHC (totaux)	-	0,005	0,1
α-BHC	0,0003	0,01	0,08
β-BHC	0,0002	0,03	0,2
γ-BHC	0,0009	0,003	0,009
Chlordane	0,001	0,007	0,03
DDD et p,p'-DDD	0,002	0,01	0,06
p,p'-DDE	0,002	0,007	0,05
DDT	0,006	0,009	0,05
Dieldrine	0,0001-0,0008	0,002	0,3
Endrine	0,001	0,008	0,5
HCB	0,001	0,03	0,1
Heptachlore	0,0003	0,0003	0,01
Heptachlore époxyde	0,001	0,005	0,03

Tableau 2.3 Critères intérimaires retenus pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent (Avril 1992) (suite)

PARAMÈTRES en µg/g ou µg/g pour 1 % COT ^a	NIVEAU 1 ^b (SSE)	NIVEAU 2 (SEM)	NIVEAU 3 (SEN)
Mirex	0,0001	0,011	0,8
HAP (haut poids moléculaire)	1	-	-
Benzo(a)anthracène	0,05-0,1	0,4	0,5
Benzo(a)pyrène	0,01-0,1	0,5	0,7
Benzofluoranthène	0,3	-	-
Benzo(ghi)pérylène	0,1	-	-
Chrysène	0,1	0,6	0,8
Dibenzo(ah)anthracène	0,005	-	-
Fluoranthène	0,02-0,2	0,6	2
Indéno(1,2,3, cd)pyrène	0,07	-	-
Pyrène	0,02-0,1	0,7	1
HAP (bas poids moléculaire)	0,1	-	-
Acénaphène	0,01	-	-
Acénaphylène	0,01	-	-
Anthracène	0,02	-	-
Fluorène	0,01	-	-
2-Méthylnaphtalène	0,02	-	-
Naphtalène	0,02	0,4	0,6
Phénanthrène	0,03-0,07	0,4	0,8

^a Tous les paramètres sont exprimés en microgrammes par gramme (µg/g) de sédiments secs à l'exception des paramètres organiques non polaires de niveau 3 qui sont exprimés en microgrammes par gramme de sédiments secs pour 1 p. 100 (1 %) de carbone organique total (COT). **Pour établir le critère de qualité d'un paramètre organique non polaire de niveau 3 (en ombragé) dans une situation donnée, il faut multiplier le critère de ce tableau par le pourcentage de COT de l'échantillon à évaluer jusqu'à un maximum de 10 % de COT.** (Ex. : Le SEN relatif aux BPC totaux dans un échantillon contenant 2 p. 100 (2 %) de COT sera établi à 1 µg/g x 2 = 2 µg/g.) Les valeurs inférieures à dix ont été arrondies à un chiffre significatif tandis que les valeurs supérieures à 10 ont été arrondies à 2 chiffres significatifs.

^b Lorsque la limite inférieure du domaine d'application d'une méthode d'analyse est supérieure au critère de niveau 1, cette limite doit être utilisée jusqu'à ce que des développements méthodologiques l'abaissent au niveau du critère retenu.

Tableau 2.4 Niveaux d'évaluation des sédiments et interventions en fonction du degré de contamination

CLASSE	NIVEAU	APPROCHE	EFFETS	GESTION DES MATÉRIAUX DRAGUÉS	RESTAURATION DE SITES CONTAMINÉS
4			Les dommages à l'environnement aquatique sont majeurs.	Les matériaux dragués doivent être traités ou confinés de façon sécuritaire.	On doit tarir les sources de contamination et envisager la possibilité de restaurer les milieux contaminés.
		Niveau 3 Seuil d'effets néfastes (SEN)			
		90 ^e percentile de la S.L.C. Niveau de contamination qui affecte 90 % des organismes benthiques.			
		↑			
3		Seuil inférieur de restauration (SIR)	Plage de teneurs où les organismes benthiques subissent des effets nuisibles.	Un examen attentif des répercussions environnementales reliées au dragage et à la mise en dépôt des sédiments devra être effectué. Des essais appropriés (bioessais, élutriation ou autres) et des analyses chimiques au site de dépôt devront être réalisés. On devra s'assurer que le dépôt ne contribue pas à détériorer la qualité du milieu récepteur.	Niveau visé pour les travaux de restauration. Il devra être établi cas par cas par une étude de risques ou par tout autre moyen adéquat. On doit envisager la possibilité de tarir les sources de contamination et de réduire la migration des contaminants vers des zones de meilleure qualité. La restauration du milieu ne constitue probablement pas une solution souhaitable.
		↓			
		Niveau 2 Seuil d'effets mineurs (SEM)			
		15 ^e percentile de la S.L.C. Niveau de contamination qui affecte 15 % des organismes benthiques.			
2			Plage de teneurs pouvant être tolérées par la majorité des organismes benthiques. Impacts potentiels sur les utilisations de l'eau.		
		Niveau 1 Seuil sans effet (SSE)			
		Teneur de fond. Niveau de référence considéré comme exempt de pollution.		De façon générale, les matériaux peuvent être rejetés en eaux libres ou utilisés à d'autres fins sans restriction. On s'assurera toutefois que le dépôt ne contribue pas à détériorer la qualité du milieu récepteur.	Aucune restauration n'est considérée.
1			Plage de teneurs sans effet chronique ou aigu sur les organismes benthiques, la qualité de l'eau ou sur ses usages.		

Les sédiments sont considérés de classe 2 lorsque la concentration des substances prioritaires, exprimée en poids sec, se situe à égalité ou au-dessous du niveau 2 (SEM). Les matériaux dragués peuvent alors être rejetés en eaux libres ou être utilisés à d'autres fins, après s'être assuré que le dépôt ne contribue pas à détériorer le milieu récepteur (p.ex., en regard de la présence d'organismes ou de milieux sensibles).

Lorsque les concentrations retrouvées excèdent le seuil d'effets mineurs (SEM) sans toutefois excéder le seuil d'effets néfastes (SEN), les sédiments sont considérés de classe 3 et la décision d'accepter ou d'empêcher le rejet en eaux libres doit être fondée sur une évaluation environnementale poussée du site de dépôt et sur des essais de laboratoire additionnels pour évaluer la toxicité des sédiments (bioessais, tests d'élutriation, etc.). Au plan de la contamination seulement, le site de dépôt doit présenter une contamination égale ou supérieure à celle des matériaux dragués pour que les matériaux dragués y soient acceptés. Dépendant de la sensibilité du site de dépôt, des analyses de risques pourraient être en plus demandées pour évaluer de façon plus approfondie les répercussions liées aux activités de dragage et de dépôt de sédiments contaminés.

Enfin, les sédiments sont considérés de classe 4 lorsque les concentrations excèdent le seuil d'effets néfastes : dans ce cas ils ne doivent pas être rejetés en eaux libres mais plutôt traités ou confinés de façon sécuritaire.

2.4.2 Application des critères pour la restauration de sites aquatiques contaminés. - Les critères pour la restauration de sites aquatiques contaminés sont également indiqués au tableau 2.4. Ainsi, jusqu'à la classe 4, c'est-à-dire lorsque les teneurs en contaminants sont inférieures au niveau SEN, la restauration du milieu ne constitue pas une solution souhaitable car les activités de restauration auraient probablement plus de répercussions négatives que de répercussions positives sur le milieu.

Lorsque les sédiments sont de classe 4 et présentent des concentrations excédant le seuil SEN, il faut procéder à l'identification et au contrôle des sources et

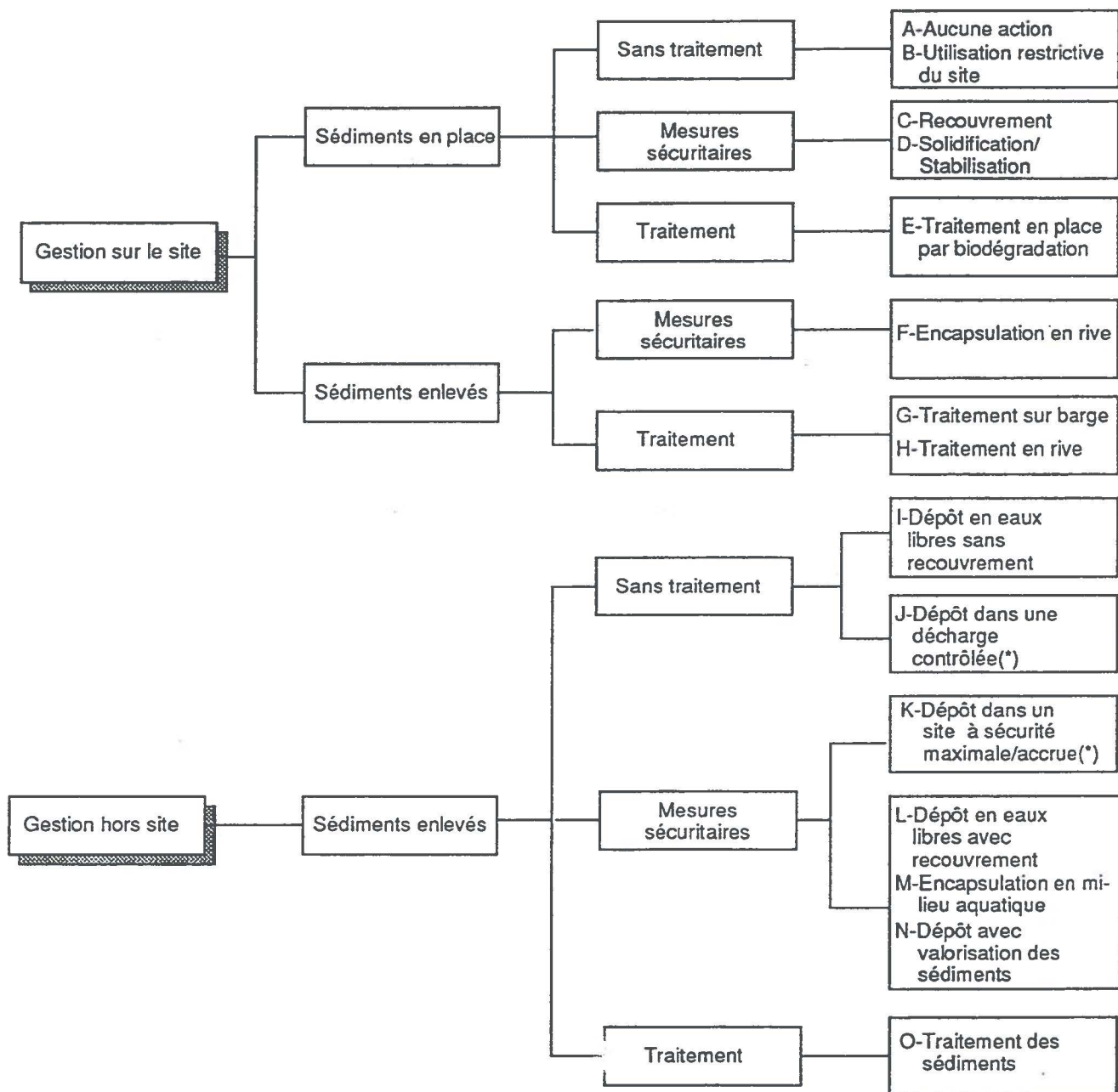
considérer la possibilité d'entreprendre des travaux de restauration, suite à une évaluation environnementale et à une analyse de risques.

Chaque cas doit être analysé sur une base de cas par cas pour déterminer le niveau de décontamination à atteindre (SIR), selon la situation prévalant au site à restaurer et dans l'environnement immédiat. Ce niveau de seuil inférieur de restauration (SIR) est fixé en fonction des éléments suivants : les teneurs de fond locales en contaminants, la qualité des sédiments des secteurs adjacents, les effets réels sur l'environnement, les risques pour la santé ou la sécurité humaine, les conditions hydrodynamiques et la faisabilité technique du projet et ses impacts socio-économiques.

2.5 Scénarios de traitement des sédiments contaminés

2.5.1 Catégorisation des scénarios de traitement. - La figure 2.1 identifie 15 scénarios possibles pour le traitement des sédiments contaminés, allant d'aucune action particulière à l'élimination totale des contaminants présents dans les sédiments soit par une gestion directement sur le site ou soit par une gestion hors site. Si on fait abstraction du site considéré, les premiers scénarios présentés devraient être plus faciles à réaliser alors que les derniers devraient soulever plus de contraintes de réalisation sur les plans technique et économique. Du point de vue économique, le classement proposé au plan technique conviendrait probablement, c'est-à-dire que les premiers scénarios seraient normalement les moins onéreux alors que les derniers devraient être, dans la plupart des cas, plus onéreux à réaliser. À noter que cette classification théorique pourrait sensiblement varier en fonction des particularités du site et suivant le stade de développement des technologies .

Par ailleurs, le tableau 2.5 montre que chacun des scénarios peut à son tour présenter plusieurs variantes selon les caractéristiques du site de réalisation des travaux, des techniques retenues pour l'excavation, pour le pré-traitement et le traitement des sédiments ou encore des techniques retenues pour le traitement des effluents et l'élimination des résidus de traitement.



(*) Avec assèchement préalable des matériaux dragués.

Figure 2.1 Scénarios de restauration possible pour les sédiments contaminés

Tableau 2.5 Scénarios de restauration/traitement de sédiments contaminés avec variantes possibles

SCÉNARIOS	VARIANTES
A-Aucune action	<ul style="list-style-type: none"> •Sans suivi environnemental •Avec suivi environnemental
B-Utilisation restrictive du site	<ul style="list-style-type: none"> •Sans suivi environnemental •Avec suivi environnemental
C-Recouvrement des sédiments en place	<ul style="list-style-type: none"> •Nature des matériaux de recouvrement •Méthodes de recouvrement
D-Stabilisation/solidification sur place	<ul style="list-style-type: none"> •Technologies de stabilisation/ solidification
E-Traitement en place par biodégradation	<ul style="list-style-type: none"> •Technologies de biodégradation
F-Encapsulation en rive	<ul style="list-style-type: none"> •Choix du site •Méthodes d'encapsulation •Avec ou sans pré-traitement des sédiments •Avec ou sans traitement des sédiments
G-Traitement sur barge	<ul style="list-style-type: none"> •Choix du site •Techniques de traitement •Techniques de pré-traitement et traitement des effluents
H-Traitement en rive	<ul style="list-style-type: none"> •Choix du site •Techniques de traitement •Techniques de pré-traitement et traitement des effluents
I-Dépôt en eaux libres sans recouvrement	<ul style="list-style-type: none"> •Avec ou sans traitement des sédiments •Choix du site
J-Dépôt terrestre dans un site d'enfouissement sanitaire	<ul style="list-style-type: none"> •Avec ou sans traitement des sédiments •Choix du site
K-Dépôt terrestre dans un site à sécurité maximale/accrue	<ul style="list-style-type: none"> •Choix du site •Avec ou sans pré-traitement •Avec ou sans traitement des sédiments
L-Dépôt en eaux libres avec recouvrement	<ul style="list-style-type: none"> •Choix du site •Méthodes de recouvrement •Nature et épaisseur des matériaux de recouvrement
M-Encapsulation en milieu aquatique	<ul style="list-style-type: none"> •Choix du site. •Méthodes de recouvrement •Nature et épaisseur des matériaux de recouvrement
N-Dépôt terrestre ou aquatique avec valorisation des sédiments	<ul style="list-style-type: none"> •Choix du site •Avec ou sans pré-traitement •Avec ou sans traitement des sédiments •Types et méthodes d'aménagement
O-Traitement hors site	<ul style="list-style-type: none"> •Technologies de pré-traitement •Technologies de traitement •Choix du site •Technologies de disposition/traitement des résidus

Tel qu'indiqué à la figure 2.1, si on exclut les deux premiers scénarios (A et B) qui ne comportent aucun traitement et qui sont présentés à titre de référence ou comme point de comparaison, six scénarios (C à H) sont proposés pour le traitement des sédiments directement sur le site. Ces scénarios sont regroupés selon les critères suivants : sédiments traités en place ou enlevés, et sédiments traités ou confinés de manière sécuritaire (p.ex., recouverts avec des matériaux propres).

Si les sédiments sont enlevés et que le traitement doive se faire hors site, la figure 2.1 suggère sept scénarios possibles selon les critères suivants : aucun traitement (I et J), confinement sécuritaire (K à N) et traitement (O).

2.5.2 Avantages et inconvénients des scénarios de traitement. - Les principaux avantages et inconvénients aux plans technique, économique et environnemental de chacun des scénarios de traitement présentés dans la section précédente sont résumés au tableau 2.6. Bien qu'a priori tous les scénarios privilégiant le traitement des sédiments contaminés devraient être favorisés, ceux-ci comportent néanmoins des risques non négligeables que les contaminants se retrouvent dans des milieux différents (eau, air, sol) en raison des fuites possibles des contaminants pendant leur excavation, leur transport et leur entreposage.

Chaque scénario doit donc être évalué sur une base de cas par cas en fonction, d'une part, des contraintes économiques et, d'autre part, des particularités du site au plan environnemental et en regard de la protection de la santé publique, de la nature de la contamination et des technologies de traitement disponibles au moment de la planification du scénario de traitement.

À noter que tous les scénarios envisageables pour le traitement des sédiments, avec une gestion hors site des sédiments, s'appliquent également pour la gestion des matériaux dragués contaminés dans le cadre des projets de dragage d'entretien régulier.

Tableau 2.6 Avantages et limites des divers scénarios de dépollution / traitement possibles pour les sédiments contaminés

SCÉNARIOS	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
A- Aucune action	<ul style="list-style-type: none"> . Aucun investissement requis. . Solution à considérer advenant que les impacts du dragage, du traitement/dépôt sont supérieurs au fait de laisser les sédiments en place ou que les contaminants se dégradent naturellement ou que la sédimentation est en voie d'isoler les sédiments contaminés. 	<ul style="list-style-type: none"> . Les risques de dégradation de la qualité de l'eau, des ressources biologiques et usages et pour la santé demeurent présents. . Nécessité d'un suivi continu. . Acceptation sociale difficile.
B- Utilisation restrictive du site	<ul style="list-style-type: none"> . Réduction des risques de contact avec les sédiments contaminés. . Réduction des risques de remise en solution ou en suspension des contaminants. . Solution économique. 	<ul style="list-style-type: none"> . Aucune protection des organismes aquatiques pouvant être en contact avec les sédiments contaminés. . Dans certains sites, la relocalisation de la navigation ou des restrictions saisonnières demeurent impossibles. . Acceptation sociale difficile.
C- Recouvrement des sédiments en place	<ul style="list-style-type: none"> . Facilité de réalisation. . Solution relativement peu dispendieuse. . Aucun transport requis. . Efficacité environnementale démontrée. . Empêche la diffusion et la convection des contaminants dans la colonne d'eau et un contact direct des organismes benthiques avec les contaminants. . Évite le transport de sédiments contaminés en milieu urbain. 	<ul style="list-style-type: none"> . Risques toujours possibles de migration des contaminants. . Nécessité d'une maintenance et d'un suivi à long terme. . La nécessité de maintenir un tirant d'eau suffisant peut exclure ou limiter sa réalisation. . Acceptation sociale difficile.
D- Solidification/stabilisation sur place	<ul style="list-style-type: none"> . Efficacité environnementale de la solution démontrée. . Aucun transport des sédiments requis. . Coûts de réalisation relativement faibles. . Faibles risques pour les travailleurs et la population pendant les travaux. 	<ul style="list-style-type: none"> . Les contaminants ne sont pas détruits mais seulement fixés. . Le contenu en substances organiques peut être un facteur limitant. . L'augmentation du volume des sédiments entraîne une réduction du tirant d'eau limitant son utilisation dans les ports. . Nécessité d'un suivi à long terme.
E- Traitement en place par biodégradation	<ul style="list-style-type: none"> . Coûts de réalisation relativement faibles. . Faibles risques pour les travailleurs et la population pendant les travaux. . Accélère les processus de biodégradation naturelle. 	<ul style="list-style-type: none"> . L'efficacité de la solution reste à être démontrée. . La nature de la contamination peut être un facteur limitant. . La durée de traitement peut être un facteur limitant si la restauration est urgente en raison des ressources et usages du site. . Solution difficile à réaliser en raison de la nécessité d'ajout d'oxygène ou d'éléments nutritifs ou microorganismes.
F- Encapsulation en rive	<ul style="list-style-type: none"> . Solution peu dispendieuse. . Possibilité de valorisation du site à des fins industrielles ou récréatives. 	<ul style="list-style-type: none"> . Risques permanents de migration des contaminants. . Acceptation sociale difficile.
G- Traitement sur barge	<ul style="list-style-type: none"> . Évite le transport des sédiments sur de longues distances. . Les contaminants sont définitivement détruits. 	<ul style="list-style-type: none"> . Unité commerciale non disponible. . Entrave possible à la navigation commerciale et de plaisance. . Solution très onéreuse.

Tableau 2.6 Avantages et limites des divers scénarios de dépollution / traitement possibles pour les sédiments contaminés (suite)

SCÉNARIOS	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
H- Traitement en rive	<ul style="list-style-type: none"> Évite le transport des sédiments sur de longues distances Les contaminants sont définitivement détruits. 	<ul style="list-style-type: none"> Unité commerciale non disponible. Superficie de terrain requis pas toujours disponible. Solution très onéreuse.
I- Dépôt en eaux libres sans recouvrement	<ul style="list-style-type: none"> Solution la plus économique et plus facilement réalisable techniquement et rapidement. 	<ul style="list-style-type: none"> Solution non applicable en présence de sédiments contaminés ou à moins que le site de dépôt ne présente une contamination plus élevée. Risques de contamination d'autres milieux. Impacts potentiels pendant les travaux non négligeables. Acceptation sociale difficile.
J- Dépôt terrestre dans un site d'enfouissement sanitaire	<ul style="list-style-type: none"> Solution relativement économique. Solution techniquement facile à réaliser. 	<ul style="list-style-type: none"> Risques de contamination d'autres milieux. Nécessite la déshydratation préalable de sédiments. Application limitée à des sédiments faiblement contaminés ou à des sédiments traités. Transport de sédiments contaminés.
K- Dépôt terrestre dans un site à sécurité accrue/maximale	<ul style="list-style-type: none"> Sites disponibles. Solution à considérer en l'absence de sites de traitement. 	<ul style="list-style-type: none"> Risques de contamination d'autres milieux. Nécessite la déshydratation préalable de sédiments. Non recommandée en présence d'une forte contamination. Acceptation sociale difficile. Solution relativement onéreuse. Transport de sédiments contaminés en milieu urbain.
L- Dépôt en eaux libres avec recouvrement	<ul style="list-style-type: none"> Solution économique et facilement réalisable au plan technique. Efficacité environnementale assurée. Empêche la diffusion et la convection des contaminants dans la colonne d'eau et un contact direct des organismes benthiques avec les contaminants. Évite le transport de sédiments contaminés en milieu urbain. 	<ul style="list-style-type: none"> Stabilité et efficacité à long terme de la solution non assurées. Risques permanents de migration des contaminants. Nécessite une maintenance et un suivi à long terme. La nécessité de maintenir un tirant d'eau suffisant peut limiter sa réalisation. Acceptation sociale difficile.
M- Encapsulation en milieu aquatique	<ul style="list-style-type: none"> Minimise le relargage de contaminants dans les eaux de surface; évite une contamination atmosphérique et une contamination des eaux souterraines. 	<ul style="list-style-type: none"> Solution non recommandée en présence de sédiments fortement contaminés. Nécessite un suivi à long terme. Acceptation sociale difficile.
N- Dépôt terrestre ou aquatique avec valorisation des sédiments	<ul style="list-style-type: none"> Création d'habitats pour la faune. Stabilisation des rives. Amendement des sols agricoles. Source de matériaux à des fins de construction. 	<ul style="list-style-type: none"> Solution applicable uniquement pour des sédiments faiblement contaminés ou pour des sédiments traités ou confinés sécuritairement pour empêcher la migration de contaminants. Nécessite un suivi à long terme.
O- Traitement hors site	<ul style="list-style-type: none"> Les contaminants sont définitivement détruits et ne posent plus de risques pour l'environnement. Acceptation sociale la plus élevée. 	<ul style="list-style-type: none"> Solution très onéreuse. L'efficacité de la plupart des technologies doit être encore démontrée pour une réalisation à grande échelle.

2.5.3 Critères d'évaluation et de choix des scénarios de traitement. - Le tableau 2.7 propose enfin des critères pour évaluer les performances technique, économique et environnementale des divers scénarios pouvant être considérés pour le traitement des sédiments contaminés. Ces critères visent premièrement à s'assurer que toutes les composantes du plan de traitement (dragage, transport, stockage, traitement, pré-traitement et traitement des effluents et des résidus) soient prises en considération dans la sélection du scénario et ce aussi bien au point de vue de sa faisabilité environnementale que de sa faisabilité technique, économique et sociale. Deuxièmement, ils visent à s'assurer que les scénarios retenus soient optimaux, compte tenu de la problématique environnementale et sociale du site.

Tableau 2.7 Critères d'évaluation des scénarios de traitement des sédiments contaminés

FACTEURS	CRITÈRES D'ÉVALUATION
Technique	<ul style="list-style-type: none"> . Caractéristiques physico-chimiques des sédiments . Nature de la contamination (organique, inorganique ou les deux) . Volume de sédiments contaminés . Technologies de pré-traitement disponibles . Technologies de traitement disponible (sédiments et eaux résiduelles) . Configuration et dimension du site . Faisabilité technique de réalisation . Durée de vie ou permanence du scénario . Durée totale des travaux(ingénierie, études environnementales, démonstration et réalisation) . Risques technologiques . Compatibilité des technologies (dragage, transport, stockage, pré-traitement et traitement des effluents) . Flexibilité . Efficacité de la solution . Besoins de maintenance et suivi à long terme
Économique	<ul style="list-style-type: none"> . Coûts de réalisation du projet (ingénierie, construction, exploitation, maintenance) . Coûts des études environnementales . Coûts de traitement des sédiments (dragage, transport, stockage, pré-traitement et traitement) . Coûts d'élimination des résidus de traitement . Coûts du suivi environnemental pendant et après les travaux . Fonds disponibles pour la restauration . Coûts de démonstration des technologies (pilote et démonstration à grande échelle)
Environnemental	<ul style="list-style-type: none"> . Impacts sur l'environnement et la santé humaine des sédiments contaminés . Impacts sur l'environnement de la manipulation des sédiments contaminés (dragage, transport, stockage, pré-traitement et traitement) . Risques de la manipulation des sédiments contaminés, pour les travailleurs et la population (dragage, transport, stockage, pré-traitement et traitement) . Importance des impacts sur l'environnement et la santé humaine (avec ou sans restauration) : court ou long termes, locaux ou régionaux, réversibles ou irréversibles . Efficacité environnementale (court, moyen et long termes) . Acceptation sociale . Conformité avec la réglementation et les politiques gouvernementales . Programmes de contrôle et de suivi environnemental . Réduction de la mobilité, de la toxicité ou du volume des sédiments contaminés . Ressources et usages sensibles sur ou à proximité du site

3 TECHNOLOGIES DE PRÉ-TRAITEMENT DES SÉDIMENTS

3.1 Objectifs

Par définition, les technologies de pré-traitement des sédiments sont utilisées pour préparer les matériaux de dragage en vue de leur transport, de leur traitement ou de leur mise en dépôt. Ces technologies ne sont toutefois pas efficaces pour enlever ou traiter les contaminants présents dans les sédiments.

Habituellement, le pré-traitement est considéré pour satisfaire un ou plusieurs des objectifs suivants (Averett *et al.*, 1990; USEPA, 1991b) :

- a) Conditionner les matériaux de dragage en vue de leur traitement et (ou) de leur mise en dépôt;
- b) Favoriser ou accélérer la sédimentation des parties solides;
- c) Réduire le contenu en eau pour faciliter le transport, le traitement et (ou) la mise en dépôt;
- d) Séparer les parties grossières, potentiellement non contaminées, des parties fines, généralement plus contaminées;
- e) Réduire globalement les coûts de dépollution.

3.2 Procédés de pré-traitement

Tel qu'illustré à la figure 3.1, les technologies de pré-traitement des sédiments peuvent être regroupées en trois catégories : déshydratation, injection de produits dans les boues draguées et classification des particules.

3.2.1 Déshydratation. - Dans les sédiments fins, les matériaux dragués par des dragues mécaniques ont en général un contenu en eau de 50 p. 100, alors qu'avec les dragues hydrauliques le contenu en eau peut être de 90 p. 100 et plus. Or, l'efficacité de certaines technologies de traitement est sensiblement réduite lorsque les matériaux

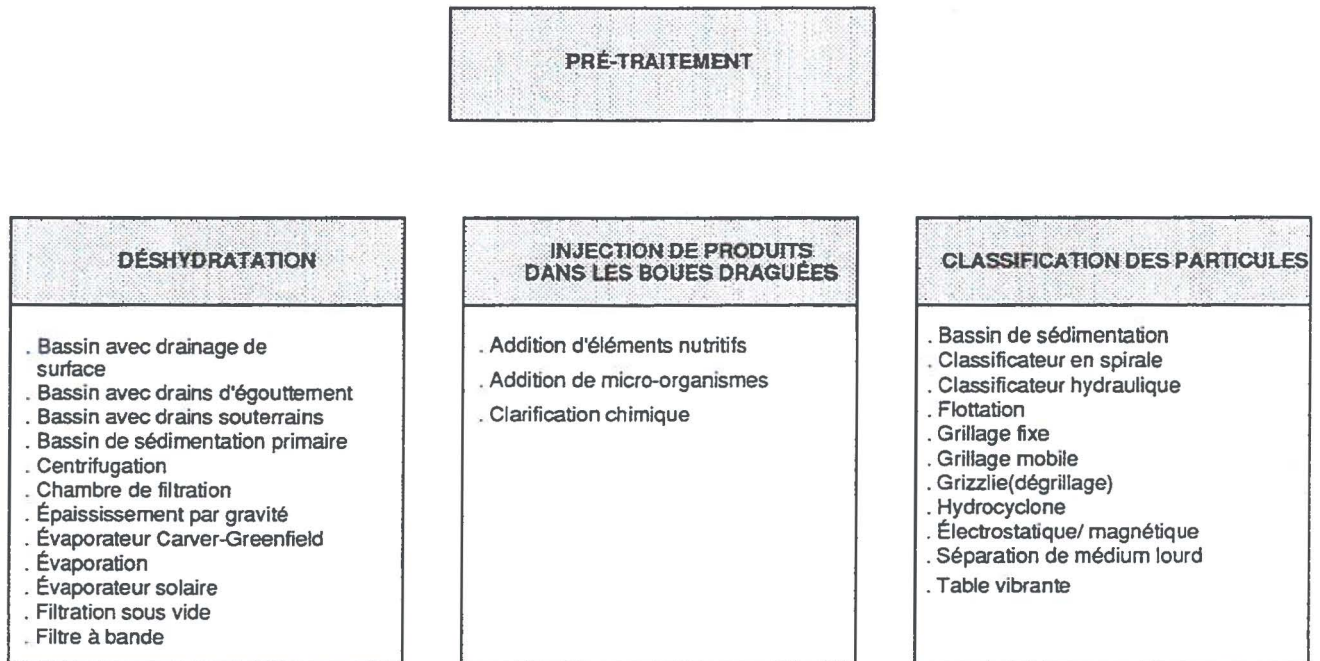


Figure 3.1 Options de pré-traitement considérées pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs

à traiter contiennent de fortes proportions d'eau. Les techniques de déshydratation visent donc essentiellement à réduire le contenu en eau des sédiments pour une ou plusieurs des raisons suivantes :

- faciliter la manutention des sédiments;
- réduire les besoins en énergie advenant leur incinération;
- réduire les coûts de traitement de la plupart des technologies , en particulier des technologies thermiques;
- faciliter le dépôt des sédiments en milieu terrestre;
- réduire les coûts de transport par réduction de volume et de poids;
- réduire les volumes des matériaux à traiter ou à mettre en dépôt (USEPA, 1991b).

La déshydratation des matériaux dragués peut être réalisée par des processus plus ou moins passifs de séchage à l'atmosphère ou par des procédés mécaniques ou thermiques. Dans le premier cas, les matériaux sont simplement asséchés dans des bassins de sédimentation par gravité et évaporation naturelle ou en favorisant leur drainage. Dans le second cas, l'eau est extraite des sédiments par pression mécanique à filtration (filtre à bande, chambre de filtration, filtration sous vide), par centrifugation (centrifugeuse à panier, à cuvette solide), épaissement par gravité (réservoir en écoulement continu) ou encore évaporation (évaporateur à film mince, tubulaire, à bouilloire, solaire ou de type Carver-Greenfield).

Les procédés mécaniques de déshydratation sont utilisés depuis plusieurs années pour traiter les boues municipales et industrielles. La plupart des procédés permettent d'obtenir une réduction de 50 p. 100 du contenu en eau. Toutefois, la performance de ces procédés peut être influencée par les variations du contenu en argile et en substances organiques des sédiments et elle est meilleure pour des effluents de composition homogène (Averett *et al.*, 1990; USEPA, 1991b).

3.2.2 Injection de produits dans les boues draguées. - Dans le cas de projets de dragage hydraulique, l'injection de produits dans les boues prend avantage du processus de mélange disponible dans le pipeline utilisé pour le transport des

matériaux de dragage. Les produits d'injection utilisés peuvent être des produits chimiques (polymères ou flocculants) qui conditionnent les sédiments pour leur traitement subséquent ou pour accélérer la sédimentation des particules au site de dépôt, ou des microorganismes ou des éléments nutritifs afin d'améliorer la biodégradation des substances organiques à ces mêmes sites de dépôt. Il faut noter que l'injection de produits chimiques peut être également réalisée à l'intérieur même des bassins (par exemple, entre deux bassins de sédimentation).

3.2.3 Classification des particules. - La technologie de classification des particules sépare les boues selon leur granulométrie et enlève les particules grossières incompatibles avec les procédés de traitement subséquents. Dans la gestion des sédiments contaminés, cette classification en fonction de la granulométrie est importante vu que les contaminants s'accumulent principalement dans la partie fine et organique des sédiments. La partie fine peut être traitée pendant que la partie plus grossière, relativement non contaminée, peut être mise en dépôt après un traitement minimum ou sans aucun traitement additionnel (USEPA, 1991b).

Les technologies de séparation des particules à considérer pour un site donné doivent tenir compte des caractéristiques suivantes :

- le volume de sédiments contaminés;
- la composition des sédiments à savoir la granulométrie et les pourcentages de solides et d'argile qu'ils contiennent;
- la nature de la contamination;
- le type de drague utilisé;
- l'environnement du site, incluant les superficies de terrain disponibles à proximité.

Par ailleurs, il convient de rappeler que le choix de certaines technologies est fonction uniquement de la granulométrie ou de la densité des particules, alors que d'autres technologies tiennent compte à la fois de la granulométrie et de la densité des particules. Des propriétés conductrices ou magnétiques des particules peuvent aussi influencer le choix d'autres technologies.

Tel qu'illustré à la figure 3.1, les technologies de classification ou de séparation des particules incluent les bassins de sédimentation, les clarificateurs hydrauliques et à vis hélicoïdale, la flottation, les grillages fixes ou mobiles, les grilles à barreaux, les hydrocyclones, les séparateurs électrostatiques/magnétiques, la séparation de médium lourd et les tables secouées.

3.3 Applications et limites des procédés de pré-traitement

Les applications, les limites, les impacts secondaires et les coûts relatifs inhérents à certains procédés de pré-traitement en ce qui concerne la déshydratation sont récapitulés dans le tableau 3.1, et au tableau 3.2 pour ce qui est des procédés de classification des particules.

En ce qui a trait aux divers *procédés de déshydratation par évaporation*, le tableau 3.1 fait ressortir essentiellement que les procédés de séchage à l'air libre dans les bassins de sédimentation, avec ou sans amélioration du drainage ou de la consolidation et de l'évaporation par des drains souterrains, par des pompes et des fossés de drainage, peuvent s'appliquer à une gamme de sédiments. Ces bassins requièrent toutefois des terrains de grandes dimensions, plus de main-d'oeuvre et une plus longue période de traitement tout en présentant des risques de remise en suspension et en solution des contaminants dans l'environnement (air, sol, eaux de surface et souterraines, végétation et faune) par lessivage, infiltration, drainage ou volatilisation.

Quant aux procédés mécaniques de déshydratation (filtre-presses, chambre de filtration sous vide), ils permettent d'obtenir une efficacité plus élevée et un meilleur contrôle des risques de fuites dans l'environnement. Ces procédés requièrent généralement beaucoup d'entretien et sont pour la plupart coûteux et énergivores.

En plus des facteurs mentionnés à la section 3.2.2, le tableau 3.2 fait ressortir que le choix des *procédés de classification des particules* pour un site donné est essentiellement conditionné par la granulométrie des sédiments et la proportion des solides ainsi que par le type de contaminants à traiter. Certains équipements nécessitent en outre plus de maintenance en raison de leurs parties mobiles. Ils

Tableau 3.1 Applications et limites des procédés de déshydratation des sédiments

TECHNIQUES	APPLICATIONS	LIMITES	IMPACTS SECONDAIRES	COÛTS RELATIFS
Bassin de sédimentation	Déshydratation de sédiments de n'importe quelle granulométrie contenant jusqu'à 60 % de solides avec un rendement allant jusqu'à 99 % pour les solides en suspension. Généralement utilisé lors des dragages importants lorsque des terrains sont disponibles.	Nécessite des terrains de grande superficie. Temps nécessaire pour la mise en route. Coûts élevés de la main d'oeuvre reliés à l'excavation ou la déshydratation. Les systèmes utilisant un drainage gravitaire ont tendance à colmater. Les systèmes de drainage sous vide nécessitent beaucoup de maintenance et de supervision. Les systèmes basés sur l'électro-osmose sont coûteux.	Risques de contamination des eaux souterraines. Problèmes potentiels d'odeurs et de pollution de l'air à proximité.	Faibles à élevés.
Filtre à bande	Utilisé pour déshydrater des sédiments à grains fins. Le filtrat peut contenir jusqu'à 45-70 % de solides (1); captation des solides jusqu'à 85-95 %. Système de filtration le plus approprié pour des systèmes mobiles de traitement.	Performances fortement reliées aux caractéristiques physico-chimiques des matériaux à l'alimentation. Détérioration rapide des bandes en présence de matériaux abrasifs.	Production de grandes quantités d'eaux usées devant être traitées.	Moyens
Chambre de filtration	Utilisée pour déshydrater des sédiments à grains très fins. Le filtrat peut contenir jusqu'à 50-80 % de solides (*); captation des solides jusqu'à 98 %.	Coûteux et énergivore. Temps nécessaire pour remplacer le médium filtrant.	Produit une eau de lavage devant être traitée.	Élevés
Filtration sous vide	Utilisée pour déshydrater des sédiments à grains fins. Le filtrat peut contenir jusqu'à 35-40 % de solides; captation des solides jusqu'à 88-95 %.	Système de filtration le moins efficace pour déshydrater. Énergivore.	Produit une eau de lavage devant être traitée.	Élevés
Centrifugeuse à bol plein	Épaississement ou déshydratation des sédiments; apte à produire une boue déshydratée avec 15-35 % de solides; captation des solides varie habituellement de 90 à 98 %. Recommandée pour des applications avec espaces limités.	Déshydratation pas aussi efficace que la filtration ou le lagunage. Procédé pouvant entraîner une accumulation des particules fines dans l'effluent de la centrifugeuse. Abrasion du rouleau.	Pas d'impacts secondaires significatifs.	Moyens à élevés

Tableau 3.1 Applications et limites des procédés de déshydratation des sédiments (suite)

TECHNIQUE	APPLICATIONS	LIMITES	IMPACTS SECONDAIRES	COÛTS RELATIFS
Centrifugeuse à panier	Épaississement ou déshydratation des sédiments; apte à produire une boue déshydratée avec 15-35 % de solides; captation des solides varie habituellement de 90 à 98 %. Recommandée pour des applications avec espaces limités.	Déshydratation pas aussi efficace que celle obtenue avec la centrifugeuse à bol plein, la filtration ou les lagunes de déshydratation. Procédé pouvant entraîner une accumulation des particules fines dans l'effluent de la centrifugeuse. Nécessite des systèmes de contrôle complexes pour opérer en continu.	Pas d'impacts secondaires significatifs.	Moyens à élevés
Épaississement par gravité	Épaississement des boues de dragage pour produire un concentré pouvant être déshydraté par filtration ou par lagunage. Apte à produire un produit avec une concentration de solides de 15 à 20 %.	Méthode la moins efficace pour déshydrater des boues de dragage. Nécessite des espaces de terrains considérables.	Problèmes potentiels d'odeurs et de pollution de l'air à proximité du site.	Faibles à moyens
Évaporateur*	Déshydratation utilisant la chaleur pour vaporiser les liquides ou les composés volatils de solutions liquides visqueuses, les boues, les mélanges de solides en suspension, les boues contaminées avec des huiles et des graisses, des solides et des résines.	L'évaporation est difficilement réalisable pour traiter de grandes quantités de sédiments.	Problèmes potentiels d'odeurs et de pollution de l'air à proximité du site.	Moyens à élevés

Remarque*: Pourcentage de solides peut représenter des valeurs optimales et ne représente pas nécessairement les valeurs normalement souhaitées. Les sédiments dragués ont souvent une granulométrie fine et sont difficiles à déshydrater aux valeurs maximum indiquées.

Source: USEPA (1991b); Averett *et al*, (1990).

Tableau 3.2

Applications et limites des procédés de classification des particules

TECHNIQUES	APPLICATIONS	LIMITES	IMPACTS SECONDAIRES	COÛTS RELATIFS
Bassin de sédimentation	Utilisé pour enlever des particules jusqu'à une granulométrie de 20 à 30 microns sans flocculants, et aussi bas que 10 microns avec l'ajout de flocculants. Stockage temporaire des matériaux dragués. Séparation des sédiments selon leur granulométrie.	Nécessite de grandes superficies de terrains. Temps d'installation.	Risques de contamination des eaux souterraines	Élevés
Classificateur hydraulique	Utilisé pour enlever les particules des boues dans une gamme de dimensions de 74 à 149 microns (sable fin à grossier).	Rendement hydraulique limité à environ 250 à 300 tonnes à l'heure quelle que soit la grosseur de l'unité. Incapacité à obtenir une séparation nette en fonction de la grosseur des particules. Nécessite de grands terrains pour des dragages importants ou en présence de fortes concentrations de solides .	Aucun impact significatif	Moyens
Hydrocyclone	Utilisé pour séparer et classer les solides de dimension de 2000 microns ou plus jusqu'à 10 microns ou moins	Pas recommandé pour des boues de dragage avec des concentrations de solides supérieures à 10 à 20 %. Pas efficace pour séparer les boues liquides très visqueuses, avec des concentrations de solides supérieures à 30 % ou pour des particules de gravité spécifique de 2,5 à 3,2. Peu efficace pour les boues liquides à haut contenu en argile; nécessite une dilution des boues ou l'injection de dispersants.	Aucun impact significatif	Moyens

Tableau 3.2 Applications et limites des procédés de classification des particules (suite)

TECHNIQUES	APPLICATIONS	LIMITES	IMPACTS SECONDAIRES	COÛTS RELATIFS
Classificateur à vis hélicoïdale	Utilisé pour laver, déshydrater et séparer le sable et les graviers jusqu'à 3/8 " de dia. En combinaison avec des séparateurs hydrauliques, il permet la séparation des matériaux fins tels l'argile et le limon.		Aucun impact significatif	Faibles
Flottation	Utilisée par l'industrie minière pour séparer les particules variant entre 0,1 à 0,01 mm.	Dimension des particules doit être réduite pour permettre aux bulles d'air de mettre en suspension les particules fines et les contaminants. Agents de conditionnement parfois nécessaires.	Aucun impact significatif	Moyens
Grillage fixe / mobile et grille à barreaux	Utilisé pour séparer les particules de dimensions variées. Équipement mobile très efficace.	Les particules grossières séparées par les grillages fixes peuvent contenir également beaucoup de particules fines. Le contenu en eau et la nature abrasive des matériaux peuvent être contraignants pour l'utilisation des grillages mobiles.	Aucun impact significatif.	Moyens
Électrostatique / magnétique	Utilisé dans l'industrie minière pour enlever les impuretés du minerai.	Peu efficace si les contaminants sont dispersés dans les sols. Comme les boues liquides doivent avoir une granulométrie de 100 microns ou moins, application limitée pour les sédiments.	Aucun impact significatif.	Moyens

Tableau 3.2 Applications et limites des procédés de classification des particules (suite)

TECHNIQUES	APPLICATIONS	LIMITES	IMPACTS SECONDAIRES	COÛTS RELATIFS
Séparation de médium lourd	<p>Utilisé dans l'industrie minière pour séparer les huiles des résidus et des matériaux solides avec des densités absolues différentes.</p> <p>Les solides sont déposés dans un fluide de gravité spécifique de façon à ce que les fractions solides plus légères flottent pendant que les fractions lourdes se déposent.</p>	<p>Mise en solution des solides.</p> <p>Présence de particules solides de densité différente.</p>	Aucun impact significatif.	Moyens

Sources : USEPA (1991b); Averett *et al.* (1990).

existent pour la plupart en plusieurs variétés et dimensions et offrent plusieurs possibilités d'application dans le traitement des sédiments.

Quant aux *technologies d'injection de produits dans les boues draguées*, elles peuvent s'appliquer uniquement dans le cadre de projets avec dragage hydraulique puisqu'elles peuvent prendre avantage du pouvoir de mélange associé à ce type de dragage. L'ajout de produits chimiques pour favoriser la sédimentation requiert habituellement des bassins de sédimentation assez grands pour assurer un mélange efficace. L'ajout de microorganismes pour favoriser la biodégradation n'a pas encore été démontré sur des volumes importants de matériaux dragués (USEPA, 1991b).

3.4 Exemples de procédés démontrés de pré-traitement des sédiments

3.4.1 Procédés néerlandais. - Les expériences de traitement des sédiments contaminés réalisées depuis presque 10 ans par l'organisation néerlandaise pour la recherche appliquée (*Netherlands Organization for Applied Scientific Research, TNO*) ont démontré que les sédiments pouvaient être séparés en deux fractions par hydrocyclones, l'une relativement propre et l'autre dans laquelle les contaminants sont concentrés (Van Veen, 1988).

Ces recherches ont également démontré que bien que la technique de l'hydrocyclonage puisse être appliquée à des sédiments contaminés tant par des métaux lourds que par des substances organiques (huiles, HAP, etc.), il pouvait arriver que des contaminants se retrouvent autant dans les parties grossières que dans les parties fines, dépendant de la nature des sols ou des sédiments en présence (Annokkee, 1989).

La figure 3.2 illustre le scénario en voie de développement par le gouvernement néerlandais pour le traitement des sédiments contaminés à l'intérieur duquel les technologies de pré-traitement constituent des composantes essentielles.

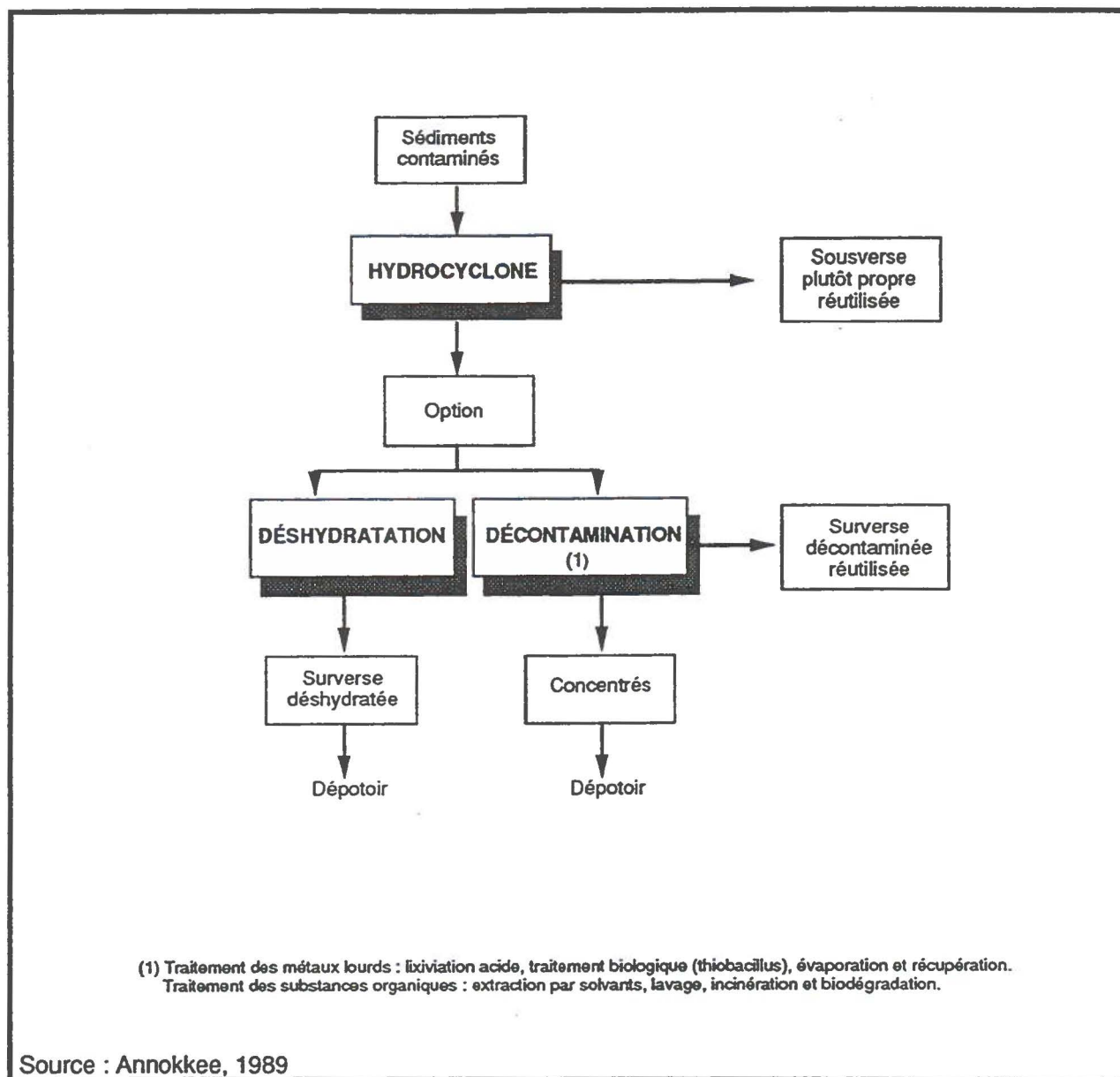


Figure 3.2 Scénario de traitement des sédiments contaminés en Hollande

Selon ce scénario, les sédiments contaminés peuvent être traités selon deux voies principales : (1) classification par hydrocyclone et par déshydratation (2) classification par hydrocyclone et décontamination par des technologies de traitement (biologique, thermique, extraction physico-chimique et lavage). Ces technologies seront présentées au chapitre 4.

Tel qu'indiqué à la figure 3.2, la première étape des deux voies de traitement est la classification par hydrocyclone qui sépare les sédiments en deux fractions : la première avec un contenu faible en contaminants, la sousverse (fraction principalement composée de sable), alors que les contaminants sont concentrés dans la seconde fraction, la surverse; cette dernière, appelée aussi fraction vaseuse, est constituée généralement de grains fins et de matières organiques. La deuxième étape des deux voies de traitement consiste en une déshydratation (étape de réduction de volume) ou en une décontamination (étape pour réduire le niveau de contamination de la surverse) (Van Veen, 1988; Van Dillen, 1989).

Pour les projets de dragage ou de dépollution de sédiments contaminés, les projets de recherche ont permis de préciser que les procédés de classification des particules ne sont pas toujours couronnés de succès parce qu'ils dépendent fortement du rapport limon/sable. Lorsque ce rapport est élevé, l'hydrocyclonage n'est pas approprié et la totalité des sédiments est déshydratée ou décontaminée (Van Veen, 1988).

En combinant l'hydrocyclonage et la déshydratation (filtres à bande, centrifugeuses), des réductions de volumes variant de 70 à 95 p. 100 peuvent être obtenues (Van Veen, 1988; Annokkee, 1989). Dans la plupart des cas, des applications à échelle réelle ont démontré que des réductions de volume de 70 p. 100 pouvaient être obtenues. Les coûts de capitalisation et d'exploitation des technologies de déshydratation par filtres à bande sont approximativement de 7,00 \$/m³ pour une unité de 100 m³/h et d'environ de 5,00 \$/m³ pour une unité de 1000 m³/h (\$ CAN). Ces coûts ne comprennent toutefois pas les coûts des travaux civils, des barges flottantes, des édifices, de l'automatisation et des installations électriques (Van Veen, 1988).

Par ailleurs, considérant que les équipements mécaniques de déshydratation disponibles actuellement sur le marché ont une capacité maximale d'environ 50 m³/h, leur utilisation dans un projet de dragage normal, avec des rendements de dragage pouvant varier entre 100 à 15 000 m³/h, peut parfois être difficilement réalisable. La multiplication des unités de déshydratation n'est pas toujours envisageable en raison des coûts impliqués et des espaces requis pour ces équipements (Van Veen, 1988). La capacité des hydrocyclones peut quant à elle être

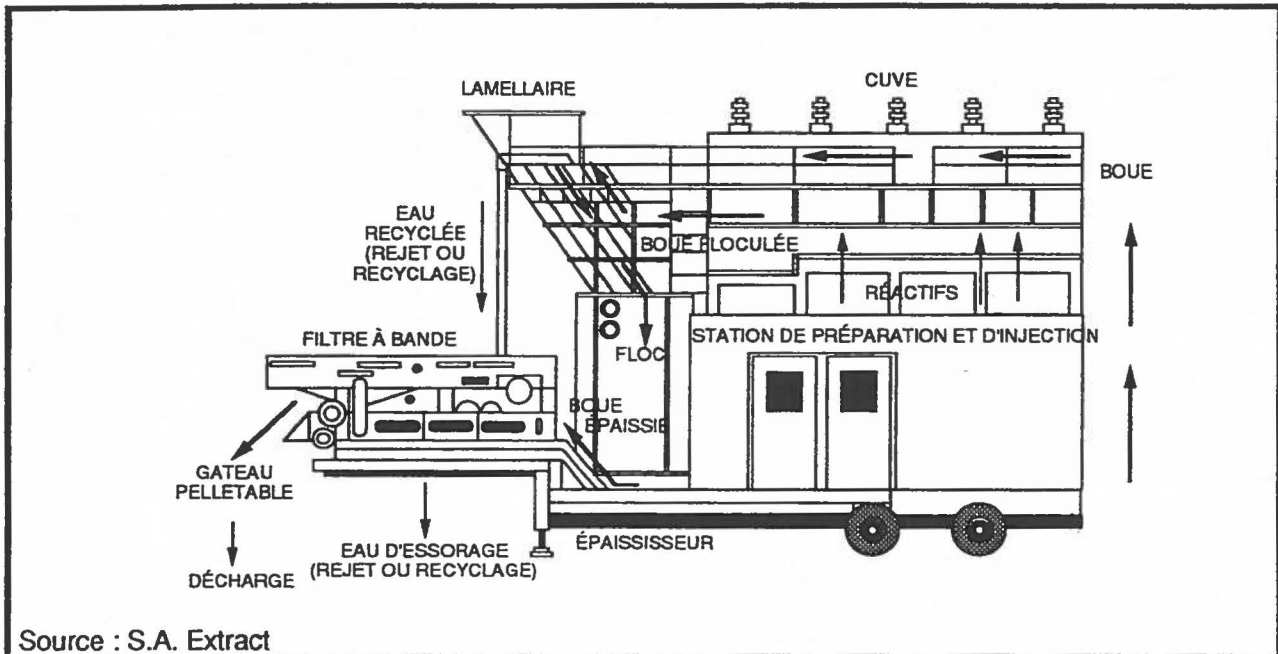
facilement adaptée à celle de la drague en multipliant le nombre d'hydrocyclones puisque le prix de ceux-ci est moins élevé.

3.4.2 Procédé français. - Depuis 1986, la société française S.A. Extract expérimente et perfectionne un service complet d'extraction et de traitement in situ et en temps réel des sédiments et des boues industrielles dragués. Jusqu'à présent, des centaines de milliers de mètres cubes de sédiments ont été traités en France, en Hollande et en Angleterre.

L'ensemble de traitement/déshydratation monté sur semi-remorque pour le traitement et le kit pour le dégrillage/hydrocyclonage opère de la façon suivante :

- a) les produits en provenance de la drague subissent un dégrillage pour éliminer tous les gros éléments (graviers, branches, feuilles);
- b) les produits passent ensuite dans une série d'hydrocyclones pour séparation des sables jusqu'à 60 microns (coupure plus fine possible);
- c) la boue débarrassée des détritux et des sables est homogénéisée dans un bac de 30 m³;
- d) la boue est ensuite déstabilisée par injection en ligne de flocculants avant de passer dans un épaisseur où elle doit subir un brassage lent destiné à favoriser la séparation liquide/solides;
- e) l'eau libérée par l'épaisseur passe dans un décanteur lamellaire où elle subit une épuration finale;
- f) les boues épaissies sont pompées à la base de l'épaisseur et envoyées sur une presse à bande qui donne à la sortie un produit déshydraté et pelletable, ayant une siccité de 30 à 50 p. 100.

La figure 3.3 présente une vue en coupe de cette unité de traitement.



Source : S.A. Extract

Figure 3.3 *Vue en coupe de l'unité mobile S.A. Extract de pré-traitement des sédiments*

La compagnie Extract dispose de deux unités mobiles de traitement suivant que les quantités à traiter sont inférieures ou supérieures à 30 000 m³. Les techniciens de la drague et de l'unité de traitement sont continuellement en liaison radio au cours des opérations.

3.4.3 Procédé belge. - La compagnie Silt N. V. de Belgique dispose également de deux installations (petits ou grands débits) démontables équipées d'hydrocyclones et de filtres-presses en série pour le traitement de petites quantités de sédiments dragués. Les résultats obtenus avec ces unités conçues pour réduire le volume de boues à stocker et pour séparer/récupérer la fraction sable contenue dans les sédiments, ont démontré que le sable récupéré satisfaisait aux normes imposées et pouvait être retourné dans l'environnement tandis que les boues concentrées en contaminants doivent être traitées ou confinées de façon sécuritaire.

La figure 3.4 illustre le schéma de principe de cette installation de pré-traitement.

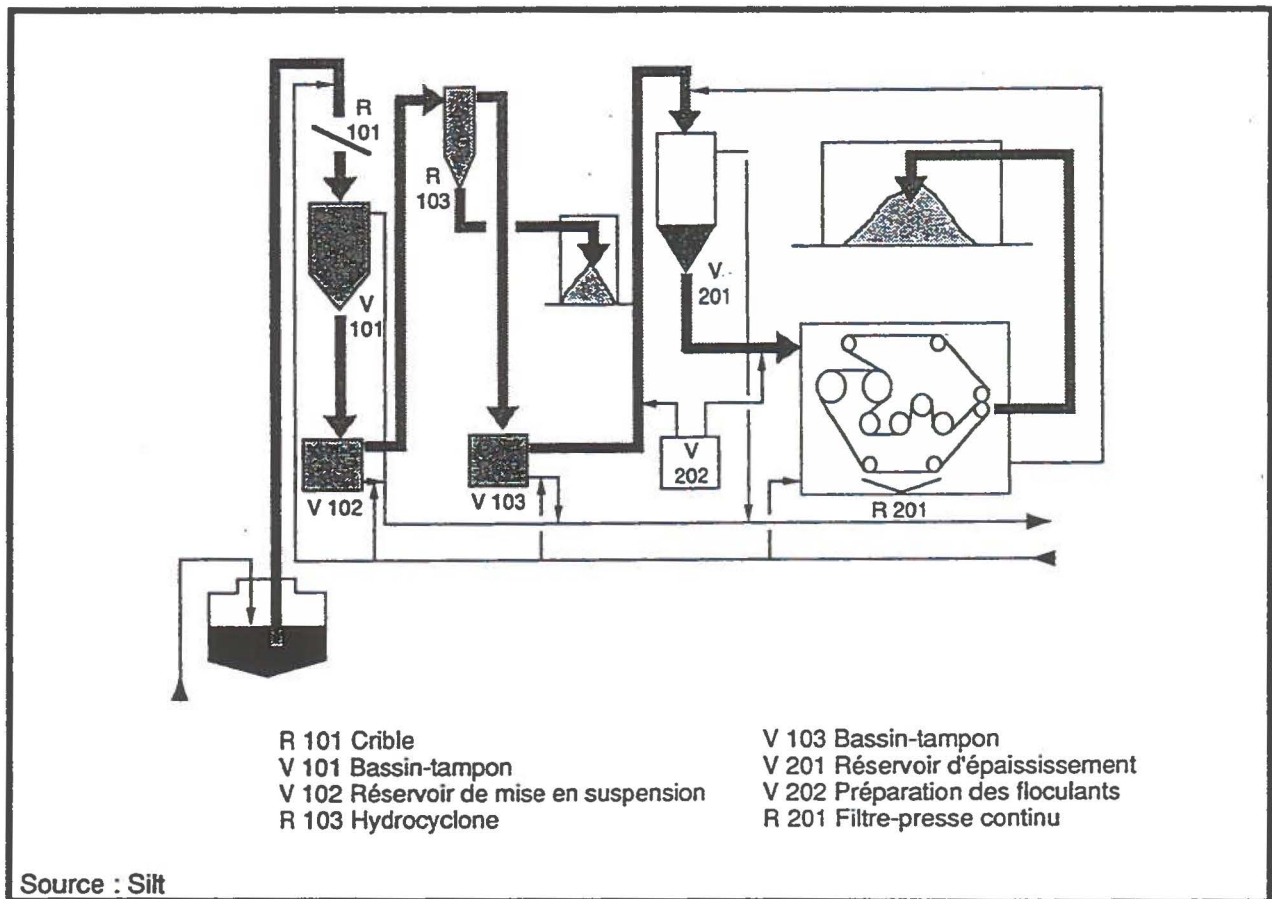


Figure 3.4 Schéma de principe de l'installation Silt N.V. de pré-traitement des sédiments

3.4.4 Procédé canadien. - Dans le cadre d'un projet de démonstration réalisé par le Centre de traitement des eaux usées de Burlington en Ontario, financé par le Fonds d'assainissement des Grands Lacs, la compagnie Acres-Derrick a développé une technologie de déshydratation des sédiments contaminés. Le traitement des sédiments comprend une séparation des liquides-solides, un traitement des eaux et un enlèvement des contaminants en suspension ou solubilisés, un assèchement des sédiments par tamisage grossier et fin, ainsi qu'une séparation par cyclone et centrifugation en continu.

La figure 3.5 illustre le schéma de principe de ce procédé de pré-traitement.

sédiments, qu'ils soient contaminés ou non. Dans un premier temps, une revue documentaire des technologies de traitement des sédiments contaminés a été réalisée, revue qui incluait les technologies de dragage, de transport, de stockage, de confinement, de pré-traitement et de traitement des effluents, et qui devait conduire à une sélection des technologies les plus prometteuses pour réaliser des projets de démonstration dans les cinq secteurs prioritaires identifiés (Averett, *et al.*, 1990).

Chaque groupe de technologies a été évalué en fonction des cinq facteurs suivants :

- stade de développement de la technologie;
- disponibilité de la technologie;
- efficacité à rencontrer les objectifs de restauration et de protection de l'environnement et de la santé publique pendant les travaux;
- application de la technologie à des projets de restauration des sédiments contaminés;
- coûts de traitement.

Chaque procédé à l'intérieur de chaque groupe de technologies a fait l'objet d'une évaluation de la performance anticipée pour le traitement des sédiments contaminés dans le but de conduire à un choix de technologies offrant le plus grand potentiel pour réaliser des projets de démonstration à grande échelle.

Les sections suivantes identifient les technologies de pré-traitement considérées et retenues en fonction des critères d'évaluation et de sélection retenus.

3.5.1 Critères d'évaluation et de sélection des procédés. - À partir de leur propre expérience dans la gestion des sédiments contaminés et de celle de l'USEPA dans la restauration de sédiments et de sols contaminés dans le cadre du Superfund, l'USACE a retenu les critères d'évaluation des technologies de pré-traitement et de traitement résumés au tableau 3.3.

Tableau 3.3 Critères d'évaluation des technologies de traitement retenues par l'USEPA et l'USACE pour des projets de dépollution des zones prioritaires des Grands Lacs

FACTEUR	COTE DE PERFORMANCE DE LA TECHNOLOGIE			
	4	3	2	1
Efficacité	> 99 %	70-99 %	40-70 %	< 40 %
. Satisfaction des objectifs de restauration	Très élevée	Modérée	Minimale	Aucune
. Fiabilité par rapport aux contaminants et aux conditions du site				
Application				
. Disponibilité d'une unité commerciale	Oui	Oui	Non mais technologie prête pour démonstration à l'échelle pilote	Non
. Application démontrée pour les sols et sédiments	Oui	Oui	Oui	À démontrer
. Échelle de démonstration	Pleine échelle	Pilote	Banc d'essai	Émergente ou conceptuelle
Coûts				
. \$ US par verge cube	< 20	20-100	100-200	>200
INFORMATION ADDITIONNELLE				
. Technologie	Nom du procédé ou de la technologie identifiée dans la revue documentaire.			
. Stade de développement	Échelle conceptuelle, pilote ou démonstration sur le terrain pour les sols et sédiments.			
. Application au matériaux de dragage	Indication si la démonstration a été réalisée sur le terrain, à l'échelle pilote ou sur banc d'essai.			
. Disponibilité aux États-Unis	Indication si la technologie est disponible aux É.-U., si elle est brevetée ou si technologie étrangère.			

Source : Adapté de Averett, et al. (1990).

En plus de présenter des informations d'ordre général (stade de développement, application antérieure pour les sédiments et disponibilité de l'équipement aux É.-U.), chaque procédé fait l'objet d'une évaluation de cote de performance variant de 1 à 4, en fonction de trois facteurs : efficacité d'élimination des contaminants et des objectifs de restauration fixés; application démontrée pour les sédiments contaminés; coûts unitaires anticipés pour le traitement .

Le tableau 3.4 fournit les critères de sélection qui permettent de retenir ou non certaines technologies en fonction des cotes de performance obtenues à partir des critères d'évaluation du tableau 3.3. Selon ce système de pondération, les procédés ou les technologies obtenant la plus haute cote globale sont privilégiés pour être éventuellement considérés pour des projets de démonstration. Le processus de sélection prévoit toutefois certaines exceptions à cette règle (voir le tableau 3.4) en raison des particularités du site, des caractéristiques spécifiques du procédé ou de la technologie considérée, compte tenu de la contamination retrouvée (seule technologie à pouvoir le faire).

Le tableau 3.5 résume le stade de développement et la disponibilité des technologies en Amérique du Nord et rapporte la cote de performance attribuée aux 26 procédés considérés pour la déshydratation, la classification des particules ou encore pour l'injection de produits directement dans les sédiments dragués, ces trois technologies ayant été sommairement présentées à la section 3.2.

À partir de ce tableau, on constate que la plupart des procédés de déshydratation ont déjà été utilisés dans les industries, les mines et le traitement des déchets industriels. À l'exception des procédés de séchage naturel, la plupart des procédés mécaniques de déshydratation (filtres, centrifugation ou épaissement) n'ont pas encore été utilisés sur une base régulière pour le pré-traitement des sédiments contaminés.

Quant aux procédés de classification, seuls les classificateurs hydrauliques, les hydrocyclones et les bassins de sédimentation ont déjà servi pour des matériaux de dragage. En ce qui concerne l'injection de produits dans les matériaux de dragage, la clarification chimique est le seul procédé utilisé jusqu'ici.

Tableau 3.4 **Critères de sélection des technologies retenues par l'USEPA et l'USACE pour les projets de dépollution des sédiments des zones prioritaires des Grands Lacs**

NIVEAU	CRITÈRES
1	<p>Le procédé doit avoir obtenu la 1^{re}, 2^e ou 3^e plus haute cote de performance dans le type de technologie considéré.</p> <p>Pour les procédés de 2^e ou 3^e rang, si les écarts de performance globale sont de 3 points ou plus par rapport à la première place, seulement le premier ou le second procédé est retenu.</p> <p>Exception à cette règle : seulement si les objectifs de dépollution requièrent soit un procédé de haute efficacité d'enlèvement ou de destruction ou encore soit un procédé économique.</p>
2	<p>Les procédés obtenant la cote 1 de performance pour n'importe lequel des critères d'évaluation (efficacité, application, coûts) ne sont pas retenus.</p> <p>Exception à cette règle : si le procédé a obtenu la plus haute cote dans le type de technologie considéré, bien que les coûts anticipés de traitement soient supérieurs à 200 US \$ mais inférieurs à 500 US \$/verge cube, ce procédé ne sera pas considéré en 1^{re} phase de démonstration mais pourrait faire l'objet d'essais en 2^e phase de démonstration.</p>
3	<p>Les procédés non disponibles aux É.U. ne sont pas retenus pour le moment en raison des problèmes logistiques et administratifs pour tester des technologies étrangères.</p>

Source : Adapté de Averett *et al.*, (1990).

Tableau 3.5 Évaluation de la performance anticipée des technologies de pré-traitement considérées pour la dépollution des Grands Lacs

PROCÉDÉ	STADE DE DÉVELOPPEMENT	APPLICATION AUX SÉDIMENTS	DISPONIBILITÉ	COTE DE PERFORMANCE (**)		
				EFFICACITÉ	APPLICATION	COÛTS
Déshydratation						
Filtre à bande (*)	Démontré	Oui	Oui	4	3	3
Évaporation Carver-Grennfield	Démontré	Non	Oui	3	2	3
Centrifugation	Démontré	Non	Oui	4	2	3
Chambre de filtration	Démontré	Non	Oui	4	3	3
Évaporation	Démontré	Non	Oui	3	1	2
Épaississement par gravité	Démontré	Non	Oui	3	3	3
Bassin de sédimentation primaire	Démontré	Oui	Oui	3	4	4
Évaporation solaire	Démontré	Oui	Oui	1	3	4
Bassin avec drains souterrains	Démontré	Oui	Oui	3	3	3
Bassin avec drainage de surface	Démontré	Oui	Oui	2	4	4
Filtration sous vide	Démontré	Oui	Oui	3	3	3
Bassin avec drains d'égouttement	Démontré	Oui	Oui	3	4	3
Classification des particules						
Flotation	Démontré	Banc d'essai	Oui	3	2	3
Grilles à barreaux	Démontré	Non	Oui	2	3	4
Séparation de médium lourd	Démontré	Non	Oui	2	1	3
Classificateurs hydrauliques	Démontré	Oui	Oui	3	2	3
Hydrocyclones	Démontré	Oui	Oui	3	3	4
Bassin de sédimentation	Démontré	Oui	Oui	2	3	4
Électrostatique/magnétique	Démontré	Non	Oui	3	2	3
Grillage mobile	Démontré	Non	Oui	3	2	3
Table à secousses	Démontré	Non	Oui	3	2	3
Classificateurs à vis hélicoïdale	Démontré	Non	Oui	3	2	3
Grillage fixe	Démontré	Non	Oui	3	2	3
Injection dans les boues						
Clarification chimique	Démontré	Oui	Oui	2	3	4
Addition de microorganismes	Conceptuel	Non	Développement	3	3	3
Addition d'éléments nutritifs	Conceptuel	Non	Développement	1	3	4

Remarques :

* Les technologies en caractère gras ont été retenues par l'USACE et l'USEPA pour des projets de démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs.

** Voir tableau 3.3. pour la signification des cotes de performance.

Source: Averett et al. (1990).

3.5.2 Procédés retenus. - À partir des critères de sélection présentés au tableau 3.4, la plupart des technologies ou procédés de pré-traitement considérés au départ pour la déshydratation des sédiments ou pour la séparation des particules ont été retenus pour des projets de démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs. En effet, tel qu'illustré à la figure 3.6, la majorité des technologies ont été démontrées et leurs coûts sont relativement acceptables.

Le procédé de déshydratation par évaporation et la classification des particules par séparation de médium lourd n'ont pas été retenus pour des projets de démonstration du fait qu'ils étaient encore au stade du développement. Ont également été éliminés le procédé de déshydratation par évaporateur solaire et l'addition d'éléments nutritifs vu leur faible efficacité par rapport aux objectifs d'assainissement fixés.

COÛTS (US \$/v.c.)	APPLICATION			
	1° À DÉMONTRER	2 BANC D'ESSAI	3 PILOTE	4 COMMERCIALE
200 \$ ET PLUS				
100 \$ À 200 \$	Évaporation(3) ***			
20 \$ À 100 \$	Séparation de médium lourd(2)	<ul style="list-style-type: none"> . Centrifugation(4) *** . Classificateur en spirale(3) . Classificateur hydraulique(3) . Évaporateur Carver-Greenfield(3) . Flottation(3) . Grillage fixe(3) . Grillage mobile(3) . Séparation magnétique/électromagnétique(3) . Table vibrante(3) 	<ul style="list-style-type: none"> . Addition de micro-organismes(3) . Bassins avec drains souterrains(3) . Épaissement par gravité(3) . Filtration sous vide(3) . Filtre à bande(4) . Chambre de filtration(4) 	Bassins avec drains d'égouttement (3)
20 \$ ET MOINS			<ul style="list-style-type: none"> . Évaporateur solaire(1) . Addition d'éléments nutritifs(1) . Grilles à barreaux (2) . Bassin de sédimentation(2) . Clarification chimique(2) . Hydrocyclone(3) 	<ul style="list-style-type: none"> . Bassin de sédimentation primaire (3) . Bassin avec drainage de surface (2)

Remarque: * Cote de performance, voir tableau 3.3 pour la légende.

** Efficacité (3), voir tableau 3.3 pour la légende.

*** Les procédés en caractère gras ont été retenus pour des projets de démonstration pour l'assainissement des Grands Lacs.

Source : Adapté de Averett et al. (1990).

Figure 3.6 Classement des 26 technologies de pré-traitement considérées et retenues pour des projets de démonstration pour la dépollution des sédiments des Grand Lacs

4 TECHNOLOGIES DE TRAITEMENT DES SÉDIMENTS CONTAMINÉS

4.1 Objectifs de traitement

Comme pour le traitement des sols, des boues, des eaux et des déchets contaminés et dangereux, les technologies de traitement des sédiments contaminés visent essentiellement à détruire, enlever, immobiliser ou encore à neutraliser les matériaux contaminés, si possible à des coûts raisonnables. Les sous-objectifs de traitement qui en découlent peuvent être l'un et (ou) l'autre des suivants :

- a) détruire les contaminants toxiques organiques par leur conversion en produits moins toxiques;
- b) enlever les métaux lourds ou les contaminants organiques des sédiments dragués, soit en concentrant les contaminants dans un média de plus petit volume (extraction), soit en réduisant les volumes de solides pour un traitement subséquent ou pour la mise en dépôt;
- c) réduire la mobilité des contaminants dans les matériaux dragués à un niveau de risques acceptable;
- d) assurer la compatibilité des technologies de traitement des sédiments avec les options retenues pour l'excavation, le transport et la mise en dépôt des sédiments contaminés;
- e) présenter des coûts de capitalisation et d'opération acceptables;
- f) minimiser le transfert des contaminants dans les autres composantes de l'environnement (air, eau, boues);
- g) éviter l'ajout ou la production de substances potentiellement toxiques pendant le traitement des sédiments (Averett *et al.*, 1990).

Après avoir présenté les diverses catégories de technologies de traitement retrouvées dans la documentation, les technologies considérées, reconnues ou présentement en démonstration pour le traitement des sédiments contaminés, sont décrites dans les sections suivantes. Pour chacune des catégories de traitement (biologique, extraction, chimique, thermique, etc.), les informations suivantes sont présentées :

- principe de traitement;

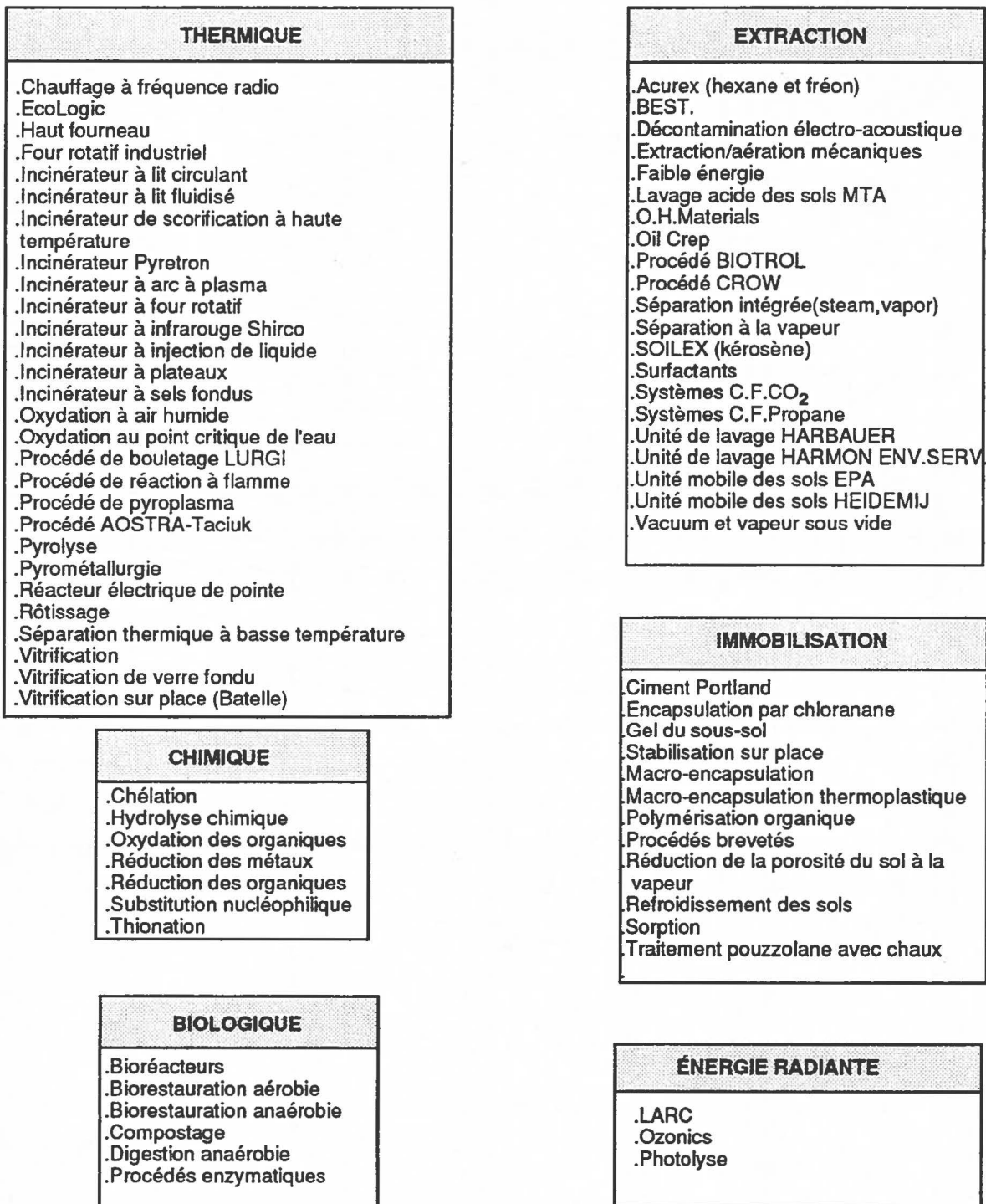
- schéma simplifié du procédé;
- techniques ou procédés actuellement disponibles auprès des vendeurs ou des promoteurs;
- domaines d'application (matrices et contaminants traités);
- avantages et limites de chaque technique ou procédé;
- avantages et limites pour le traitement des sédiments;
- techniques démontrées pour le traitement des sédiments;
- techniques considérées pour le traitement des sédiments des Grands Lacs;
- techniques en démonstration pour le traitement des sédiments des Grands Lacs;
- techniques retenues pour des projets d'assainissement de sédiments contaminés.

Cette section est complétée d'exemples où ces diverses technologies peuvent être rassemblées dans un même projet (chaîne de traitement).

4.2 Procédés de traitement des sols et des sédiments

Avec le développement des technologies, on retrouve dans la documentation plusieurs types de classification, dépendant des auteurs ou encore du type de traitement dominant. Ainsi, dans le cadre de la revue des technologies de traitement pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs, l'USACE et l'USEPA ont classé les 147 techniques de traitement considérées en six grandes catégories (Averett *et al.*, 1990).

TRAITEMENT



Source: Averett, D.E. et al. (1990).

Figure 4.1 Options de traitement considérées pour l'assainissement des Grands Lacs par le gouvernement américain

Tel qu'illustré à la figure 4.1, les techniques ont été regroupées selon les catégories suivantes :

- 1) Traitement biologique
- 2) Traitement chimique
- 3) Extraction
- 4) Traitement thermique
- 5) Immobilisation
- 6) Énergie radiante.

Cette forme de classification regroupe aussi bien des procédés (p. ex., incinération, pyrolyse, lavage, etc.) que des noms de promoteurs de technologies (p. ex., EcoLogic, O.H. Materials Inc.) sans référence au type de procédé proposé par le promoteur.

Pour sa part, dans sa banque sur les technologies de traitement des sédiments, *Sediment Treatment Technologies Database (SEDTEC)*, le CTEU de Burlington (Wastewater Technology Centre, 1992a), suite à un appel d'offres public auprès des entreprises vendant des technologies de traitement, classe les 146 technologies de traitement recensées en sept grandes catégories (si on fait abstraction de la catégorie de pré/post-traitement), soit :

- 1) Procédé thermique alternatif
- 2) Traitement biologique
- 3) Traitement chimique
- 4) Incinération conventionnelle
- 5) Extraction
- 6) Fixation/Stabilisation
- 7) Autre traitement.

PROCÉDÉ THERMIQUE ALTERNATIF

- . Procédé thermo-chimique Agglo
- . Procédé AOSTRA-Taciuk
- . Recycleur Ashwarren des hydrocarbures
- . Ecogrind
- . Procédé de destruction Ecologic
- . Incinérateur Ecotechniek
- . Désorption thermique Enviro Mobile
- . Réacteur à flamme
- . Désorption à chaleur indirecte
- . Fusion Joule
- . Système LT3 à basse température
- . Procédé de bouletage Lurgi
- . Système mobile OHM de volatilisation
- . Système de traitement PO*WW*ER
- . Procédé de pulsation
- . Le recycleur de sol
- . Procédé VESTA de désorption
- . Procédé X*TRAX de désorption
- . Procédé Zimpro d'oxydation à air humide

TRAITEMENT CHIMIQUE

- . Procédé BCDP
- . Procédé BEAK de déchloration
- . Procédé RHM 1000
- . Procédé de destruction Oxydation/Cyanure
- . Procédés ENSOL et LANDTREAT
- . Procédé IWT/Geo-Con
- . Procédé Izones
- . Procédés LANDTREAT et PETROXY
- . Procédé Sinre
- . Procédé de l'Université du Wisconsin

TRAITEMENT BIOLOGIQUE

- . Procédé ABR/CIS
- . Procédé ALTECH
- . Procédé Aqua-Guard
- . Procédé BEAK
- . Procédé BID
- . Procédé en pile de Biogénie
- . Procédé de Ceramics Kingston
- . Procédé CUM-Bac
- . Procédé d'épandage David Bromley
- . Procédé DEARBORN
- . Procédé DITS
- . Procédé E.R.S
- . Procédé E.V.S.
- . Bioréacteur de surface Gulf
- . Procédé HAM
- . Procédé bio-chimique IGT
- . Procédé Kiseki
- . Procédé MBI
- . Procédé OHM
- . Procédé de compostage R. Cave
- . Procédé ReTeC
- . Procédé SILT
- . Bioréacteur SNC
- . Procédé Thorne
- . Procédé de l'Université du Wisconsin
- . Procédé de Waste Stream Technology
- . Procédé WWE

INCINÉRATION CONVENTIONNELLE

- . Procédé d'Aqua-Guard Technology
- . Procédé à fournaise cyclonique B&W
- . Procédé B.A. Brown
- . Procédé de Chem-Security
- . Procédé à lit fluidisé DJN ZEROFUEL
- . Procédé EER
- . Procédé de Gorman Paving
- . Procédé IGT
- . Procédé IHC
- . Procédé MK
- . Procédé MWP-2000
- . Procédé OES à lit mobile
- . Procédé OHM à infrarouge
- . Procédé PLASMAWASTE & PLASMADESTRUCT
- . Procédé Pyretron
- . Procédé PYROX
- . Procédé Rectech à fournaise à plasma
- . Procédé RFB à lit fluidisé
- . Procédé VESTA 100

Figure 4.2 Options de traitement des sédiments enregistrées dans la banque canadienne SEDTEC du Plan d'Action des Grands Lacs

TECHNOLOGIE D'EXTRACTION

- . Système d'extraction à l'acide
- . Système ALTECH mobile de lavage des sols
- . Procédé ARC/EPRI
- . Procédé B.E.S.T.
- . Procédé Beak d'extraction à l'éthanol
- . Procédé BioGenesis
- . Procédé Biogénie d'extraction physico-chimique
- . Extraction et séparation biomagnétique
- . Procédé Carver-Greenfield
- . Système DAVE d'extraction/désorption à la vapeur
- . Procédé Dravo Rotocel
- . Procédé Ecotechniek d'extraction
- . Procédé électrocinétique
- . Procédé Extraksol
- . Procédé Ghea d'extraction
- . Procédé IGT de dégradation par Extraction/Biologique
- . Procédé IHC d'extraction des métaux
- . Procédé LEEP
- . Procédé MVLJ
- . Procédé METALEEP
- . Technologie Metanetix
- . Procédé METLEX
- . Unité mobile PCU
- . Système VES mobile d'extraction à la vapeur
- . Procédé NRCC d'adsorption
- . Procédé de Oleophilic Sieve Development
- . Procédé SESA d'extraction au solvant
- . Procédé SILT
- . Procédé Texarome
- . Procédé Thorne d'extraction à la vapeur (VES)
- . Procédé de l'Université du Wisconsin
- . Procédé COGNIS d'extraction et de biotraitement
- . Procédé COGNIS

AUTRE TRAITEMENT

- . Oxydation catalytique à l'ozone
- . Flottation DJN
- . Procédé électrolytique
- . Technologie à micro-ondes Emery
- . Système de conversion des essences de ENRAC
- . EXXFLOW et EXPRESS
- . Procédé de fusion électrique Melt-All
- . Colonne de flottation Minnovex
- . Procédé électrochimique Ortech
- . Fixation au phosphate
- . Procédé Sonofloc
- . Technologie de restauration des sols VITROKELE

TECHNOLOGIE DE FIXATION/STABILISATION

- . Stabilisation in situ AECL
- . Solidification/Stabilisation AECL
- . Fixation Aqua-Guard
- . Encapsulation des métaux Ashwarren
- . Injection d'aluminium Beak
- . Stabilisation/Solidification Chem-Matrix
- . Fixation Biogénie
- . Stabilisation Chem-Security
- . Fixation des inorganiques Comrie
- . Restauration in situ DRILLCO
- . Solidification Dufferin
- . Stabilisation Ecofix/Chemfix
- . Procédé de Solidification/Stabilisation Emtech
- . Procédé Fujibeton
- . Solidification/Stabilisation Innovat
- . Solidification/Stabilisation Krofchak
- . Fixation chimique Morrison Beatty
- . Technologie de silicates réactifs
- . Fixation Silt
- . Soilroc
- . Procédé de Solidification/Stabilisation Soliditech
- . Solidification SORBOND
- . Fixation chimique et solidification ToxCo
- . Procédé TRIFIRMEX
- . Modification moléculaire/Stabilisation WASTECH

TECHNOLOGIE DE PRÉ/POST TRAITEMENT

- . Système Acres/Derrick
- . Ambiente
- . Système Beaver de pré-traitement
- . Système Bedrock de pré-traitement
- . Procédé Bergman de lavage sols/sédiments
- . Système de déshydratation Biogénie
- . Procédé de lavage des sols Biotrol
- . Procédé de déshydratation DJN
- . Procédé d'élutriation DJN
- . Séparation par hydrocyclone DJN
- . Procédé de déshydratation EMO
- . Procédé de séparation et déshydratation HAM
- . Procédé de flottation IHC
- . Procédé Lurgi METHA III
- . Usine mobile de séparation et de traitement SILT
- . Procédé de déshydratation par filtre-presse OHM
- . Procédé de déshydratation Polar
- . Procédé de séparation et déshydratation SILT
- . Procédé SILT-PAC
- . Filtration/déshydratation à pression sous vide
- . Système de pré-traitement Volker/Esdex

Figure 4.2 Options de traitement des sédiments enregistrées dans la banque canadienne SEDTEC du Plan d'Action des Grands Lacs (suite)

Cette banque a été réalisée en vue de pouvoir choisir des technologies pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs du côté canadien. Cette forme de classification, listée à la figure 4.2, est similaire à celle de l'USACE et l'USEPA puisque que l'on retrouve dans chaque catégorie des types de procédés et des promoteurs de technologies.

Une autre forme de classification retrouvée dans la documentation est présentée à la figure 4.3. Les technologies de traitement sont classées en fonction du lieu de traitement (en place ou in situ, sur le site ou hors site) et du niveau de traitement des contaminants retrouvés dans les matrices à traiter, à savoir : technologies destructrices ou de neutralisation (désintoxication), technologies de séparation/extraction, technologies d'immobilisation des contaminants dans les matrices à traiter ou technologies de confinement sécuritaire (Beck *et al.*, 1991; USEPA, 1991c).

Cette forme de classification est intéressante pour ceux qui désirent rapidement connaître les technologies qui permettent le traitement des contaminants, in situ (sans excaver les sédiments) et celles qui impliquent forcément l'enlèvement et le transport des sédiments au site de traitement.

La classification retenue dans le présent document est celle présentée à la figure 4.4 où les technologies sont regroupées par procédés à l'intérieur des six catégories suivantes :

- 1) Traitement biologique
- 2) Extraction
- 3) Traitement chimique
- 4) Traitement thermique
- 5) Immobilisation
- 6) Confinement sécuritaire.

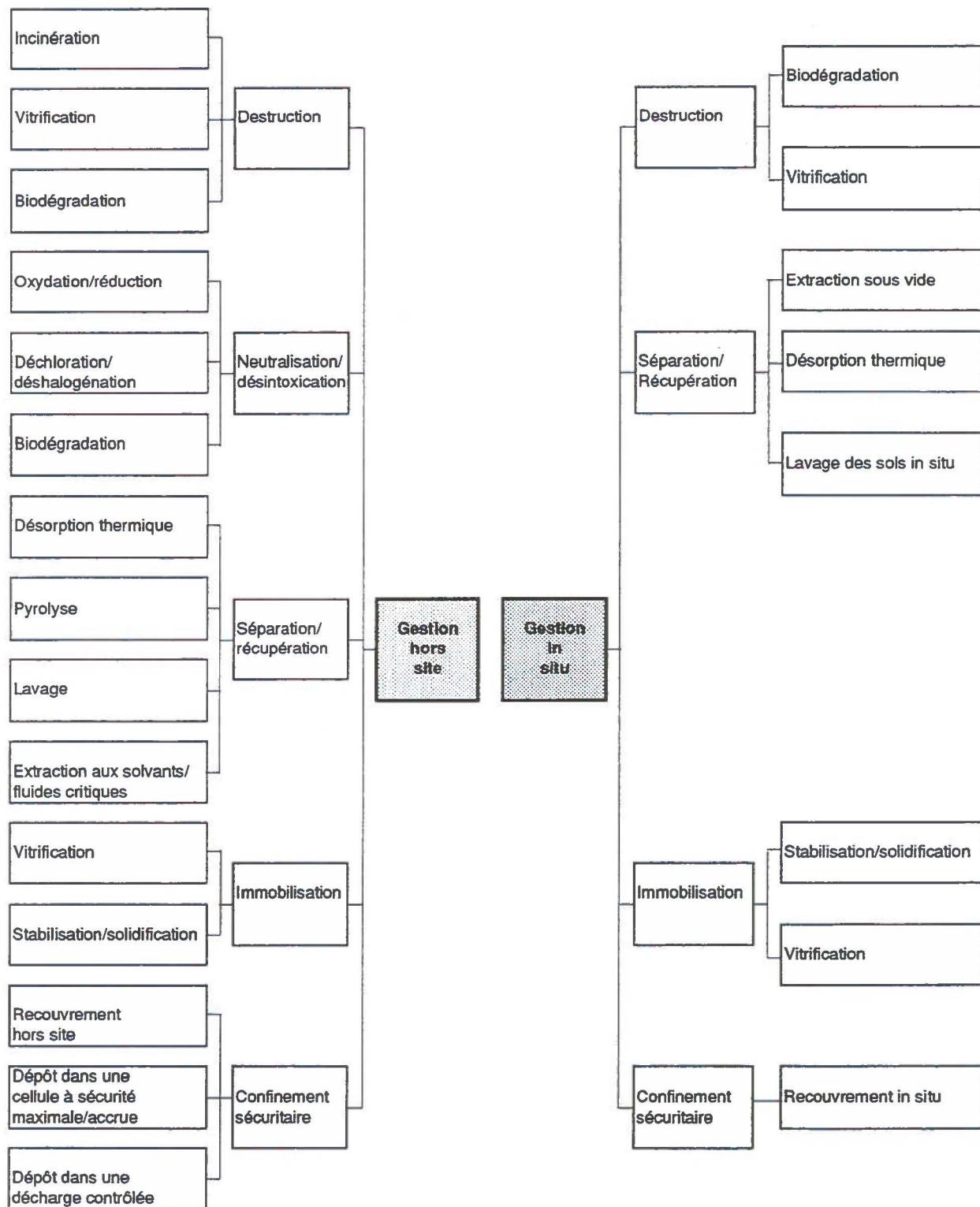


Figure 4.3 Classification des technologies de traitement des déchets en fonction du lieu et du niveau de traitement

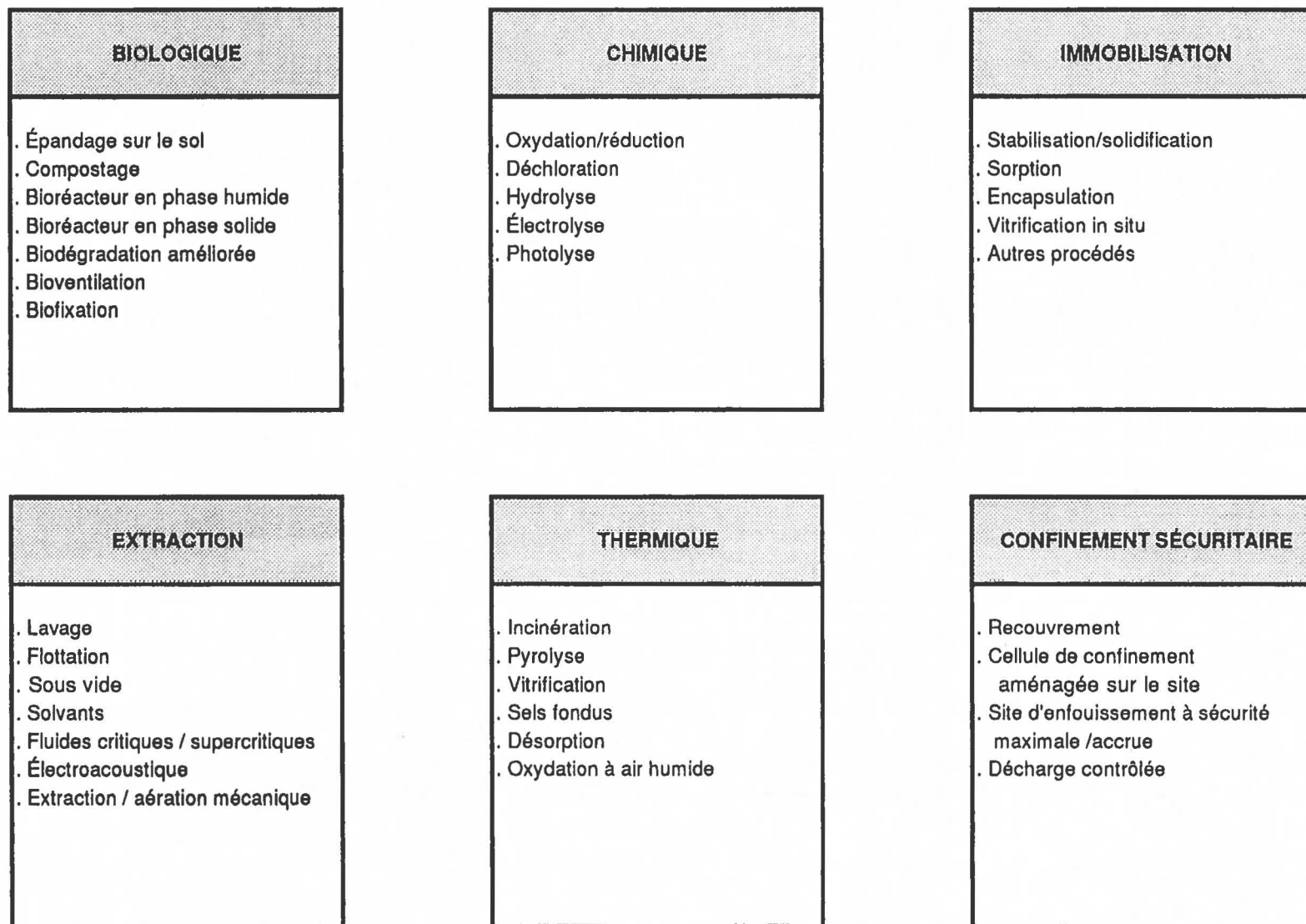


Figure 4.4 Classification des technologies de traitement selon le type de procédé

Les technologies de confinement sécuritaire, bien qu'elles ne détruisent pas les contaminants, sont présentées brièvement dans le document parce qu'elles sont souvent utilisées pour l'élimination des résidus non traitables d'un procédé de traitement ou parce qu'on y a recours pour isoler les contaminants en l'absence d'un procédé efficace de destruction ou encore pour des considérations d'ordre technique, économique, administratif, économique ou autres.

Dans les sections suivantes, les procédés de chacune des catégories sont détaillés en faisant particulièrement référence aux technologies ou aux promoteurs considérés et retenus pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs tant du côté américain que canadien, listés respectivement aux figures 4.1 et 4.2.

4.3 Traitement biologique

4.3.1 Principe de traitement. - Les technologies de traitement biologique utilisent des bactéries, des champignons ou des enzymes pour briser les liens chimiques des BPC, des pesticides et autres contaminants organiques et les transformer en composés inoffensifs ou moins toxiques, p. ex. , en gaz carbonique (CO₂), en méthane (CH₄) et en sels inorganiques.

Les procédés biologiques utilisent la capacité qu'ont les organismes d'utiliser les polluants comme substrat pour leur croissance. Pour accélérer le processus naturel de biodégradation, on fournit aux microorganismes un environnement plus favorable en éléments nutritifs, oxygène et température. Les découvertes récentes en microbiologie et en génétique ont de plus permis de développer des souches bactériennes capables de s'attaquer à des composés considérés non biodégradables il y a seulement quelques années (Samson, 1992).

La biodégradation des contaminants peut se réaliser en conditions aérobies ou anaérobies. En milieu *aérobie*, l'aération ou l'oxygénation des matrices ou déchets à traiter est le facteur principal. Les microorganismes pouvant vivre ou se développer dans un milieu privé d'air ou plus précisément en l'absence d'oxygène libre sont appelés *anaérobies*. Les procédés fonctionnant dans ces conditions sont plus lents et permettent habituellement la récupération de biogaz tout en libérant des produits volatils malodorants parfois dangereux tels le H₂S et les mercaptans (Petitpas, 1990).

La destruction de certains contaminants organiques, par exemple les composés halogénés, divers composés aromatiques et certains pesticides, est possible par biodégradation anaérobie. La température joue un rôle déterminant dans la réaction, affectant à la fois la composition des communautés actives et les réactions catalytiques-enzymatiques. L'activité microbienne décroît généralement avec un abaissement des températures et devient presque nulle à des températures inférieures à 4 °C (Averett *et al.*, 1990).

La production accélérée et en grande quantité d'enzymes spécialisés par des microorganismes recombinés offre aussi une nouvelle avenue aux procédés de

biorestauration. L'application de cette technologie est envisageable à long terme et elle permettra d'éviter l'ajout de microorganismes dans l'environnement (Samson, 1992).

Le rythme de biodégradation des contaminants est déterminé par :

- 1) la présence de microorganismes appropriés;
- 2) les concentrations adéquates d'éléments nutritifs essentiels;
- 3) la disponibilité et les patrons de concentrations des composés à être dégradés;
- 4) les effets des contaminants sur l'activité des populations microbiennes (USEPA, 1991b).

Comme les métaux lourds peuvent empêcher la biodégradation, le pré-traitement (lavage, extraction des métaux, traitement biologique utilisant des cellules d'algues sous forme de gel de silice) est souvent requis pour éliminer ces substances inhibitrices, ou tout au moins en abaisser la teneur.

4.3.2 Technologies disponibles. - Les biotechnologies utilisées pour le traitement de matrices contaminées peuvent être subdivisées en trois grandes catégories :

- biodégradation sur ou hors site (épandage sur le sol, compostage, bioréacteurs en phases humide ou solide);
- biodégradation in situ;
- biofixation.

4.3.2.1 Biodégradation sur/hors site. - Les technologies de biodégradation sur le site ou hors du site impliquent l'excavation des sols ou des sédiments avant le traitement proprement dit. La figure 4.5 illustre les intrants et les extrants de ce type de traitement.

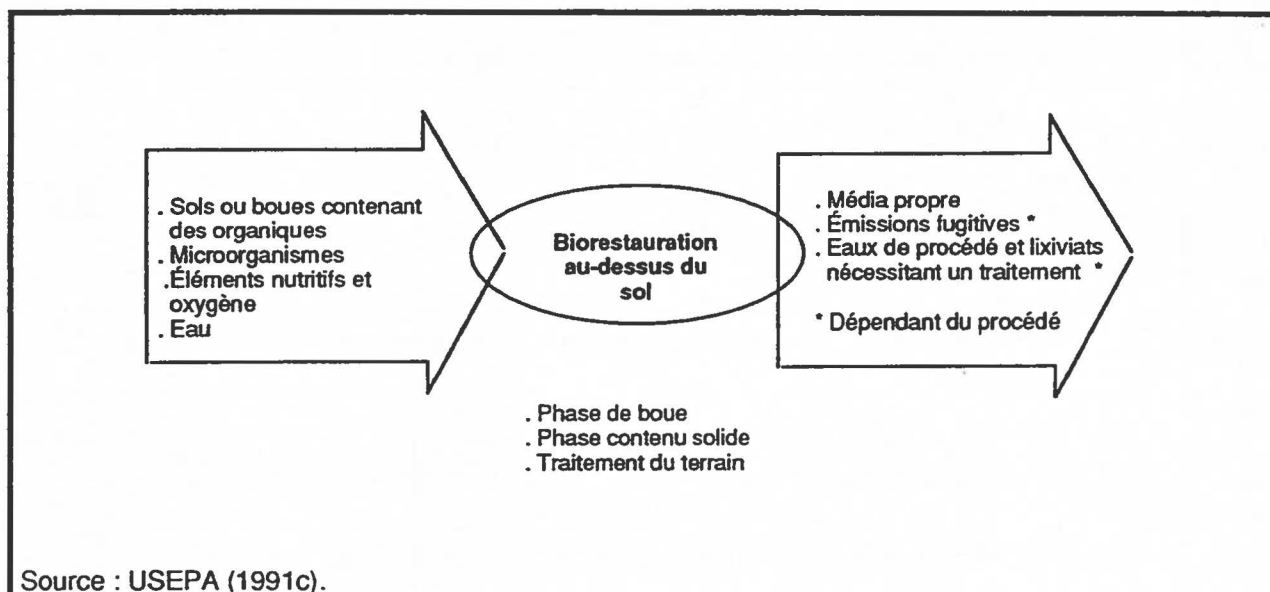


Figure 4.5 Intrants et extrants des technologies biologiques de traitement sur/hors site

Une fois excavés, les matériaux contaminés peuvent être traités par les biotechnologies suivantes :

a) Épandage sur le sol

La technique de biodégradation par épandage sur le sol consiste simplement à étendre les sols ou les sédiments excavés (épaisseurs généralement de 15 à 30 cm) sur une surface préparée et réservée à cette fin. Pour accélérer la biodégradation, des éléments nutritifs (azote et phosphore) sont ajoutés et le sol épandu est régulièrement remanié pour permettre un apport d'oxygène. Des microorganismes exogènes peuvent à l'occasion être ajoutés pour aider à dégrader certains composés organiques plus récalcitrants.

b) Compostage

Le compostage, qui peut être réalisé en conditions aérobies ou anaérobies, implique le stockage de matières hautement biodégradables et structurantes telles le

foin coupé ou les copeaux de bois mélangés dans des proportions de 10 p. 100 ou moins avec les déchets biodégradables (USEPA, 1991b).

Le compostage peut se réaliser de trois façons, à savoir :

- i)* en forme d'andains ouverts où les matériaux sont placés en piles allongées et aérées par un brassage régulier;
- ii)* en andains statiques où l'aération est assurée par un système de ventilation à air forcé via un grillage en tuyaux perforés placés sous le compost;
- iii)* dans des systèmes de vaisseaux ou réacteurs qui aèrent le compost par des mécanismes de rotation, d'agitation et d'aération forcée.

En conditions anaérobies, le compostage est réalisé dans des vaisseaux où l'azote est injecté sur une base régulière pour enlever toute trace d'oxygène (Averett *et al.*, 1990; USEPA, 1991b).

c) Réacteurs en phase humide

Les bioréacteurs en phase humide ou à boues liquides (slurry reactor) sont généralement utilisés pour traiter les effluents aqueux industriels ou municipaux ainsi que les déchets sous forme aqueuse. Dans le cas de déchets ou de sols contaminés, de l'eau est ajoutée pour former une boue qui est mécaniquement agitée dans un bioréacteur (généralement un réservoir agissant comme réacteur, des lagunes ou des systèmes à boues activées). La teneur en éléments nutritifs, la teneur en oxygène, le pH et la température doivent être soigneusement réglés pour que la croissance des bactéries se déroule normalement. Les bioréacteurs sont conçus pour maintenir un contact et un mélange intime des microorganismes avec les composés à traiter.

La figure 4.6 illustre le schéma de principe des procédés de biodégradation en phase humide.

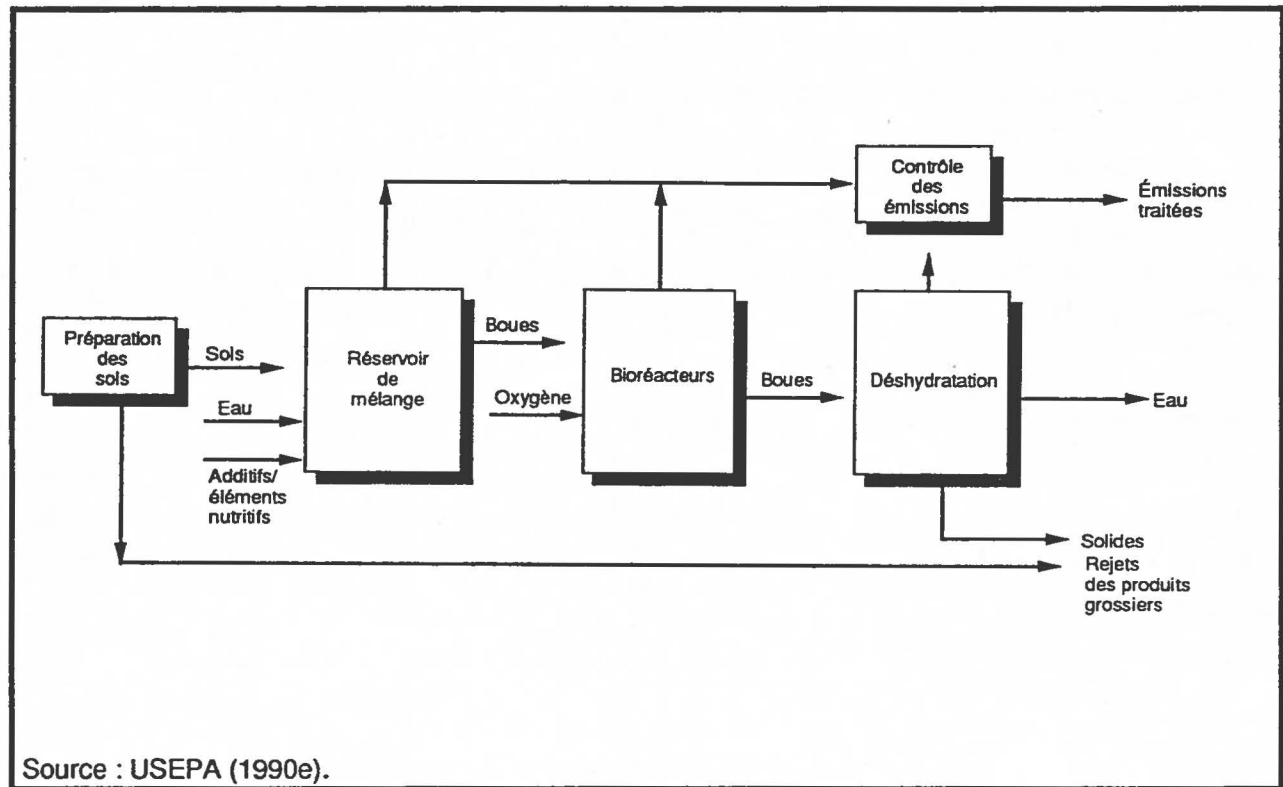


Figure 4.6 Schéma de principe des procédés de biodégradation en phase humide

La boue est mécaniquement agitée dans le réservoir de mélange pour assurer la suspension des solides et pour maintenir des conditions appropriées de réaction. En plus des éléments nutritifs organiques et inorganiques, l'ajout d'oxygène, d'acides ou de bases pour contrôler le pH, ou de microorganismes préparés sur une base commerciale, peut être nécessaire.

Une composition type de boues à l'entrée du bioréacteur contient habituellement environ 50 p. 100 de solides en poids. Des teneurs suffisantes en oxygène dissous doivent être maintenues et les températures doivent se stabiliser entre 15 et 70 °C (60-160 °F) (USEPA, 1991b).

Les bioréacteurs peuvent opérer par lots ou en mode continu. Tel qu'illustré à la figure 4.6, une fois que le traitement est complété, les boues sont asséchées par filtration ou centrifugation; les solides sont ensuite évacués dans un site autorisé. Les effluents liquides des procédés de déshydratation peuvent être soit recyclés au

réservoir de mélange ou soit dirigés vers l'unité de traitement. Les émissions volatiles peuvent être traitées par un système d'épuration (charbon activé ou autres) ou être recyclées dans le bioréacteur pour être biodégradées (Beck, *et al.*,1991).

Une autre forme de biotraitement en phase humide est la digestion anaérobie où les microorganismes dégradent les déchets en l'absence d'oxygène. La digestion anaérobie est réalisée dans des vaisseaux ou réacteurs étanches à l'air avec des systèmes de ventilation ou de captage des gaz, méthane et dioxyde de carbone (USEPA, 1991b). Comparativement aux systèmes à boues activées, la digestion anaérobie nécessite moins d'énergie et produit moins de boues de sous-produits. Elle génère du H₂S, qui précipite les ions métalliques lourds et produit du méthane (CH₄) qui peut être utilisé comme source d'énergie (Manahan, 1990). Elle comporte toutefois certains inconvénients, notamment d'odeur et risques d'explosion et doit donc être très bien contrôlée.

d) Réacteurs ou biotraitement en phase solide

Les technologies faisant appel à des réacteurs ou au biotraitement en phase solide sont similaires aux techniques par épandage, sauf qu'elles permettent un plus grand contrôle du rythme de biodégradation. Ces systèmes sont couramment utilisés en Europe mais l'ont très peu été jusqu'à présent en Amérique du Nord.

Ces technologies requièrent que les sols ou les sédiments excavés soient mélangés et amendés (eau, éléments nutritifs, contrôle du pH, modification de la texture et microorganismes). Les sols/sédiments amendés sont ensuite placés dans des systèmes fermés, des édifices, des réservoirs ou réacteurs, ou encore dans des cellules. Ces technologies permettent un meilleur contrôle des procédés en éliminant les eaux de ruissellement et un meilleur contrôle également de l'humidité et des émissions de composés volatils pendant la biodégradation. Les matrices à traiter, qui peuvent être placées sur plusieurs mètres d'épaisseur, nécessitent alors des équipements spéciaux pour les remanier et les aérer (USEPA, 1991b).

L'optimisation de la conception des bioréacteurs en phase solide doit être poursuivie car ils offrent des avantages considérables sous des climats nordiques et

contrairement aux bioréacteurs en phase humide, ne produisent pas d'effluents liquides qui doivent être ensuite traités (Samson, 1992).

4.3.2.2 Biodégradation in situ. - Les procédés de traitement biologique en place ou in situ, favorisent et accélèrent les procédés naturels de biodégradation. La figure 4.7 illustre les intrants et les extrants de ce procédé.

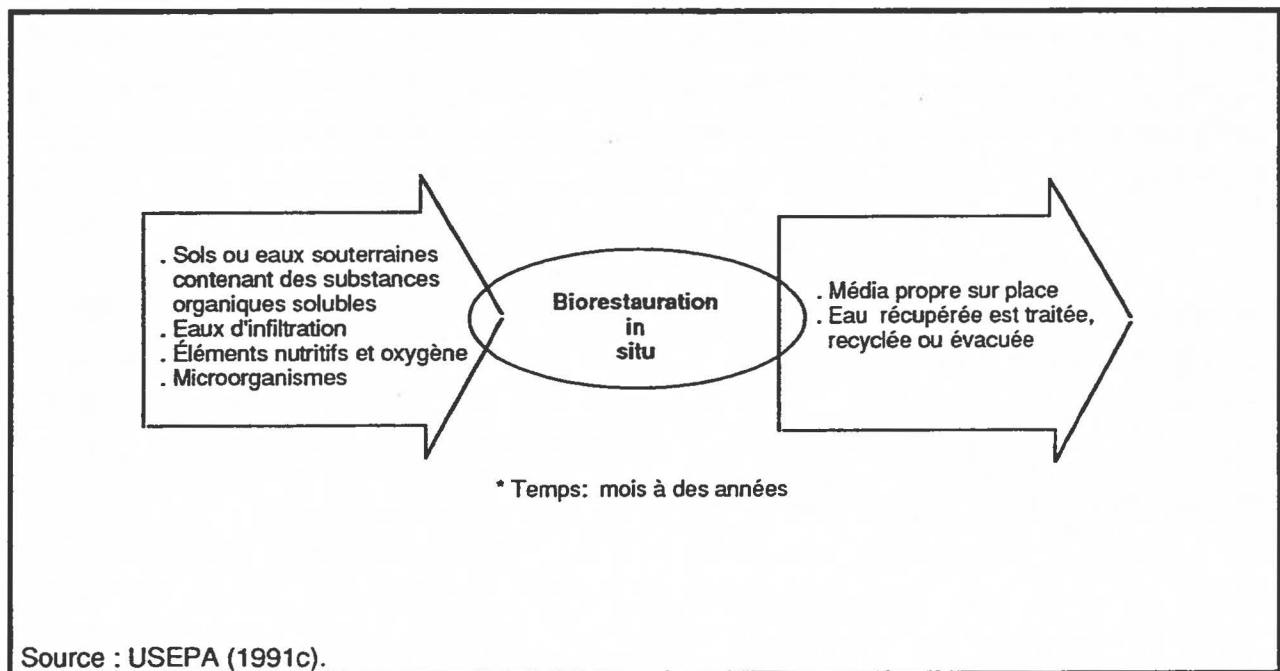


Figure 4.7 Intrants et extrants des technologies biologiques de traitement in situ

Les technologies de biotraitement sur place impliquent une biodégradation des substances organiques par des microorganismes indigènes ou introduits dans les matrices à traiter, qui croissent et agissent en conditions aérobies ou anaérobies.

La biodégradation des sols in situ implique habituellement un pompage et un traitement à la surface des eaux souterraines, l'eau traitée étant ensuite conditionnée avec des éléments nutritifs et une source d'oxygène avant d'être réinjectée dans la nappe aquifère et les sols contaminés (US EPA, 1991c). Les milieux

visés par cette technologie sont généralement les sols de surface et de la zone vadose située au-dessus de la nappe d'eaux souterraines.

Le facteur limitatif pour le biotraitement in situ est généralement la teneur en oxygène dissous. Les sources habituelles d'oxygène sont l'air, l'oxygène pur et le peroxyde d'hydrogène (US EPA, 1991c). L'avantage du peroxyde est qu'il relâche graduellement l'oxygène dans le milieu pour permettre une biodégradation continue. La présence de fer dans les sols peut toutefois contrecarrer et même annuler cet effet. Toutefois, l'ajout de composés à base de phosphates permet de complexer le fer et de prolonger la stabilité du peroxyde in situ (Petitpas, 1990). Bien que le peroxyde d'hydrogène soit fréquemment utilisé comme source d'oxygène, son utilisation est relativement dispendieuse et pose encore une variété de problèmes techniques (US EPA, 1991c).

Il est également possible de combiner l'extraction à la vapeur avec la biorestauration. Cette technologie est appelée bioventilation (tableau 4.5). Elle requiert un système de puits d'injection à la vapeur qui force de l'air dans les sols de surface par injection ou en utilisant le vide. L'ajout d'air augmente la quantité d'oxygène disponible pour la biodégradation; on peut injecter une solution d'éléments nutritifs ou la laisser percoler, pour améliorer la biodégradation.

4.3.2.3 Biofixation. - La technique de biofixation utilise des microorganismes immobilisés sur une matrice solide, laquelle est ensuite introduite dans la matrice à traiter. Ces microorganismes ont la particularité de pouvoir adsorber les métaux lourds; une fois les métaux adsorbés, la matrice solide est retirée et les microorganismes sont généralement éliminés par traitement thermique. La matrice solide, appelée support, est régénérée à l'aide d'une solution acide dont on récupère les métaux lourds.

4.3.3 Domaines d'application. - Les technologies biologiques sont appropriées pour le traitement de la fraction organique des sols, des boues, des sédiments et des eaux de surface et souterraines. Toutefois, elles ne sont pas applicables en cas de très fortes concentrations de métaux lourds ou en présence de composés organiques

chlorés de poids moléculaire élevé, de pesticides, d'herbicides ou de sels inorganiques (USEPA, 1991c).

L'efficacité des technologies biologiques pour différentes matrices (sols, sédiments, boues et débris) et pour les principaux groupes de contaminants organiques, inorganiques et réactifs est résumée au tableau 4.1. La liste des contaminants que l'on retrouve dans chacun des groupes présentés (p. ex., composés volatils halogénés) est reproduite à l'Annexe B.

Tel qu'indiqué au tableau 4.1, les technologies biologiques conviennent pour une gamme de contaminants organiques tels les pesticides, les composés organiques volatils, les BPC, les pentachlorophénols, etc. Mais les contaminants inorganiques (métaux volatils et non volatils, substances radioactives, substances inorganiques corrosives, cyanures) et les composés réactifs, ne sont pas dégradés et peuvent même avoir des effets néfastes sur la biodégradation.

Il convient de souligner que l'on n'obtiendra pas nécessairement partout les niveaux d'efficacité présentés dans ce tableau vu que l'efficacité mentionnée se rapporte à des projets de démonstration à différentes échelles. Quant à l'évaluation de l'efficacité potentielle ou de la non efficacité pour un groupe de contaminants particuliers, elle est basée sur le jugement d'experts. Les remarques précédentes s'appliquent pour tous les tableaux du même genre qui seront présentés par après.

Les tests de biodégradation usuels sont peu fiables pour les sédiments contaminés, ces derniers renfermant très souvent plusieurs contaminants dont les effets toxiques peuvent affecter considérablement l'efficacité et la fiabilité des procédés de traitement biologique. D'autre part, les taux de biodégradation sur le terrain peuvent être sensiblement plus bas qu'en laboratoire où les conditions pour la biodégradation peuvent être optimisées (USEPA, 1991b).

Les procédés biologiques requièrent forcément des délais de réalisation plus longs que les procédés thermiques et chimiques et n'ont été appliqués à des sédiments contaminés que sur banc d'essai ou à l'échelle pilote.

Tableau 4.1 Efficacité des technologies de traitement biologique par groupe de contaminants et par type de déchets

GROUPE DE CONTAMINANTS	BIODÉGRADATION IN SITU / HORS SITE	BIODÉGRADATION EN PHASE HUMIDE
	SOLS / DÉBRIS	SOLS/SÉDIMENTS/BOUES
ORGANIQUES		
Volatils halogénés	2	1
Semi-volatils halogénés	1	2
Volatils non halogénés	2	1
Semi-volatils non halogénés	2	2
BPC	1	1
Pesticides(halogénés)	1	2
Dioxines/Furannes	Données insuffisantes	0
Cyanures organiques	X	1
Substances organiques corrosives	X	0
INORGANIQUES		
Métaux volatils	X	0
Métaux non volatils	X	0
Amiante	0	0
Matériaux radioactifs	X	0
Substances inorganiques corrosives	X	0
Cyanures inorganiques	X	1
RÉACTIFS		
Oxydants	X	0
Réducteurs	X	0

Légende

- 2: Efficacité de bonne à excellente; forte probabilité que la technologie soit efficace.
- 1: Efficacité de marginale à moyenne ou potentielle; des précautions doivent être prises dans le choix des technologies et l'opinion des experts est que cette technologie fonctionnera.
- 0: Efficacité nulle; les experts sont d'avis que la technologie ne pourra traiter ce type de déchets et de contaminants.
- X: Effets néfastes potentiels sur le procédé.

Source : USEPA (1989b; 1990e; 1991c).

4.3.4 Avantages, limites et applications démontrées de chaque technologie.

- Une synopsis des principaux avantages et des principales limites des biotechnologies pour le traitement de matrices contaminées est donnée au tableau 4.2.

De façon générale, les grands avantages des systèmes biologiques sont leur simplicité d'application, leur faible coût de mise en oeuvre et leur respect de l'environnement. On s'accorde à dire que les procédés biologiques sont de cinq à vingt fois moins dispendieux que les techniques chimiques et thermiques et qu'ils peuvent être utilisés pour traiter les contaminants sur place ce qui évite les coûts et les risques associés à l'utilisation et au transport de matières dangereuses (Samson, 1992).

Les méthodes biologiques présentent également l'avantage d'avoir été démontrées pour la restauration de sites contaminés un peu partout à travers le monde, et ont de ce fait été sélectionnées pour restaurer les sols contaminés de 31 sites et les eaux souterraines de cinq sites du *Superfund* aux États-Unis (USEPA, 1991c).

Cependant, les procédés biologiques ne peuvent éliminer complètement les contaminants que dans des conditions optimales, et requièrent forcément des délais de réalisation plus longs que les procédés thermiques ou chimiques.

Le tableau 4.2 fait ressortir que la biodégradation in situ de matrices contaminées présente des avantages indéniables aux plans économique et environnemental. Elle soulève néanmoins certaines interrogations, notamment en qui concerne le contrôle sur le site des contaminants et des éléments nutritifs, leurs incidences potentielles sur l'environnement, la toxicité des produits intermédiaires de la biodégradation et leurs effets à long terme.

Cependant, le biotraitement in situ des contaminants est probablement la seule technique qui permet de traiter des étendues importantes de sols et de sédiments contaminés. Cette technique est la seule applicable lorsqu'il y a un risque de contamination de la nappe phréatique. Cette biotechnologie est toutefois

Tableau 4.2 Avantages, désavantages et applications des biotechnologies dans le traitement de sols contaminés

TECHNOLOGIES	AVANTAGES	DÉSAVANTAGES	APPLICATIONS/DÉMONSTRATIONS
Biodégradation en place	<ul style="list-style-type: none"> . Capacité de traiter les hydrocarbures et certaines substances organiques, en particulier celles solubles dans l'eau et à faible concentration. . Solution très environnementale. . Généralement économique. . Minimise normalement les risques pour la santé, la sécurité publique et pour l'environnement reliés à l'excavation et au traitement, comparativement à d'autres technologies de traitement. 	<ul style="list-style-type: none"> . Difficile de contenir les contaminants et les éléments nutritifs à moins de conditions hydrogéologiques idéales. . Difficulté d'obtenir un bon mélange quand des contaminants hydrophobes sont présents en phase séparée ou en présence de strates hétérogènes. . Éléments nutritifs introduits peuvent avoir des impacts négatifs sur les cours d'eau à proximité. . Des produits intermédiaires de la biodégradation et des sous-produits toxiques peuvent être libérés dans l'environnement. . Les bactéries peuvent obstruer les pores du sol et limiter la circulation des eaux souterraines. . Les résidus peuvent entraîner des problèmes d'odeur et de goût. . Les effets à long terme sont inconnus. . L'enlèvement complet des contaminants n'est pas possible. . Fortement dépendant de conditions hydrogéologiques appropriées sur le site. 	<ul style="list-style-type: none"> . Technologies éprouvées pour les sols: en Amérique du Nord et un peu partout à travers le monde.
Épandage sur le sol	<ul style="list-style-type: none"> . Un bon mélange des sols durant l'excavation réduit les effets négatifs des argiles et des limons sur l'efficacité de traitement. . Comme les paramètres peuvent être mieux contrôlés, la biodégradation peut être accélérée. . Le procédé peut se réaliser dans une enceinte pour capter les émissions de composés dangereux durant le traitement. . Technologie bien éprouvée pour restaurer les sols contaminés par des hydrocarbures. . Relativement peu dispendieuse. . Ne requiert pas d'opérateurs spécialisés. 	<ul style="list-style-type: none"> . L'excavation de sols contaminés peut entraîner l'émission de composés dangereux. . Coûts additionnels reliés à l'excavation. . Nécessite des terrains additionnels. . Nécessite une gestion des matériaux excavés. 	<ul style="list-style-type: none"> . Technologies démontrées pour le traitement des hydrocarbures et des produits de préservation du bois dans les sols. . Technologies ont fait l'objet de beaucoup de recherches en Allemagne, Hollande et Danemark pour améliorer davantage la biodégradation.
Bioreacteur	<ul style="list-style-type: none"> . Très bon contrôle du procédé par le réacteur. . L'addition des éléments nutritifs, l'aération, la température et le pH peuvent être très bien suivis et contrôlés dans les réacteurs pour une biodégradation optimale. . Efficacités de destruction relativement élevées. . La biodégradation accélérée augmente le rythme de destruction par un facteur pouvant aller jusqu'à 100. 	<ul style="list-style-type: none"> . Les composés organiques peuvent se volatiliser en raison des forts mélanges associés à la nécessité de maintenir les sols en suspension, entraînant des possibilités d'émissions de ces composés à l'atmosphère. . Le procédé requiert la mise en place d'équipements de contrôle et de suivi des émissions. . Les temps de traitement peuvent s'étendre sur plusieurs semaines malgré une amélioration de la cinétique globale. . Augmente la complexité du procédé et les coûts de traitement. 	<ul style="list-style-type: none"> . Technologies démontrées en banc d'essai et à l'échelle pilote tant en Europe qu'en Amérique du Nord pour le traitement des sols. . Efficacité de traitement: huiles (43 %), HAP (99 %). . Démonstration à grande échelle pour la restauration d'un site contaminé au créosote (PCP).

Source : Adapté de CH2M Hill Engineering Ltd (1991).

moins développée et la complexité des mouvements des eaux souterraines, le type de sol, la présence de fractures dans la roche et la profondeur de la nappe sont autant de facteurs dont les effets sur l'activité biologique sont difficiles à prédire (Samson, 1992).

Les techniques d'épandage sur le sol sont éprouvées pour le traitement de sols contaminés par les hydrocarbures et sont relativement peu dispendieuses tout en ne nécessitant pas d'opérateurs spécialisés. Tel qu'indiqué au tableau 4.2, elles impliquent par contre l'excavation et la gestion de matériaux contaminés et elles requièrent habituellement des grands terrains.

Les bioréacteurs disponibles sur le marché américain (notamment ceux de Ecova Corporation, Detox, Remediation Technology Inc., Encore, Biotrol Inc., Goundwater Technolgy, ReTec) et au Québec (SNC-Lavalin, Sanivan) permettent une biodégradation optimale, en assurant un meilleur contrôle du procédé de biodégradation. Ces technologies impliquent forcément la mise en place de systèmes et d'équipements de contrôle, le traitement des émissions des substances organiques volatiles et en conséquence nécessitent des opérateurs plus spécialisés, ce qui augmente les coûts de traitement.

4.3.5 Avantages et limites pour le traitement des sédiments. - Les techniques de biodégradation sur place apparaissent très avantageuses pour le traitement des sédiments contaminés en raison des impacts potentiels associés au dragage de tels sédiments.

Comme pour les sols, la biodégradation des sédiments contaminés peut se faire de deux façons : par biotraitement après excavation des sédiments ou traitement des sédiments en place sans les excaver.

Le dragage des sédiments permet quatre types de traitement biologique : le compostage, le biotraitement en phase humide, le traitement en phase solide et l'épandage sur le sol. Le *compostage* et le *traitement en phase solide* impliquent le stockage et le brassage des sédiments dans des bassins ou cellules de traitement où l'humidité et le contenu en éléments nutritifs sont régulièrement contrôlés (USEPA, 1991b).

La méthode par *épandage* consiste à déposer les sédiments dragués sur la surface des sols sur une épaisseur de 15 à 22,5 cm. Le site peut être par la suite cultivé si les teneurs en contaminants ont été abaissées à des niveaux acceptables.

La biodégradation in situ implique l'amélioration de la biodégradation naturelle par l'ajout d'éléments nutritifs et d'un accepteur d'électrons. Lorsque de l'oxygène sert d'accepteur d'électrons, les concentrations de fer et de manganèse dans les sédiments sont importantes à considérer (USEPA, 1991a).

Un concept pour la biodégradation aérobie des sédiments contaminés est d'optimiser les conditions pour le développement d'organismes aérobies dans les bassins ou cellules de confinement terrestre par l'ajout d'éléments nutritifs et (ou) d'oxygène ou encore par la gestion de ces bassins (ou) cellules pour y maintenir des conditions aérobies.

La figure 4.8 illustre comment le traitement aérobie des sédiments en phase solide peut se réaliser.

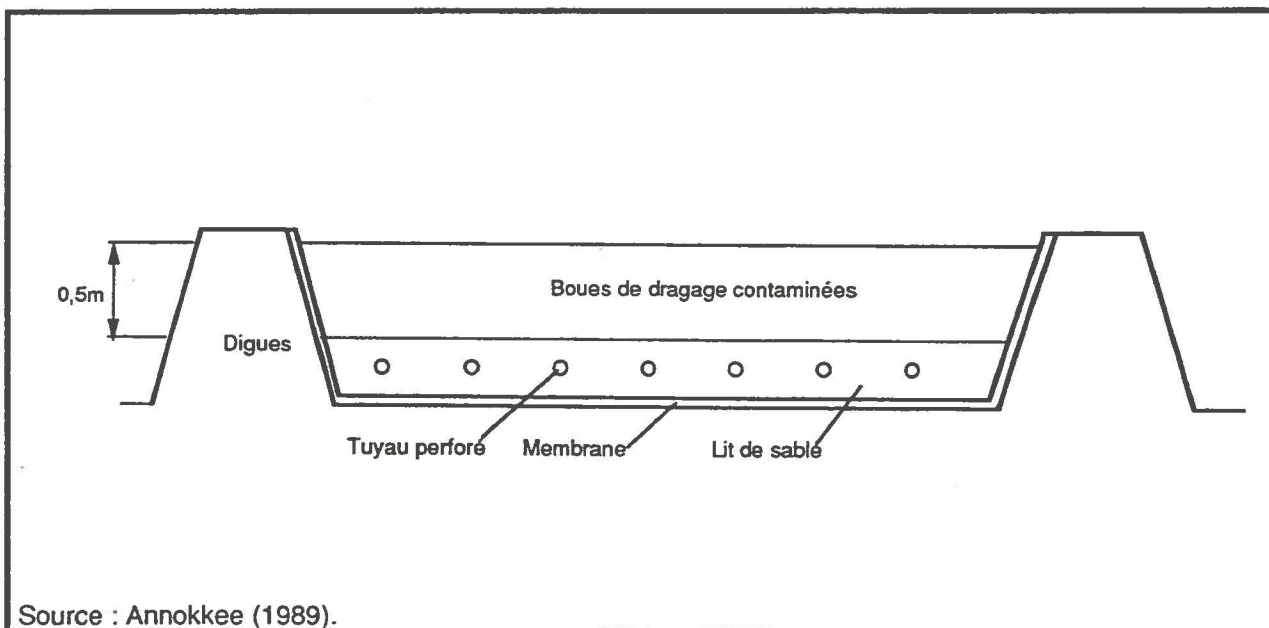


Figure 4.8 Vue en coupe d'un bassin de biodégradation en phase solide des sédiments

Le biotraitement en phase humide nécessite la production d'une boue qui est alors traitée dans un bioréacteur pour maintenir un mélange intime des sédiments avec les microorganismes. La figure 4.9 illustre le traitement des sédiments dans un bioréacteur rotatif.

La déchloration réductive, un potentiel redox de -250 mv ou moins des sédiments de même que l'absence d'oxygène, de nitrates ou de sulfates sont nécessaires pour la biodégradation anaérobie des composés organiques halogénés. La plupart des sédiments en place sont en conditions anaérobies avec plusieurs possibilités de biodégradation des contaminants dans les conditions ambiantes. Les sédiments peuvent être traités par biodégradation anaérobie dans des cellules ou bassins de confinement aménagés pour maintenir des conditions anaérobies (Averett et al., 1990).

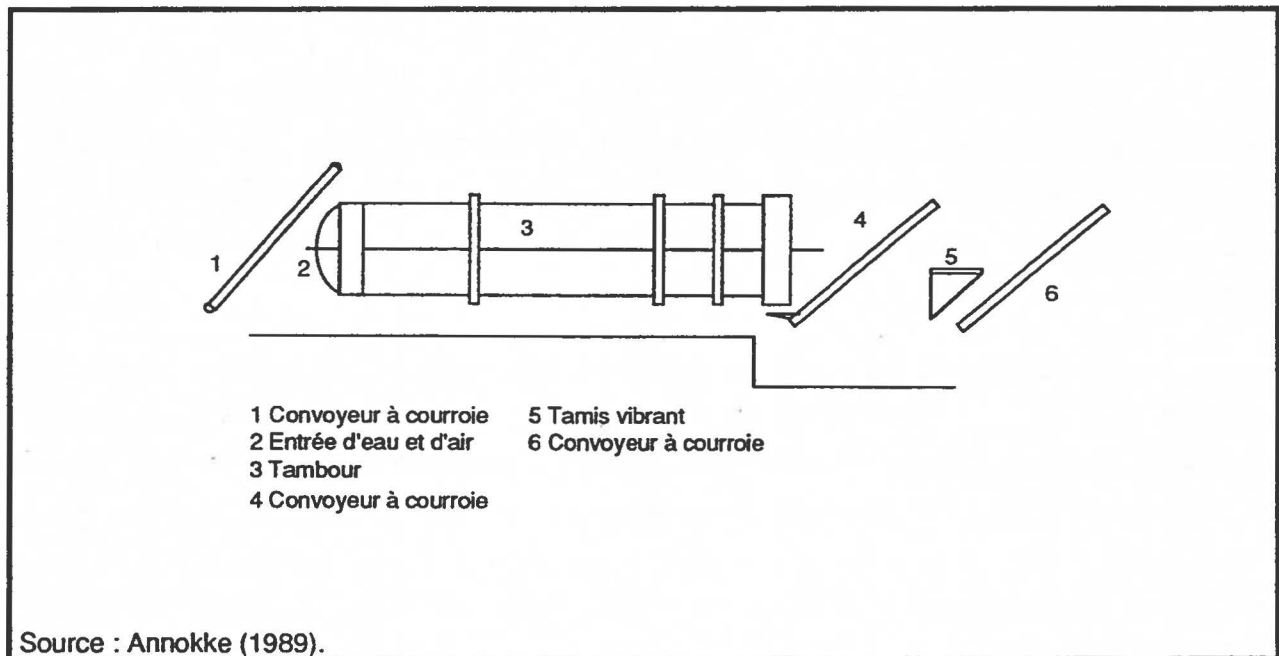


Figure 4.9 *Vue en coupe d'un bioréacteur rotatif en phase humide pour le traitement des sédiments*

Des essais de biodégradation anaérobie sur des sédiments de deux lacs près d'Athens, (GA) aux États-Unis ont été réalisés pour évaluer les conditions de

température et de potentiel redox sur la biodégradation anaérobie du dichloro-2,4 phénol. Après 127 jours d'incubation, à des conditions favorables pour la dénitrification, aucune déchloration réductive ne fut observée (Averett *et al.*, 1990).

La biodégradation anaérobie est encore conceptuelle; elle est lente et peu de composés peuvent être dégradés comparativement à la biodégradation aérobie.

La digestion anaérobie, qui utilise habituellement des réacteurs étanches munis de systèmes de ventilation ou de captage du méthane et du CO₂, est une technologie largement utilisée pour traiter les eaux usées faiblement à moyennement contaminées par des substances organiques. Les bactéries anaérobies sont communément un mélange de bactéries méthaniques qui utilisent le méthane comme source principale de carbone; elles se retrouvent dans les sédiments anaérobies et dans les boues des digesteurs. La digestion anaérobie est réalisée généralement dans des réacteurs étanches aménagés pour une ventilation ou le captage du méthane (CH₄) et du gaz carbonique (CO₂).

L'USACE de la région de Buffalo a déjà réalisé des essais de digestion anaérobie de sédiments dragués. Les résultats étaient moins bons que ceux obtenus avec des boues d'épuration d'eaux usées. Le volume des réacteurs nécessaires et la faible efficacité de cette technologie limitent son emploi pour le traitement des sédiments contaminés (Averett *et al.*, 1990).

La biodégradation des contaminants par compostage requiert beaucoup d'espace. L'utilité de ce procédé est de plus incertaine vu l'impossibilité de contrôler les conditions météorologiques et autres conditions. Ce procédé serait à plus forte raison difficile à appliquer pour des sédiments dragués vu leur fort contenu en eau et la nécessité d'un contenu élevé en matière organique. Les difficultés additionnelles concernent la nécessité de retourner et d'aérer régulièrement les sédiments et le contrôle des eaux de lixiviation et de ruissellement. Les coûts d'un procédé allemand de compostage varient entre 82 et 136 US \$/t (Averett *et al.*, 1990).

La dégradation des substances organiques telles que les composés aliphatiques, aromatiques et hétérocycliques, peut être réalisée par réactions enzymatiques. Les enzymes produits par les microorganismes peuvent être cultivés dans des réacteurs et être appliqués aux sols et aux sédiments contaminés.

Comparativement aux microorganismes, l'activité enzymatique demeure viable dans un environnement défavorable où l'on retrouve des températures et des pH extrêmes et de fortes salinités et concentrations de solvants. Les enzymes peuvent aussi être sujets à une dégradation chimique ou biologique, être lessivés à l'extérieur de la zone à traiter et peuvent devenir inactifs ou moins actifs lorsque liés aux argiles et à l'humus des sédiments (Averett *et al.*, 1990).

Les propriétés des sédiments pouvant grandement influencer la biodégradation incluent le type et la quantité d'argile, la capacité d'échange ionique, le contenu en matière organique, le pH, les teneurs en fer et en manganèse actifs, les conditions d'oxydo-réduction et enfin la salinité. Certaines caractéristiques du site peuvent aussi influencer sensiblement la biodégradation, notamment :

- les caractéristiques physico-chimiques des sédiments et les concentrations de contaminants, en particulier les substances organiques présentes dans les sédiments;
- les microorganismes présents dans les sédiments et la capacité de ceux-ci à dégrader, co-métaboliser ou adsorber les contaminants;
- la biodégradabilité des contaminants (demi-vie, constantes de réaction);
- les produits générés par la biodégradation;
- la profondeur, le profil et la distribution spatiale des contaminants dans les sédiments;
- les propriétés des sédiments pouvant influencer l'activité biologique : pH, teneur en oxygène, pourcentage d'humidité, teneur en éléments nutritifs et en matières organiques, température, etc.;
- la texture des sédiments, la capacité de rétention en eau, le degré de structure et le potentiel d'érosion;
- les conditions hydrodynamiques du site (USEPA, 1991b).

Dans le cadre du projet de restauration et de réaménagement du canal de Lachine, la Division des technologies de restauration du Centre Saint-Laurent a procédé à la sélection et à la validation en laboratoire de procédés de traitement de sédiments contaminés applicables à la problématique de ce canal. Sept promoteurs

dont six utilisaient des procédés de fixation physique et (ou) chimique et un promoteur, un procédé biologique, ont participé à la phase de validation en laboratoire et ont soumis une proposition pour la réalisation d'un essai pilote devant conduire éventuellement à un projet global de restauration (Centre Saint-Laurent, 1992b).

L'un des procédés testés en laboratoire comportait trois phases. La première phase consiste à biodégrader les contaminants organiques des sédiments avec des microorganismes brevetés. Dans la deuxième phase, les métaux lourds contenus dans les sédiments sont éliminés par extraction chimique et (ou) par fixation à l'aide de bactéries brevetées. Le solvant et (ou) la biomasse contenant les métaux lourds sont ensuite récupérés.

Les résultats des essais en laboratoire ont cependant démontré que les sédiments ainsi traités étaient inaptes à une mise en dépôt dans le canal ou dans une décharge contrôlée car leurs teneurs en contaminants dépassaient les critères admissibles pour la protection de la vie benthique et les teneurs en contaminants retrouvés dans les lixiviats étaient supérieures aux normes régissant les eaux de lixiviation de ces décharges (Centre Saint-Laurent, 1992b).

4.3.6 Technologies démontrées pour le traitement des sédiments. - Jusqu'à la fin des années 1980, les biotechnologies pour le traitement de sédiments contaminés ont été testées uniquement en banc d'essai (voir tableau 4.3). Depuis 1990, quelques projets de dépollution de sédiments ont été réalisés à grande échelle; le tableau 4.4 présente les biotechnologies qui ont été démontrées pour le traitement de sédiments contaminés, en précisant le nom des promoteurs, le lieu et l'échelle de démonstration ainsi que le type de contamination.

Des essais de compostage sur le terrain ont été réalisés pour restaurer des lagunes de sédiments contaminés par du trinitrotoluène (TNT) dans une usine d'armement en Louisiane. Les résultats ont démontré une réduction des teneurs de 12 000 ppm à 3 ppm (USEPA, 1991b).

Considérant que le traitement biologique des sédiments pourrait être plus économique et que les sédiments traités destinés à être réutilisés devraient être plus

acceptables pour l'environnement que ceux traités par voies physico-chimique ou thermique, le gouvernement néerlandais accentue ses recherches depuis plusieurs années selon deux scénarios : 1) technologies pour de petits volumes de sédiments et 2) technologies pour de grands volumes (Van Veen, 1988).

The Netherlands Organization for Applied Research (TNO) (Hollande) a mis au point, pour des essais en laboratoire, un bioréacteur en phase humide et un bioréacteur en phase solide pour traiter les sols et des sédiments contaminés par des huiles minérales, des substances aromatiques polychlorées et autres hydrocarbures non chlorés. Le bioréacteur en phase solide est similaire au compostage tandis que celui en phase humide est semblable à un système de traitement aérobie à boues activées. Des expériences avec des unités pilotes pour un rendement de 11 tonnes par jour ont été réalisées. Les coûts de traitement anticipés étaient de 45 US \$/t (Averett *et al.*, 1990).

La figure 4.10 illustre les scénarios hollandais de biotraitement des sédiments faisant actuellement l'objet de projets de recherche en laboratoire, en banc d'essai et à l'échelle pilote.

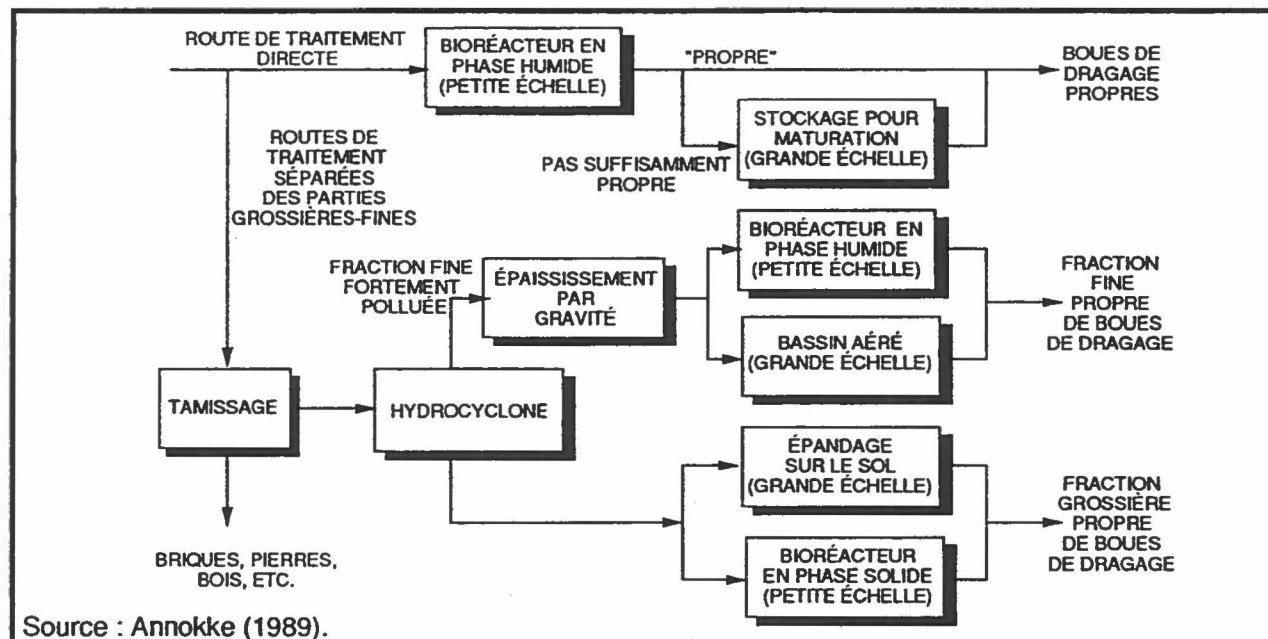


Figure 4.10 Scénarios hollandais pour le traitement des sédiments par biodégradation

Tableau 4.3 Évaluation de la performance anticipée des biotechnologies pour la dépollution de sédiments

TECHNOLOGIE	STADE DE DÉVELOPPEMENT	APPLICATION AUX SÉDIMENTS	DISPONIBILITÉ	COTE DE PERFORMANCE(**)		
				Efficacité	Application	Coûts
Bioréacteur (*)	Démontré	Non	Oui	3	1	3
Biodégradation aérobie	Démontré	Banc d'essai	Oui	3	3	3
Biodégradation anaérobie	Démontré	Non	Oui	3	3	3
Compostage	Démontré	Non	Oui	3	2	2
Digestion aérobie	Démontré	Banc d'essai	Oui	2	2	2
Procédés enzymatiques	Conceptuel	Non	Oui	2	1	3

Remarques :

* Les technologies en caractère gras ont été retenues par l'USACE et l'USEPA pour des projets de démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs.

** Voir tableau 3.3. pour la signification des cotes de performance.

Source: Averett et al. (1990).

Tableau 4.4 Biotechnologies démontrées pour le traitement de sédiments contaminés

TECHNOLOGIE	PROMOTEUR (*)	LIEU DE DÉMONSTRATION		ÉCHELLE DE DÉMONSTRATION	TYPE DE CONTAMINATION	RÉFÉRENCE
		PAYS	SITE			
Biodégradation . Compostage	Non défini	É.-U.	Louisiana Army Ammu- nitions Plant	Pleine échelle	Trinitrotoluène (TNT)	US EPA (1991b)
Biodégradation . Bioréacteur	Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO) Encore Environmental	Hollande	Port de Rotterdam	Laboratoire	Huiles et substances organiques	USEPA (1991b)
		É.-U.	Rivière Hudson	Banc d'essai	BPC	Averett et al. (1990)
Biodégradation . Bassin d'aération	Development Program Treatment Processes for Polluted Aquatic Sedi- ments (DTPP) and TNO	Hollande	Ports de Geul et Zierickzee	Pleine échelle	HAP, huiles et hydro- carbures chlorés	Dillen et Bruggeman (1992).
Biodégradation . Épandage sur le sol	Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO) Development Program Treatment Processes for Polluted Aquatic Sedi- ments (DTPP)	Hollande	Port de Rotterdam	Banc d'essai	Métaux lourds et substances organiques	USEPA (1991b)
		Hollande	Ports de Geul et Zierickzee	Pleine échelle	HAP, huiles et hydro- carbures chlorés	Dillen et Bruggeman (1992).
Biodégradation . Aérobie	Radian Corporation(1989)	É.-U.	Port de New Bedford, Mass.	Banc d'essai	BPC	USEPA (1991b) Averett et al. (1990)
Biodégradation . In situ	Haecon N.V.	Belgique	Edegemand Zebrugge	Pleine échelle	Hydrocarbures organiques particuliers	Environment Canada (1993)
		Hollande	Bakhuisterwant, Zoeterwoude			
Biodégradation . Compostage	Dearborn	Canada	Thunder Bay Rivière Ste-Marie Port de Hamilton Ontario	Banc d'essai	HAP, chlorophénols	Environment Canada (1993)

* Les adresses et numéros de téléphone des promoteurs sont précisés à l' Annexe C .

Tel qu'illustré à la figure 4.10, dans le premier scénario, des bioréacteurs en mode par lots, d'une capacité maximale de 500 m³ sont utilisés pour de petits volumes de sédiments à traiter. Ce scénario implique un traitement intensif dans des temps très courts et ne requiert pas la séparation des particules par des hydrocyclones. Dans le second scénario applicable à de grands volumes, le traitement débute par la séparation des parties grossières et des parties fines des sédiments. Les fractions fines sont ensuite traitées dans des bassins d'aération. Les parties plus grossières peuvent être épandues sur le sol, ce qui implique généralement des temps de traitement relativement longs, l'ajout d'éléments nutritifs et le brassage régulier des sédiments pour un apport additionnel d'oxygène.

Les essais de biodégradation, par épandage en couche mince (environ 30 cm) de sédiments des ports de Geul et de Zierikzee contaminés par des HAP, des huiles et des hydrocarbures chlorés, dans une cellule de dépôt de matériaux de dragage, démontrèrent après 1 an une dégradation de 60 à 80 p. 100 des HAP. Les coûts estimés pour ce type de traitement variaient de 25 à 60 US \$ par m³ de sédiments en place (Dillen et Bruggeman, 1992).

Par ailleurs, les essais de biodégradation de sédiments en laboratoire dans des bioréacteurs en phase humide ont démontré que cette technologie permettait d'obtenir une dégradation acceptable des contaminants. Toutefois, pour être économique, le temps de séjour des sédiments dans les bioréacteurs devrait être très court (de quelques jours à une semaine). Or, pour obtenir un niveau de dégradation acceptable et même en ajoutant des bactéries et en augmentant la température, des temps de séjour de un à deux mois étaient quand même nécessaires. Le gouvernement hollandais a donc abandonné les recherches pour le traitement des sédiments dans des bioréacteurs en phase humide à la suite des essais en laboratoire. Les coûts de traitement anticipés estimés pour des temps de séjour de 4, 7 et 30 jours s'élevaient à respectivement 70, 100 et 375 US \$ par m³ de sédiments traités (50 p. 100 de matière sèche) (Dillen et Bruggeman, 1992).

Des essais de biotraitement des sédiments contaminés par des HAP, des huiles à fractions légères, dans des étangs aérés et après une séparation par hydrocyclone, ont démontré une réduction de 70 à 80 p. 100 des teneurs en contaminants pour les sédiments du port de Geul et de l'ordre de 30 p. 100 pour ceux

du port de Zierikke, en Hollande. Les coûts de traitement estimés pour des temps de séjour de 2, 4 et 8 mois étaient respectivement de 7, 12 et 20 US \$ par m³ de sédiments traités et pollués par des fractions légères (10 p.100 de matière sèche).

Les recherches de biotraitement des sédiments au Pays-Bas ont finalement démontré que les biotechnologies laissaient des concentrations résiduelles de contaminants au point que les objectifs pour l'an 2000 de qualité pour les sédiments fixés par le gouvernement néerlandais pour les HAP et les huiles n'étaient jamais rencontrés. Les recherches se poursuivent pour abaisser les teneurs résiduelles à des niveaux acceptables.

Radian Corporation a procédé en 1989 à des tests de biodégradation aérobie en banc d'essai pour enlever les BPC des sédiments d'un site du *Superfund*, le port de New Bedford, au Massachusetts. Les résultats indiquaient une réduction des concentrations globales de BPC avec toutefois une réduction préférentielle des groupes de di- et tri-isomères dans les réacteurs actifs comparés à des réductions uniformes de tous les groupes de BPC dans les réacteurs de contrôle (Averett *et al.*, 1990).

La compagnie Heacon N.V. a réalisé des projets de démonstration pleine échelle de biotraitement in situ des sédiments dans différents ports de Belgique (voir tableau 4.4). Les résultats de ces essais ne sont toujours pas disponibles.

La compagnie Dearborn Environmental Consulting Group, de Mississauga (Ontario), a réalisé des tests de biodégradation (compostage) en banc d'essai de sédiments contaminés par des HAP et des chlorophénols des ports de Hamilton, Thunder Bay et de la rivière Ste-Marys. Les résultats préliminaires indiquent une réduction significative des HAP en utilisant des surfactants et des matières organiques biodégradables (Wastewater Technology Center, 1992b). Des essais pilotes avec des sédiments du Port de Hamilton ont été réalisés à l'automne 1992. Ces projets de démonstration sont financés par le Bureau de l'environnement des Grands Lacs, d'Environnement Canada, via le Fonds fédéral d'assainissement des Grands Lacs.

Un autre procédé de biotraitement (bioréacteur en phase humide) financé par ce Fonds, a été également testé pour les sédiments du Port de Toronto, durant l'été 1992. Le bioréacteur utilisé pour ces essais a été conçu par SNC-Lavalin de façon à accélérer la biodégradation et à obtenir des efficacités de destruction élevées et ce,

même pour le traitement des hydrocarbures chlorés et de poids moléculaire élevé. On procède en premier lieu à une oxydation chimique pour oxyder les substances organiques afin de réduire leur poids moléculaire pour faciliter et accélérer leur biodégradation.

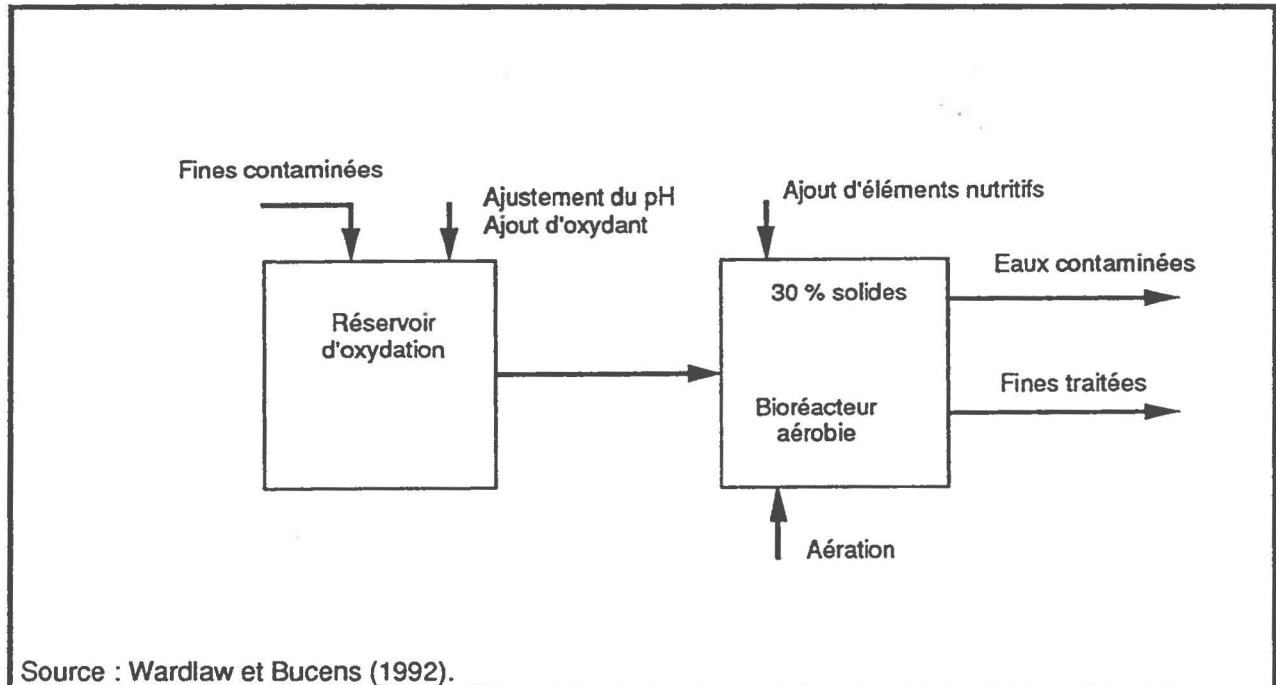


Figure 4.11 Schéma de principe du bioréacteur de SNC-Lavalin

Tel qu'illustré à la figure 4.11, les sédiments à traiter sont d'abord placés dans un réservoir pour un ajustement du pH et l'ajout d'oxydant. Le produit est ensuite dirigé dans les bioréacteurs pour une biodégradation aérobie par l'ajout d'éléments nutritifs et en aérant le mélange pendant au moins quatre semaines (Wardlaw et Bucens, 1992)

La Toronto Harbour Commissioners a recours à ce procédé comme dernière étape d'une chaîne de traitement, les deux étapes précédentes étant le lavage et l'extraction des métaux. Consulter la section 4.8 pour de plus amples détails sur la chaîne de traitement de cette Commission.

On a de plus en plus recours au pré-traitement des sédiments avant de les soumettre à la biodégradation afin d'éliminer les contaminants récalcitrants à la biodégradation ou les contaminants pouvant inhiber l'action des microorganismes, par exemple les métaux lourds.

Dans le procédé de traitement biologique Bio-Clean développé par la compagnie américaine Encore Environmental et proposé pour traiter les sédiments fortement contaminés par les BPC de la rivière Hudson (États-Unis), les sédiments dragués sont traités dans neuf réacteurs en série opérant en continu, placés sur des barges, ce qui élimine le transport de sédiments contaminés sur de longues distances. Le procédé utilise des bactéries indigènes pour dégrader les contaminants organiques. Ce procédé par lots implique l'extraction, la stérilisation et la solubilisation des contaminants en utilisant de hautes températures, un pH élevé et la biodégradation. Les coûts de traitement estimés varient entre 130 et 270 US \$/verge cube (Averett *et al.*, 1990; USEPA, 1991b).

4.3.7 Technologies en démonstration pour le traitement des sédiments. - En fonction des critères d'évaluation et de sélection des technologies utilisés par l'USEPA et l'USACE tels que définis au chapitre 3, le tableau 4.5 présente les biotechnologies retenues pour des projets de démonstration en vue de la dépollution des sédiments des Grands Lacs. Le tableau présente également les biotechnologies qui font l'objet de recherches au Canada et au Pays-Bas.

Les biotechnologies retenues pour des projets de démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs sont les procédés utilisant des bioréacteurs ou autres procédés de traitement aérobie et anaérobie, indiqués au tableau 4.3. À l'exception des bioréacteurs dont l'application pour les sédiments reste à démontrer, l'ensemble de ces technologies devraient avoir une efficacité de destruction, une facilité d'application et des coûts acceptables comparativement aux autres technologies considérées : compostage, digestion anaérobie et procédés enzymatiques, dont les limites particulières pour le traitement des sédiments ont été exposées précédemment.

Tableau 4.5 Biotechnologies en démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs et en Europe

TECHNOLOGIE	PROMOTEUR (*)	LIEU DE DÉMONSTRATION		ÉCHELLE DE DÉMONSTRATION	TYPE DE CONTAMINATION	RÉFÉRENCE
		PAYS	SITE			
Biodégradation . Aérobie et . Anaérobie	Non défini	É.-U.	Rivières Buffalo Ashtabula	Banc d'essai Banc d'essai	HAP, huiles et graisses BPC, organochlorés	USEPA (1992a)
			Baie Saginaw	Banc d'essai	BPC	
			Port Sheboygan	Banc d'essai	BPC	
Biodégradation . Épandage . Bassin d'aération	Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO) Development Program Treatment Processes for Polluted Aquatic sedi- ments (DTPP)	Hollande	Ports de Rotterdam et de Hamburg	Pleine échelle	Substances organiques	Annokkee (1989)
		Hollande	Ports de Geul et Zierickzee	Pleine échelle	HAP, huiles et hydro- carbures chlorés	Dillen et Bruggeman (1992).
Biodégradation . Compostage	Dearborn Environmental Consulting Group	Canada	Ports de Thunder Bay, de Hamilton et de Sault Ste-Marie Ontario	Pilote	Chlorophénols, HAP	Environment Canada (1993)
Biodégradation . Bioréacteur	Institute of Gas Technology SNC-Lavalin	Canada	Port de Hamilton Ontario	Banc d'essai	Chlorophénols, HAP	Environment Canada (1993)
		Canada	Port de Toronto	Pilote	HAP	
Biodégradation . Anaérobie in situ	Michigan Biotechnology Institute	É.-U.	Non défini	Laboratoire	BPC	Samson (1992)

* Pour les adresses et les numéros de téléphone des promoteurs, consulter l' Annexe C .

En raison du grand potentiel des biotechnologies de dépollution, l'USEPA investit chaque année des dizaines de millions de dollars dans la recherche fondamentale. À titre d'exemple, le Michigan Biotechnology Institute a obtenu en 1991 une subvention de 15 millions de dollars pour l'étude des mécanismes de biodégradation des organochlorés (déchloration réductive) dans des conditions anaérobies en vue de développer une technologie de dépollution in situ des sédiments contaminés par des BPC (Samson, 1992).

Tel qu'indiqué au tableau 4.5, les projets de démonstration de biotechnologies pour le traitement de sédiments contaminés se poursuivent en banc d'essai ou à l'échelle pilote dans le cadre de projets de démonstration financés par le Fonds d'assainissement des Grands Lacs (Environment Canada, 1993). En plus des technologies présentées à la section précédente, le tableau montre que les sédiments du port de Hamilton font actuellement l'objet de banc d'essai avec un procédé chimique-biologique développé par l'Institute of Gas Technology (IGT) de Chigago.

Le procédé chimique-biologique IGT, qui a démontré son efficacité en banc d'essai pour le traitement des composés organiques (BPC, HAP et hydrocarbures volatils) présents dans des sols et des boues, combine deux technologies : 1) pré-traitement par oxydation chimique avec des sels métalliques et du peroxyde d'hydrogène pour produire un radical d'hydroxyle pour modifier et dégrader les composés organiques; 2) traitement biologique aérobie ou anaérobie utilisé seul (ou) en séquence, dépendant des contaminants à traiter (USEPA, 1992f).

Tel qu'indiqué au tableau 4.5, en Europe, en particulier en Hollande, en Belgique et en Allemagne, les recherches se poursuivent également par la réalisation de projets de démonstration de biotraitement sur une échelle réelle.

Tableau 4.6 Liste des projets de dépollution des sédiments par des biotechnologies dans le cadre du programme d'innovation technologique (États-Unis)

NOM DU SITE, ÉTAT	TECHNOLOGIE	NATURE DES OPÉRATIONS	MATRICE (QUANTITÉ)	PRINCIPAUX CONTAMINANTS TRAITÉS	STATUT	CONTACTS TÉLÉPHONIQUES
L.A. Clarke & Sons, VA	Biotraitement sur le site : à déterminer	Préservation du bois	Soils: (73 700 v.c.) Sédiments: (45 300 v.c.)	Créosote, HAP et VOC (Benzène)	Pilote: 1992 Conception: Hiver 1993	Gene Wingert 215-597-1727
Moss-American, WI	Biotraitement en phase humide des parties fines du lavage des sols et des sédiments	Préservation du bois	Fines des sols: (80 000 v.c.) Sédiments: (5 200 v.c.)	HAP	Conception: Hiver 1993	Betty Levis 312-886-4784
Burlington Northern (Somers Plant), MT	Épandage	Préservation du bois	Soils et sédiments combinés: (11 700 v.c.)	Créosote, HAP et SVOC (Phénols)	Conception: Automne 1992	Jim Harris 406-449-5414
French Limited, TX	Lagune in situ	Pétrochimique	Boues, sédiments: (70 100 v.c.)	VOC (BTEX), HAP, hydrocarbures et BPC	En conception	Judith Black 214-665-6735

Source : USEPA (1991c).

4.3.8 Technologies retenues pour des projets de dépollution de sédiments. -

Le tableau 4.6 présente trois projets de biotraitement hors site et un projet in situ où les biotechnologies ont été retenues pour la dépollution de sédiments contaminés aux États-Unis. Ces projets sont entrepris dans le cadre du programme d'innovation technologique. Tel qu'indiqué dans le tableau, la plupart de ces projets étaient en phase de conception en 1991. Il était prévu que les essais de dépollution à proprement parler seraient complétés à l'automne 1992 ou à l'hiver 1993.

Le tableau 4.7 présente la liste de 13 sites américains où les biotechnologies étaient planifiées, considérées ou en réalisation pour la dépollution de sédiments contaminés en vertu du *Comprehensive Environmental Response Compensation and Liability Act* (CERCLA), du *Resource Conservation Act* (RCA) et du règlement UST (Underground Storage Tank) sur les réservoirs souterrains.

Tableau 4.7 Liste des projets de dépollution des sédiments par les biotechnologies dans le cadre des programmes CERCLA, RCRA et UST

NOM DU SITE, ÉTAT	TECHNOLOGIE	MATRICE	PRINCIPAUX CONTAMINANTS	STATUT	CONTACTS TÉLÉPHONIQUES
Charlestown Navy Yard Boston NHP	In situ	Sédiments	HAP	Pilote: 1991	Steven Carlson 617-242-5680
General Electric Pittsfield MA	Hors site	Sols et sédiments	BPC	Pilote: 1992	Joan Blake 202-382-6236
General Electric Pittsfield MA	In situ	Sédiments	BPC	Pilote: 1992	Joan Blake 202-382-6236
Pine Street Canal Burlington, VT	Sols: in situ Eaux souterraines: filtres biologiques	Sols, sédiments, eaux souterraines	HAP	Banc d'essai: Automne 1990	Ross Gilleland 617-573-5766
Alcoa Massena, NY	Non déterminée	Sédiments	BPC	Études préliminaires	Lisa Carson 212-264-6857
General Motors Massena NY	Non déterminée	Sols, sédiments, boues, eaux souterraines	BPC, HAP, matières volatiles	Essais de traitabilité	Lisa Carson 212-264-6857
Reynolds Metals NY	Non déterminée	Sédiments	BPC	Études préliminaires	Lisa Carson 212-264-6857
Moss American Milwaukee, WI	Bioréacteurs en phase humide utilisant des micro- organismes indigènes	Sols, sédiments	HAP	Pilote: complété Conception: Été 1991	Betty Lewis 312-866-4784
Sheboygan River and Harbor, WI	Biodégradation naturelle et améliorée dans un bâtiment fermé; traitement in situ dans les sédiments recouverts	Sédiments	BPC	Pilote: 1991	Bonnie Eleder 312-886-4885
St-Louis River, MN	Non déterminée	Sols, sédiments	HAP	Essais de traitabilité	Debbie Siebers 312-353-9299
Burlington Northern Somers, MT	In situ	Sols, sédiments, eaux souterraines	HAP, zinc, phénol	Échelle réelle: 1992	Jim Harris 406-449-5414
J.H. Baxter Weed, CA	Épandage sur le sol	Sols, sédiments, eaux souterraines	Arsenic, chrome, PCP, HAP, dioxines, furannes zinc	Essais de traitabilité complétés	Mary Masters 415-744-2370
Celanese Fibers Opera- tions Shelby, NC	Bioréacteurs en séquence	Sols, sédiments, eaux souterraines	bis (2 éthylhexyle) phtalate	Essais de traitabilité complétés	Ken Mallary 404-377-7791

Source : USEPA (1991c).

4.3.9 Conclusions. - Les sections précédentes ont montré que les biotechnologies peuvent avantageusement être utilisées pour le traitement de la plupart des contaminants organiques dans les sédiments. Cependant, la présence des métaux lourds ainsi que certaines caractéristiques des sédiments tels le pourcentage d'argile, le contenu en matière organique et le pH peuvent limiter la biodisponibilité des contaminants. Les technologies de pré-traitement peuvent par ailleurs augmenter cette biodisponibilité, soit en augmentant la surface active, soit par l'ajout de substances structurantes ou encore par l'emploi de procédés de lavage ou d'autres technologies pouvant extraire les métaux.

Jusqu'à présent, les biotechnologies pour le traitement des sédiments ont surtout été testées en laboratoire sur banc d'essai ou sur une base de pleine échelle. Aux États-Unis, les résultats de ces projets de démonstration ont quand même été suffisamment concluants pour que les biotechnologies soient retenues pour les travaux de dépollution de sites présentant des sédiments contaminés. C'est seulement suite à la publication des résultats de ces projets qu'il sera possible de préciser les coûts des biotechnologies pour le traitement des sédiments et de vérifier si les conditions de biodégradation pour des projets de dépollution de milliers de mètres cubes de sédiments pourront être optimisées aussi bien dans les conditions de banc d'essai ou d'échelle pilote.

4.4 Traitement par extraction physico-chimique

4.4.1 Principe de traitement. - Les procédés d'extraction physico-chimique consistent à enlever les contaminants d'un milieu support, par exemple les sols ou les sédiments, par dissolution dans un liquide, l'eau par exemple qui est ensuite récupéré et traité. Les procédés d'extraction enlèvent les substances organiques ou les métaux des matrices à traiter sans toutefois détruire ou modifier la structure chimique des contaminants. Les effluents obtenus sont plus concentrés en contaminants que les sols ou les sédiments introduits.

Tel que mentionné par l'USEPA, le terme "extraction" se réfère traditionnellement à une extraction chimique. Ce terme est toutefois de plus en plus utilisé pour englober toutes les technologies qui permettent essentiellement une réduction de volume des polluants, en enlevant d'abord les contaminants des matrices à traiter, puis en les concentrant dans un autre milieu. Par exemple, si l'on applique la présente définition aux technologies de lavage des sols habituellement distinguées des technologies d'extraction chimique, le lavage des sols est considéré comme une technologie d'extraction (USEPA, 1991b).

Pour les contaminants organiques, les technologies d'extraction doivent être considérées comme une étape d'une chaîne de traitement étant donné que les contaminants doivent être détruits ou de nouveau traités après extraction soit de façon thermique, physico-chimique et (ou) par biodégradation. En concentrant les contaminants dans un plus petit volume de sédiments ou de résidus, des réductions significatives des coûts de traitement peuvent être ainsi réalisées (USEPA, 1991b).

Selon qu'il s'agit d'une contamination organique ou inorganique, les agents d'extraction pouvant être utilisés sont : l'eau, les acides et les bases, les chélateurs et les agents complexants, les surfactants, le kérosène, le méthanol, l'éthanol, l'isopropanol furfural, le diméthylformaldéide, le toluène, le sulfoxide diméthyle, l'éthylène diamine, les mélanges de fréon et de dioxyde de carbone ou de propane utilisés dans des conditions de pression et de température critiques ou supercritiques. La plupart de ces procédés requièrent plusieurs cycles d'extraction pour obtenir de hautes efficacités d'enlèvement (Averett *et al.*, 1990).

La figure 4.12 illustre le schéma de principe des procédés d'extraction utilisés pour le traitement des sols, qui devrait être similaire pour le traitement des sédiments.

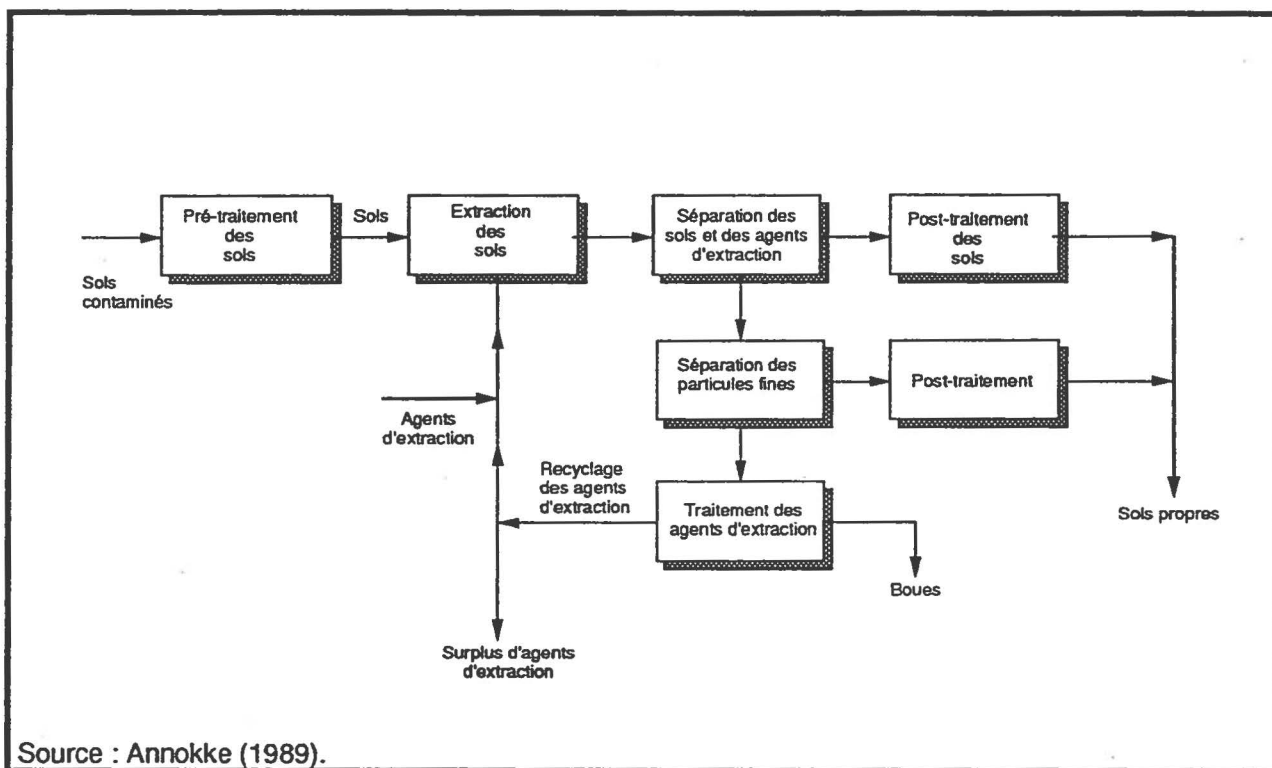


Figure 4.12 Schéma de principe des procédés d'extraction

Les technologies d'extraction de contaminants des sols peuvent avoir de nombreuses applications dans le traitement des sédiments contaminés. En effet, les volumes considérables de sédiments à traiter, dont la teneur en polluants est faible, rendent ces technologies des plus intéressantes puisqu'elles sont capables de concentrer les contaminants dans de petits volumes de sédiments ou de résidus et ainsi permettre des réductions importantes des coûts de traitement (USEPA, 1991a).

4.4.2.1 Lavage. - Les technologies de lavage des sols utilisent de l'eau et l'action mécanique pour enlever les contaminants liés physiquement aux particules des sols. Elles se basent sur le fait que les contaminants ont tendance à adhérer au carbone organique et à la fraction fine des sols (limon et argile). La contamination superficielle est souvent enlevée de la fraction grossière par un récurage abrasif (USEPA, 1992c).

La figure 4.13 indique les intrants et les extrants du procédé.

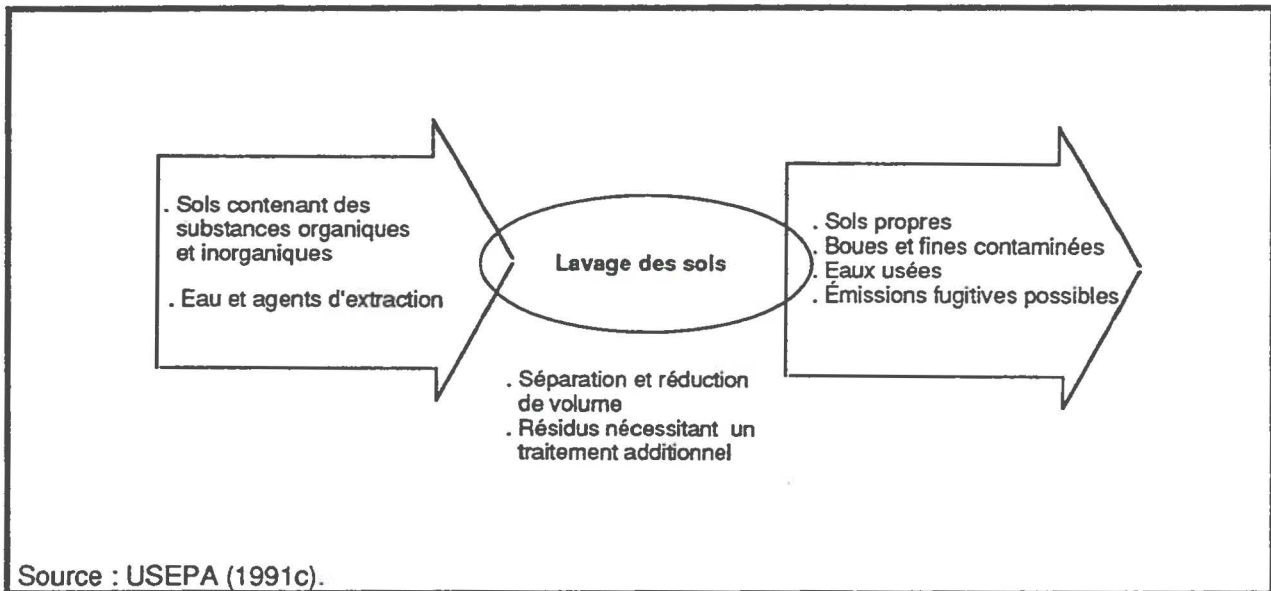


Figure 4.13 Intrants et extrants des procédés de lavage des sols

L'eau, à laquelle on a ajouté des agents d'extraction, peut être utilisée pour nettoyer physiquement les sols contaminés. Quand les sols sont laissés en place, le procédé est appelé *lavage par immersion* (flushing) et lorsque les sols sont enlevés et mis en contact avec un liquide, le procédé est appelé *lavage des sols*.

La composition du fluide utilisé pour le lavage des sols dépend des contaminants à enlever. Le médium de lavage peut être de l'eau pure ou peut contenir des acides (lixiviation des métaux ou neutralisation des sols alcalins), des bases (neutralisation des contaminants acides), des chélateurs (solubilisation des métaux lourds), des surfactants (amélioration de l'enlèvement des contaminants organiques des

sols et de la capacité de l'eau d'émulsifier les composés organiques insolubles), ou encore des réducteurs (pour réduire les composés oxydés). Les contaminants des sols peuvent se dissoudre, former des émulsions ou réagir chimiquement. Ainsi, lorsque l'extraction de composés dangereux peut entraîner des réactions chimiques entre les composés et les solutés dans l'eau, le traitement n'est pas alors seulement physique mais devient chimique.

La figure 4.14 illustre le schéma de principe des procédés de lavage des sols.

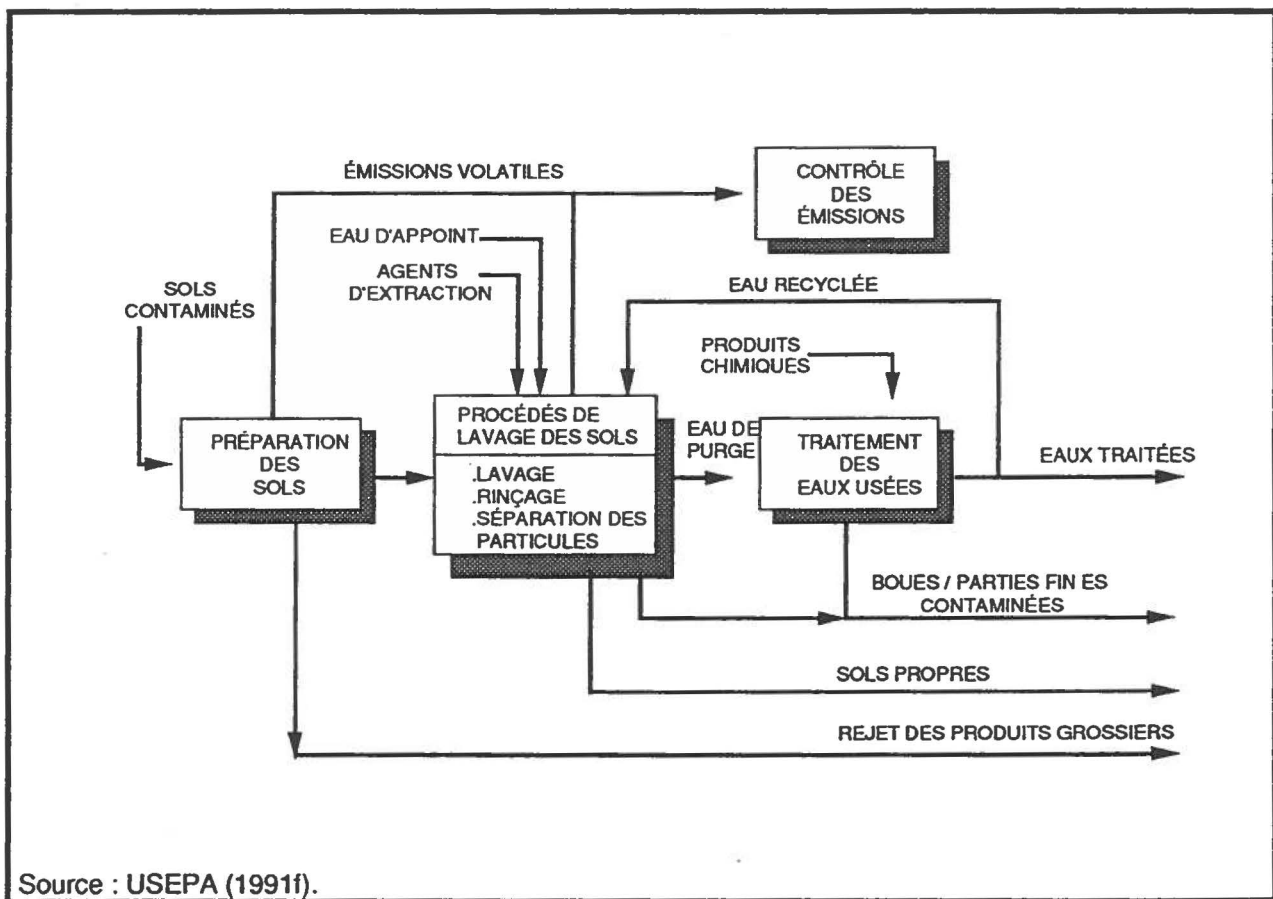


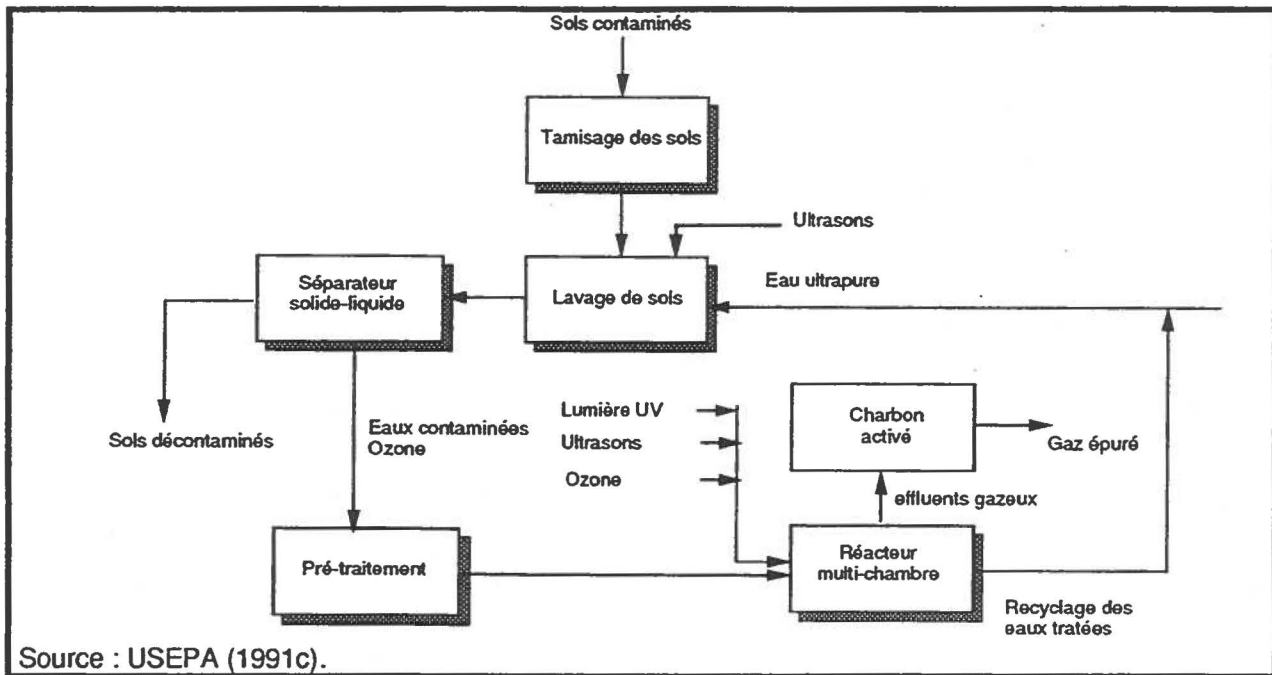
Figure 4.14 Schéma de principe des procédés aqueux de lavage des sols

Tel qu'indiqué à la figure 4.14, les eaux d'éluatriation des procédés de lavage des sols doivent être traitées et recyclées pour en extraire les contaminants avant d'être rejetées ou éliminés. Les procédés de traitement de ces eaux incluent généralement l'un et (ou) l'autre des procédés suivants : exposition au charbon activé pour enlever les contaminants organiques; traitement biologique pour les composés organiques biodégradables; traitement avec des sulfures pour précipiter les métaux; ajout de produits pour briser les émulsions; filtration et osmose inverse.

Pour favoriser l'extraction des contaminants des sols, diverses techniques peuvent être utilisées. En Hollande, la compagnie Bodemsanering Nederland BV utilise des jets d'eau à haute pression tandis que la compagnie Ecotechniek BV utilise de l'eau chaude. Harbauer, une compagnie allemande, soumet le mélange sol/eau à de fortes vibrations ou oscillations pour séparer les contaminants des particules de sol. D'autres technologies ajoutent au mélange des oxydants tels que le peroxyde d'hydrogène ou l'ozone (Intera Kenting, 1990).

À titre d'exemple, la figure 4.15 illustre une technologie de lavage des sols développée par la compagnie américaine Excalibur Enterprises Inc. qui utilise une combinaison de ces différentes technologies (ultrasons, lumière UV et ozone) à différentes étapes du procédé pour améliorer l'efficacité d'extraction.

4.4.2.2. Flottation. - La flottation, utilisée depuis plus de 75 ans dans l'industrie minière pour extraire les métaux, est de plus en plus utilisée pour traiter les sols contaminés par des métaux et des composés organiques. La séparation par flottation peut se faire de façon naturelle, sans traitement chimique ou mécanique, ou par traitement physico-chimique. Les deux procédés permettent aux matières moins denses de flotter à la surface où elles peuvent être facilement récupérées par écrémage.



Source : USEPA (1991c).

Figure 4.15 Schéma de principe du procédé de lavage des sols utilisant des ultrasons, de la lumière UV et de l'ozone

Le principe de flottation est bien connu et se base sur les phénomènes chimiques à la surface des particules et sur la théorie des couches électriques doubles. Les matériaux à traiter sont d'abord tamisés et placés avec de l'eau dans un réservoir. La séparation des contaminants des particules de sol est ensuite obtenue par injection de bulles d'air dans la solution. Des produits chimiques peuvent être ajoutés pour faciliter l'adsorption des contaminants aux bulles d'air. Les bulles d'air remontent à la surface avec les contaminants adsorbés et forment une écume qui est récupérée pour traitement subséquent. La flottation est peu énergivore et convient pour les huiles, les substances organiques halogénées, les cyanures et les métaux lourds (Intera Kenting, 1990).

La figure 4.16 illustre le schéma de principe de la flottation.

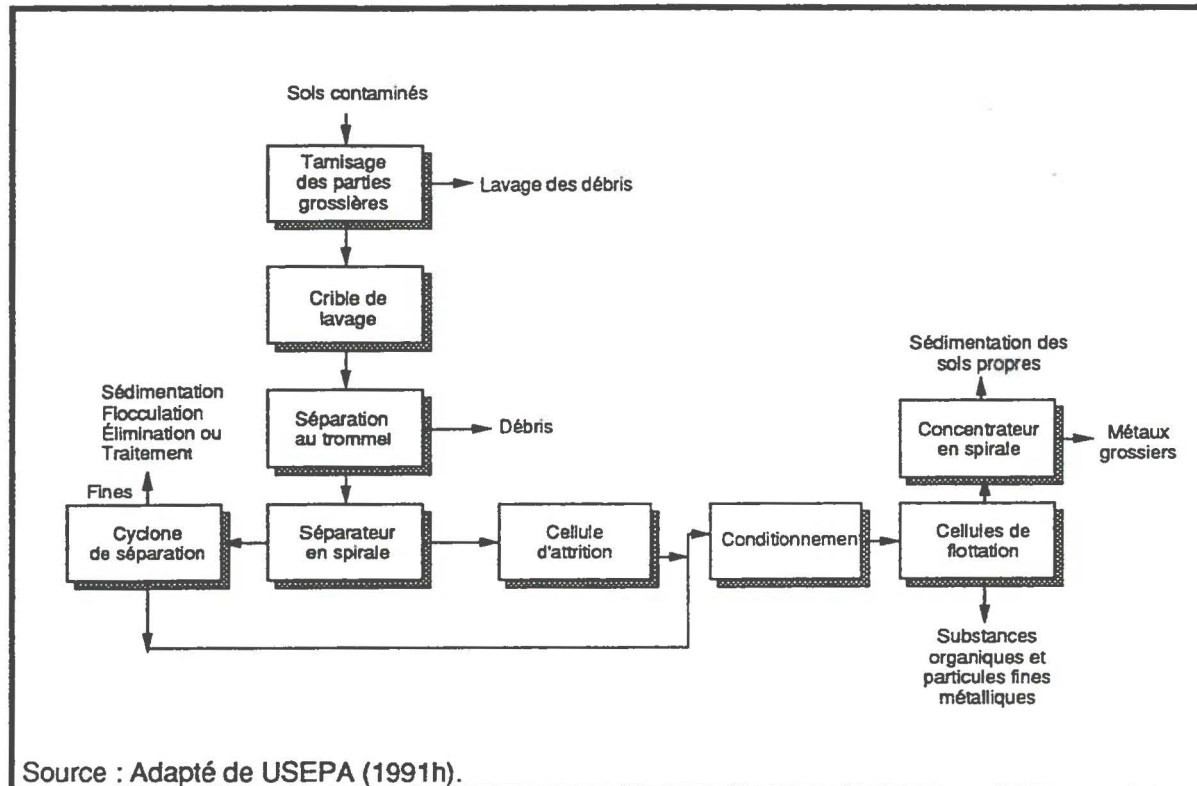


Figure 4.16 Schéma de principe du procédé de lavage des sols par flottation

4.4.2.3 Extraction sous vide. - Cette technologie applique un vide par une série de puits d'extraction pour créer un débit d'air dans la zone vadose des sols, zone située au-dessus de la nappe phréatique. L'air se déplace à travers le sol et entraîne les contaminants volatils présents dans le sol et l'eau interstielle. Cette technologie sépare les substances organiques volatiles des sols de sorte que les vapeurs extraites doivent être ensuite traitées. Les intrants et les extrants du procédé ainsi que les modifications techniques possibles sont indiqués dans la figure 4.17.

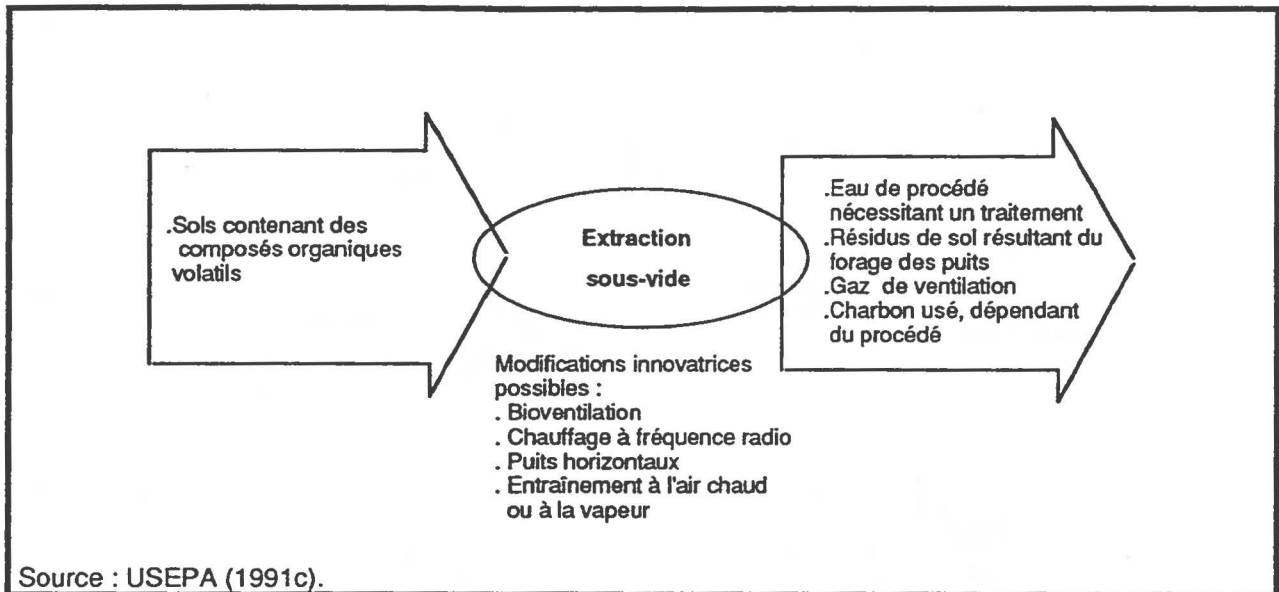


Figure 4.17 Intrants et extrants des procédés d'extraction sous vide

Tel qu'indiqué sur cette figure, l'efficacité des technologies d'extraction à la vapeur peut être thermiquement améliorée par injection d'air chaud ou de vapeur à haute température directement dans les sols pour provoquer la vaporisation des composés organiques volatils et semi-volatils ou par chauffage des sols à des fréquences radio, par bioventilation et par injection d'air dans des puits horizontaux.

La figure 4.18 illustre le schéma de principe des technologies d'extraction sous vide.

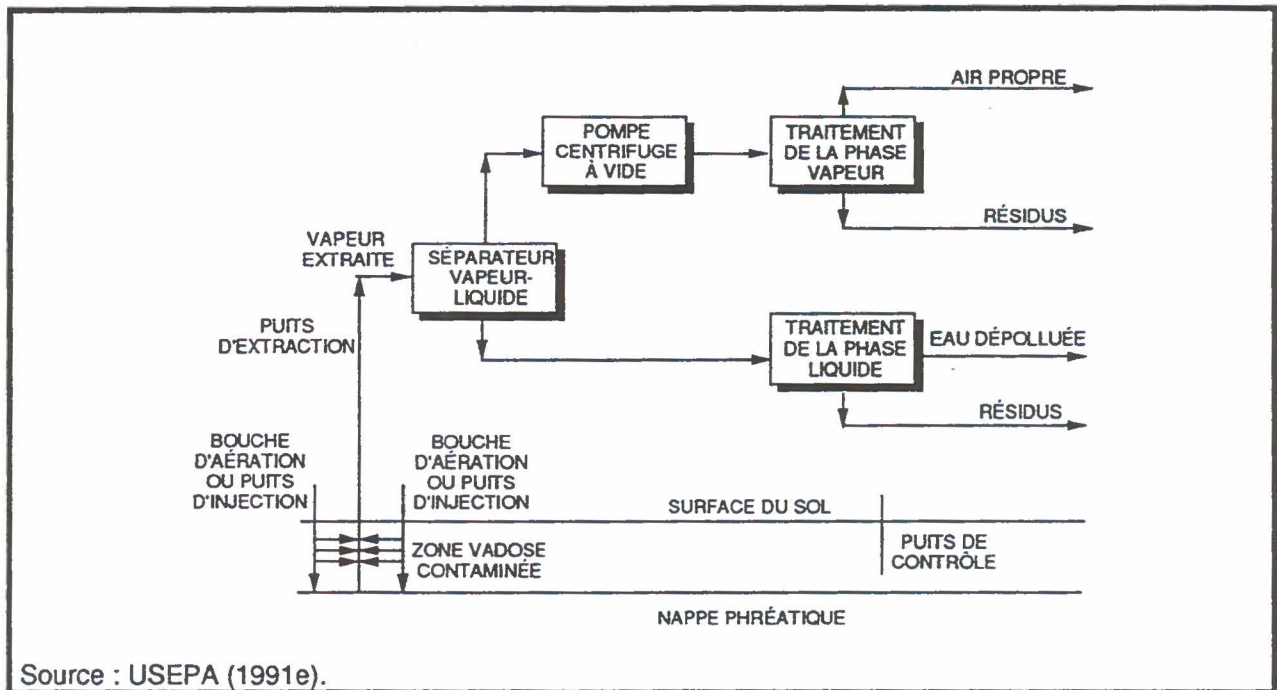


Figure 4.18 Schéma de principe des procédés d'extraction sous vide

Tel qu'illustré à la figure 4.18, après avoir imperméabilisé les surfaces à traiter, les technologies d'extraction sous vide comportent les composantes suivantes : puits d'injection et d'extraction d'air, conduites souterraines déposées dans un médium perméable, séparateur liquide-vapeur, aspiration sous vide, systèmes de traitement des vapeurs et de traitement des eaux et puits de contrôle.

Ces technologies présentent des applications limitées pour le traitement des sédiments contaminés.

4.4.2.4 Extraction aux solvants. - L'extraction aux solvants implique la mise en solution des contaminants dans un solvant, lequel solvant est ensuite récupéré et traité. Si des solvants sont utilisés pour lixivier des substances à l'état solide ou de boues, le procédé est alors appelé lixiviation (Manahan, 1990).

Les technologies d'extraction aux solvants visent l'enlèvement des composés organiques plutôt que l'enlèvement des métaux. Ces techniques d'extraction liquide-solide et liquide-liquide s'appliquent hors du site. Elles sont fondées sur le principe qu'il est plus facile d'éliminer les contaminants des solvants avec les technologies de traitement disponibles que de les éliminer des matrices originales. Les solvants utilisés dépendent des contaminants présents et la solution de solvants usés doit être traitée. Les contaminants sont séparés des solvants par des changements de température et de pression, et les solvants sont ensuite recyclés (USEPA, 1991c).

Le schéma présenté à la figure 4.19 identifie les intrants et extrants du procédé.

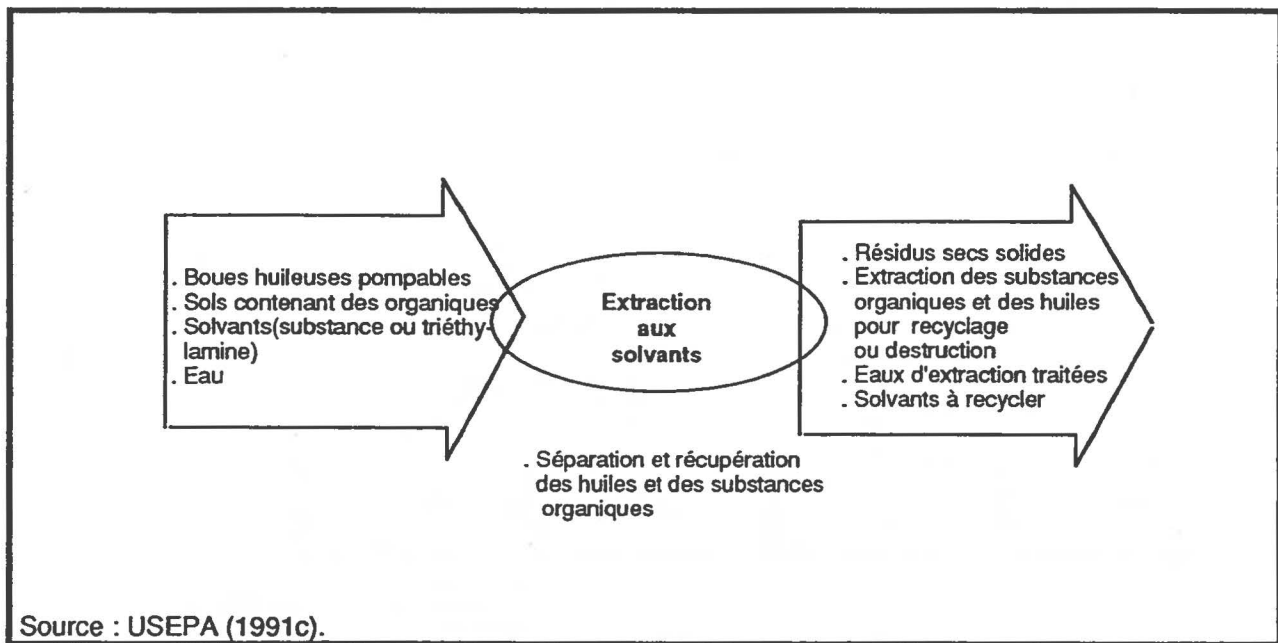


Figure 4.19 Intrants et extrants des procédés d'extraction aux solvants

Certains procédés d'extraction aux solvants utilisent la chaleur pour favoriser la séparation. Par exemple, le procédé d'extraction acétone-kérosène, développé par la Faculté des sciences appliquées de l'Université de New York, extrait les BPC et certains autres contaminants organiques des sols et des sédiments et concentre la solution pour permettre la destruction chimique ultérieure des contaminants. Le procédé sépare les sédiments en deux fractions, l'une solide et l'autre liquide. La fraction solide est lessivée avec un solvant hydrophile (acétone), lequel est séparé des sédiments en utilisant la vapeur. Les BPC sont traités avec un solvant hydrophobe (kérosène) (Averett *et al.*, 1990).

La figure 4.20 illustre le schéma de principe des procédés d'extraction aux solvants.

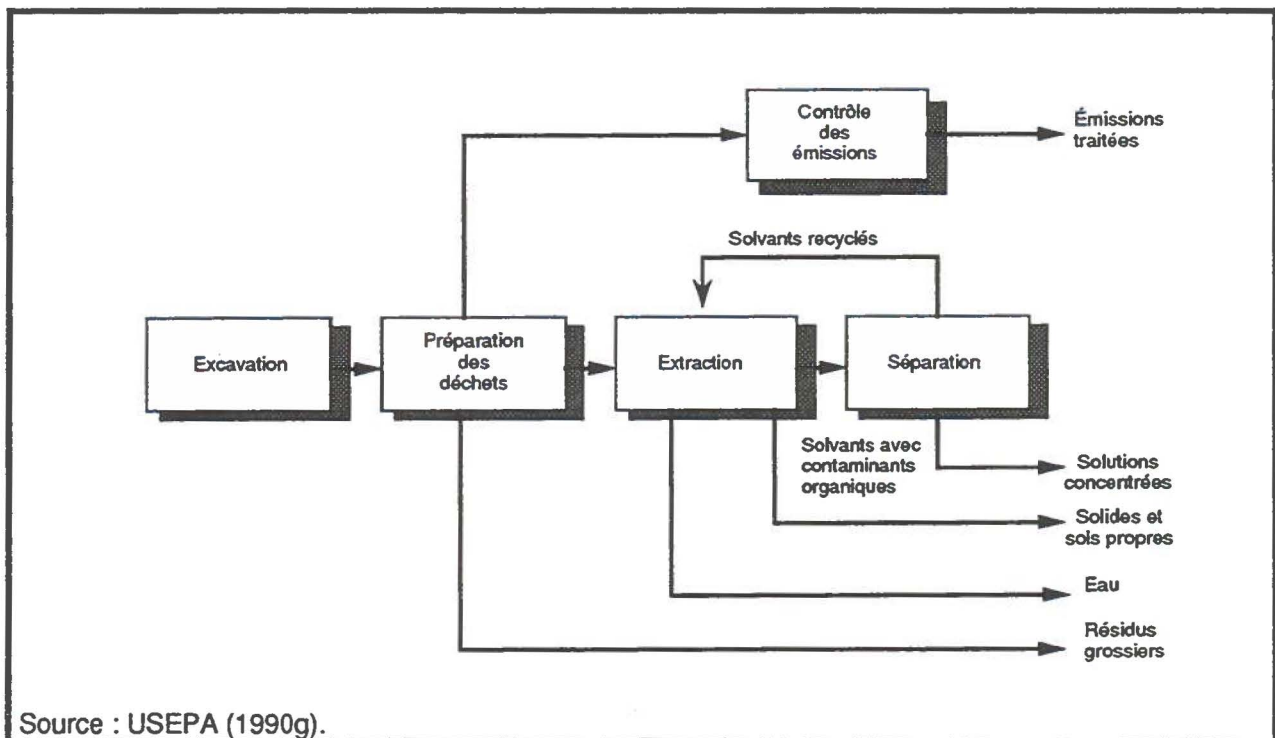


Figure 4.20 Schéma de principe des procédés d'extraction aux solvants

4.4.2.5 Extraction avec des fluides aux conditions critiques ou supercritiques.

- Une des approches les plus prometteuses d'extraction et de lixiviation aux solvants des déchets dangereux est l'utilisation de fluides supercritiques comme agent d'extraction à base de solvants. Lorsque soumis à des conditions de pression et de température critiques ou au-dessus, les fluides tels le CO₂ ou les hydrocarbures légers (p. ex., le propane), possèdent à la fois les caractéristiques des liquides et des gaz.

Le CO₂ est utilisé de façon régulière comme solvant pour le traitement des eaux usées en raison de sa non toxicité, de son ininflammabilité, de ses coûts d'utilisation peu élevés et de son point critique relativement bas alors que les gaz d'hydrocarbures légers sont utilisés comme solvants critiques pour le traitement des sols (Intera Kenting, 1990).

On appelle fluide critique un fluide dont la température et la pression thermodynamiques sont au point critique ou supérieur à celui-ci de sorte que ses propriétés, sa densité, sa viscosité, sa constante diélectrique et sa diffusivité sont intermédiaires entre celles d'un fluide gazeux et celles d'un liquide. Dans ces conditions, des variations de température et de pression peuvent augmenter la solubilité des composés organiques dans le solvant. Suite à l'extraction, la diminution de la température ou de la pression du mélange solvant/contaminant conduit à une séparation de phase du solvant sous forme gazeuse du liquide ou solide traité. Les solvants gazeux sont ensuite recyclés (Intera Kenting, 1990, USEPA, 1992e).

La figure 4.21 présente le schéma de principe des procédés d'extraction avec des fluides aux conditions critiques.

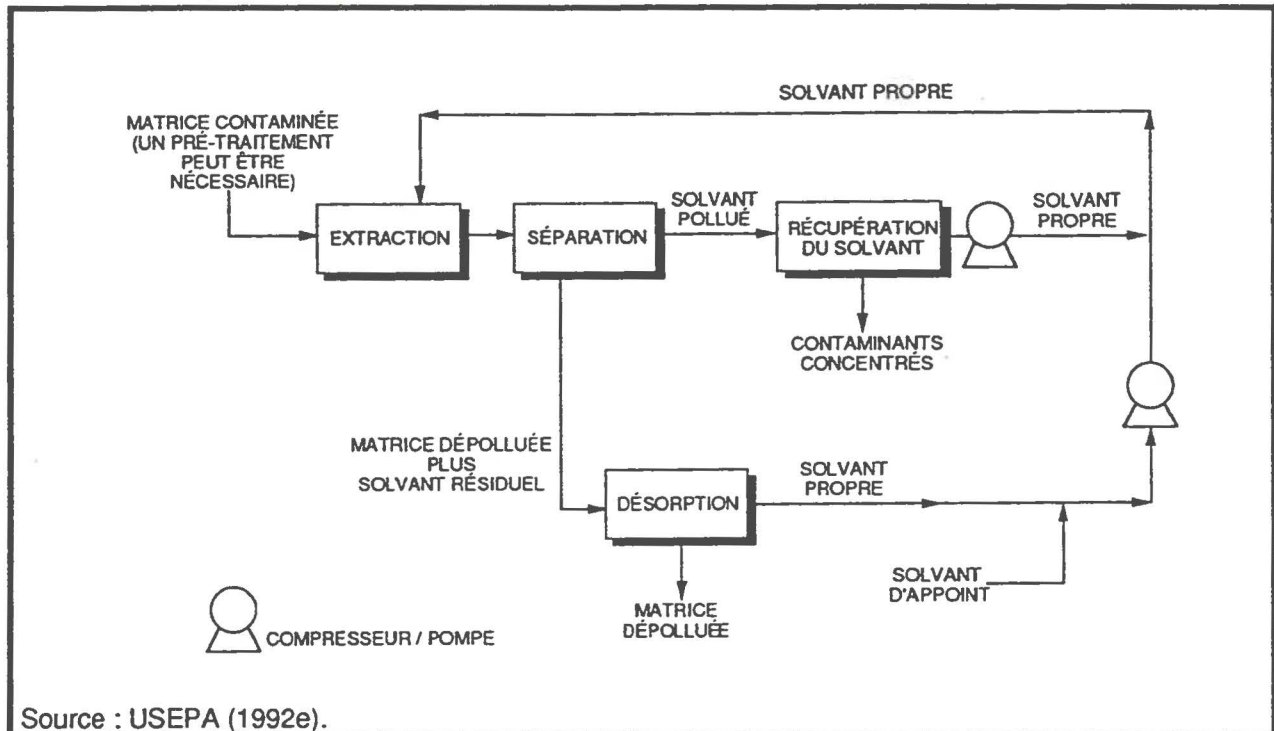


Figure 4.21 Schéma de principe des procédés d'extraction avec des fluides aux conditions critiques

Tel qu'illustré à la figure 4.21, cette technologie comporte essentiellement quatre étapes : extraction avec des solvants, séparation, désorption et récupération (régénération) des solvants.

Des technologies avec des fluides supercritiques ont été aussi développées. Le fluide supercritique le plus utilisé pour l'extraction est le dioxyde de carbone (CO_2) à température de $31,1\text{ °C}$ et pression de $73,8$ atmosphères. Après qu'un contaminant ait été extrait d'une matrice par un fluide supercritique à des pressions élevées, la pression est abaissée pour séparer le contaminant du fluide. Le fluide peut alors être à nouveau comprimé et recirculé dans le système d'extraction (Manahan, 1990).

La figure 4.22 illustre le schéma de principe des procédés d'extraction avec des fluides supercritiques.

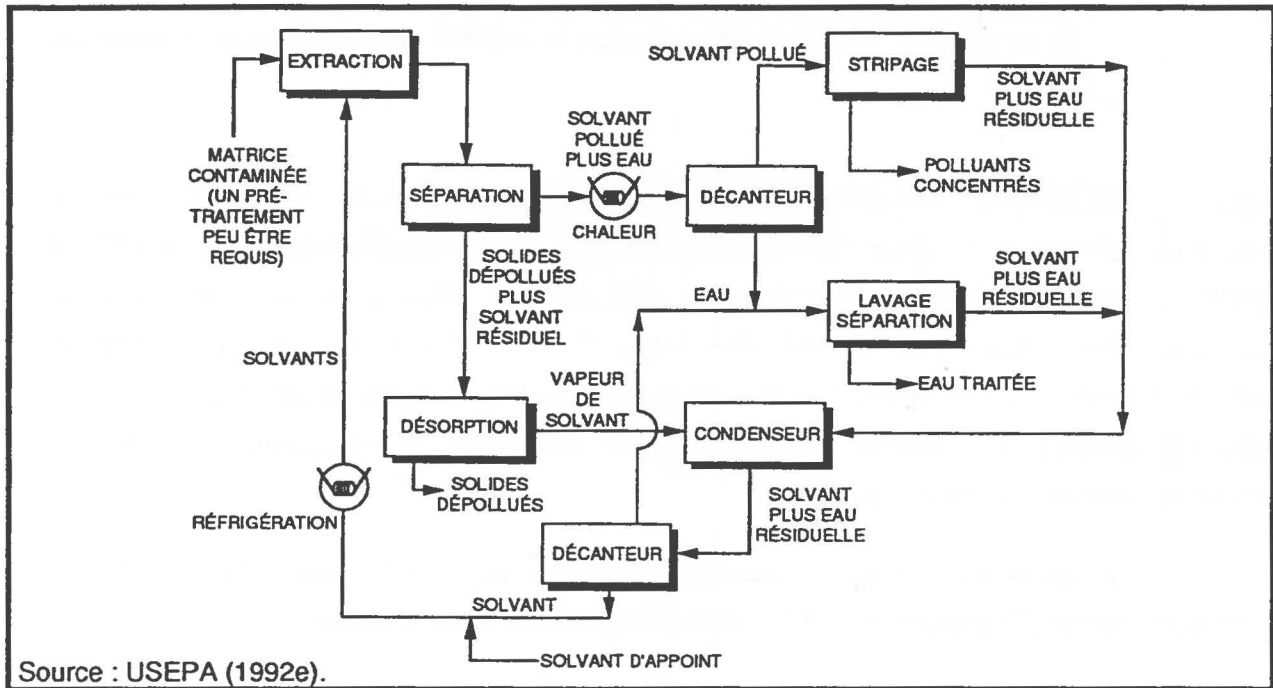


Figure 4.22 Schéma de principe des procédés d'extraction avec des fluides aux conditions supercritiques

Les technologies d'extraction avec des fluides supercritiques comprennent les mêmes composantes que les technologies aux conditions critiques avec en plus des systèmes pour chauffer les fluides, des unités de stripage, des condenseurs et des décanteurs.

Les efforts accrus de recherche depuis quelques années avec généralement le CO₂ comme fluide supercritique ont démontré les possibilités d'extraction dans les applications suivantes :

- enlèvement des contaminants organiques des eaux usées;
- extraction des pesticides organohalogénés des sols;
- extraction des huiles des émulsions utilisées dans les industries de l'aluminium et de l'acier;
- régénération du charbon activé épuisé;

- purification des huiles usées contaminées avec des BPC, des métaux et de l'eau en utilisant l'éthane aux conditions supercritiques (Manahan, 1990).

4.4.2.6 Séparation électrique/électro-acoustique. - Les technologies de séparation utilisent le principe du champ électrique pour permettre aux ions positifs et négatifs de migrer à travers les matériaux pollués afin d'être enlevés. L'efficacité de cette technologie dépend forcément des propriétés électriques des matrices à traiter (USEPA, 1991h). Les technologies d'électro-acoustique, utilisent un champ de courant électrique direct et un champ acoustique pour permettre le transport de liquides à travers les solides (sols à grains fins).

La figure 4.23 illustre le concept de décontamination des sols par électro-acoustique, une technologie brevetée par le Batelle Memorial Institute.

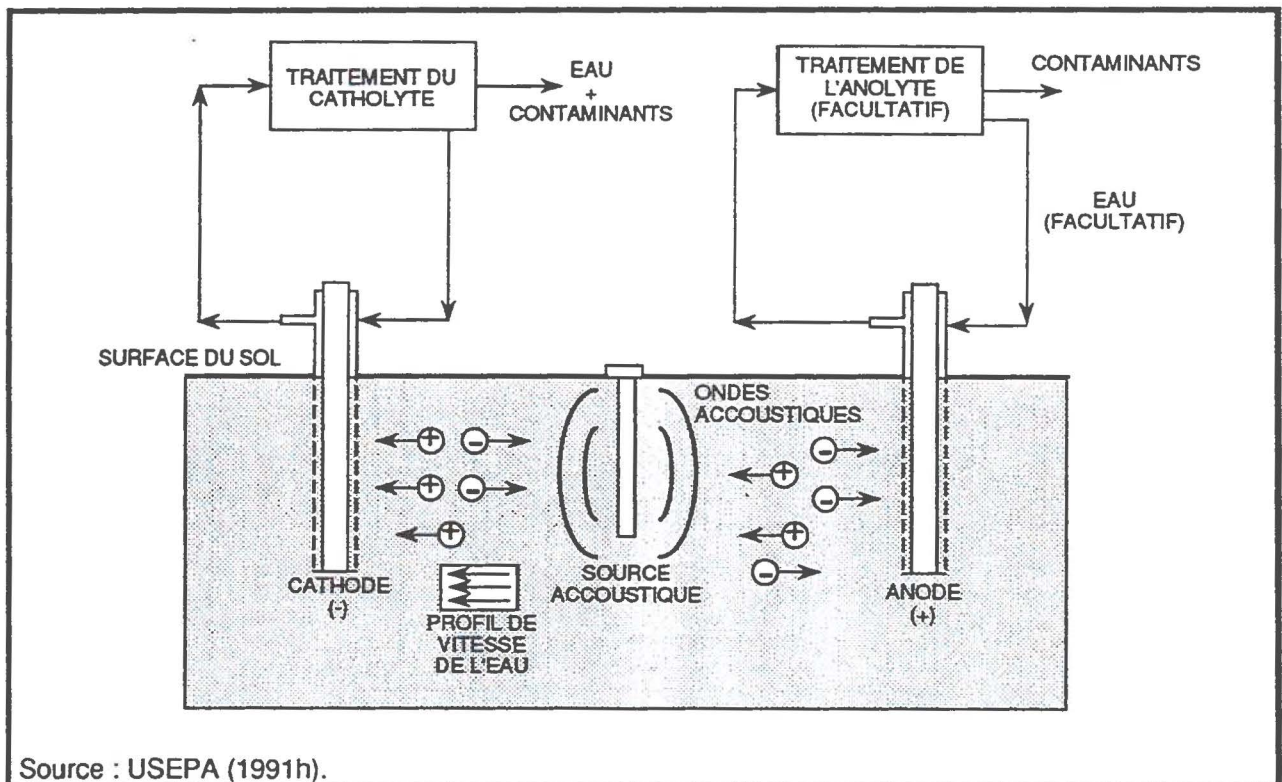


Figure 4.23 Schéma conceptuel des technologies d'extraction par électro-acoustique

Les technologies électro-acoustiques conviennent pour des sols contaminés par le cadmium, le chrome, le plomb, les cyanures, les chromates et les dichromates. Pendant la réaction, en plus du déplacement d'ions et de leur mouvement respectif aux deux électrodes, les effets suivants peuvent être observés : échange ionique, développement d'un gradient de pH, électrolyse, production de gaz, réactions d'oxydation et de réduction ou migration ionique. L'application d'un champ électrique augmente le rythme de lessivage tandis que le champ acoustique, ajouté au champ électrique, favorise la déshydratation ou le lessivage des contaminants (Averett *et al.*, 1990).

Au début des années 1990, ces technologies étaient encore au stade de la conception et n'avaient donc pas encore été appliquées pour la restauration des sols in situ ou pour le traitement des sédiments.

4.4.2.7 Extraction/aération mécanique. - Ce type de technologie consiste à injecter de l'air à travers les sols contaminés pour transférer les substances organiques volatiles des sols dans l'air, qui est ensuite traité par des filtres au charbon activé, des laveurs humides ou par incinération dans un brûleur post-combustion. Ce groupe de technologies permet d'extraire des sols les composés volatils suivants : benzène, toluène, xylène, trichloroéthylène, cétone et alcool. Le chauffage des sols favorise la séparation des composés moins volatils. Ces procédés pourront difficilement être appliqués pour le traitement des sédiments (Averett *et al.*, 1990).

Tableau 4.8 Efficacité des technologies de traitement d'extraction par groupe de contaminants et par type de déchets

GROUPE DE CONTAMINANTS	LAVAGE DES SOLS		LAVAGE PAR IMMERSION SOLS	EXTRACTION AUX SOLVANTS		
	SOLS SABLONNEUX/ GRAVELEUX	SOLS SILTEUX / ARGILEUX		SOLS	BOUES	SÉDIMENTS
ORGANIQUES						
Volatils halogénés	2	1	2	1	1	1
Semi-volatils halogénés	1	1	1	2	1	1
Volatils non halogénés	2	1	1	2	2	1
Semi-volatils non halogénés	1	1	2	2	2	1
BPC	1	1	1	2	2	2
Pesticides (halogénés)	1	1	1	2	1	1
Dioxines/Furannes	1	1	1	1	1	1
Cyanures organiques	1	1	1	1	1	1
Substances organiques corrosives	1	1	1	1	1	1
INORGANIQUES						
Métaux volatils	2	1	1	0	0	0
Métaux non volatils	2	1	2	0	0	0
Amiante	0	0	0	0	0	0
Matériaux radioactifs	1	1	1	0	0	0
Substances inorganiques corrosives	1	1	1	0	0	0
Cyanures inorganiques	1	1	1	0	0	0
RÉACTIFS						
Oxydants	1	1	1	0	0	0
Réducteurs	1	1	1	-	-	-

Légende

2: Efficacité de bonne à excellente: forte probabilité que la technologie soit efficace.

1: Efficacité de marginale à moyenne ou potentielle: des précautions doivent être prises dans le choix des technologies; les experts sont d'avis que cette technologie fonctionnera.

0: Efficacité nulle: les experts sont d'avis que la technologie ne conviendra pas pour ce type de déchets et de contaminants.

X: Effets néfastes potentiels.

Source : USEPA (1990f; 1991c; 1992e).

4.4.3 Domaines d'application. - Les technologies d'extraction qui ont été activement développées pour les sols contaminés peuvent être choisies en fonction du type de substance à extraire (organiques ou inorganiques) mais permettent rarement d'extraire les unes et les autres simultanément.

Les technologies d'*extraction par lavage* in situ ou hors du site conviennent pour la plupart des contaminants organiques, inorganiques et réactifs des sols, tel que montré au tableau 4.8. Les technologies d'extraction aux solvants peuvent pour leur part, traiter avec une efficacité plus ou moins grande la plupart des composés organiques présents dans les sols, les boues et les sédiments mais ne sont pas efficaces pour les métaux et autres composés inorganiques et réactifs (oxydants ou réducteurs) présents dans ces matrices.

4.4.4 Avantages, limites et applications démontrées de chaque technologie.

- Le tableau 4.9 présente les principaux avantages, désavantages, applications et démonstrations de 15 technologies d'extraction physico-chimique par lavage, par chélateurs ou surfactants, par des acides ou des bases, par des solvants ou par des unités de flottation.

Ce tableau fait essentiellement ressortir que les principaux avantages de la plupart des procédés d'extraction sont qu'ils permettent de traiter une gamme variée de contaminants aussi bien organiques qu'inorganiques, sans entraîner des problèmes d'émissions atmosphériques difficilement contrôlables et qu'ils peuvent être facilement assemblés sur des unités fixes ou mobiles.

Les principaux désavantages de ces technologies sont la grande quantité de boues qu'elles produisent, leur efficacité limitée en présence de particules fines et la nécessité de récupérer et traiter les solutions usées de lavage ou d'extraction avant leur élimination. Pour certaines technologies, l'utilisation de produits chimiques inflammables représente un danger de feu; elles requièrent donc la présence d'opérateurs qualifiés. D'autre part, certains de ces procédés sont relativement nouveaux ou n'ont été démontrés qu'en banc d'essai ou à l'échelle pilote.

Tableau 4.9 Avantages, désavantages et application des technologies d'extraction pour la dépollution de sols contaminés

TECHNOLOGIES	AVANTAGES	DÉSAVANTAGES	APPLICATIONS / DÉMONSTRATIONS
Lavage	<ul style="list-style-type: none"> Technologies démontrées; unités commerciales en Europe. Capacité de traiter une gamme variée de sols et de contaminants. Améliorations technologiques permettent de traiter les particules fines. Ne requièrent pas de produits chimiques. 	<ul style="list-style-type: none"> Difficultés potentielles de mise en dépôt des sols traités et des résidus en raison des sels et des métaux présents. Solutions usées de lavage requièrent un traitement avant leur élimination. Efficacité décroît avec un haut contenu de particules fines. 	<ul style="list-style-type: none"> Unités commerciales disponibles en Europe (Hollande, Allemagne). Technologies démontrées pour des sites du Superfund.
Extraction par surfactants	<ul style="list-style-type: none"> Capacité de traiter une plus grande variété de contaminants par comparaison au lavage seul. Capacité d'enlever une plus forte proportion de contaminants. Décontamination améliorée de façon significative par un choix judicieux de surfactants. 	<ul style="list-style-type: none"> Solution de lavage peut être plus difficile à traiter. Non économique si de fortes concentrations de surfactants sont nécessaires. Beaucoup de surfactants sont eux-mêmes polluants de sorte que des limites peuvent être imposées pour des applications sur place. Application limitée si les sols présentent une faible perméabilité. 	<ul style="list-style-type: none"> Unités commerciales disponibles aux É.-U. et au Canada. Unités commerciales opèrent depuis plusieurs années en Europe, en particulier en Allemagne et Hollande. Technologies aussi efficaces pour les métaux que pour les substances organiques.
Extraction par des acides/bases	<ul style="list-style-type: none"> Grande disponibilité des acides/bases et relativement peu dispendieuses. Besoins modérés de produits chimiques. 	<ul style="list-style-type: none"> Production de grandes quantités de boues par enlèvement des particules et de l'humus des sols. Technologies peu recommandées en présence d'une forte teneur en substances organiques (ex. huiles ou HAP) 	<ul style="list-style-type: none"> Technologies au stade de banc d'essai ou pilote; deux procédés ont fait l'objet de démonstration pleine échelle. En Hollande, projets de restauration réalisés avec certaines unités. Contenu en particules fines doit être inférieur à 20 % pour être économique.
Extraction par chélateurs	<ul style="list-style-type: none"> Chélateurs facilement disponibles et relativement peu dispendieux. Technologies plus appropriées que l'extraction par des acides/bases dépendant de la nature des contaminants. Efficacités démontrées pour enlèvement des métaux. Des chélateurs ont été utilisés pour enlever le radium (226) des sols contaminés, en laboratoire. 	<ul style="list-style-type: none"> Difficulté d'enlever les contaminants des particules très fines. Procédé relativement nouveau et pas entièrement démontré pour déterminer à quelles substances elles s'appliquent. Les chélateurs et les fluides porteurs doivent être traités. 	<ul style="list-style-type: none"> Technologies démontrées en banc d'essai. Procédés démontrés en Angleterre pour des projets de restauration.
Extraction aux solvants Procédé B.E.S.T.	<ul style="list-style-type: none"> Technologie démontrée et disponible commercialement. Technologie appropriée pour les matériaux à grains fins. Unités fixes ou mobiles. Émissions atmosphériques peuvent être contrôlées. 	<ul style="list-style-type: none"> Solvant utilisé (triéthylamine) est considéré dangereux. Solvant a une odeur dérangeante. Traitement requis des eaux de procédés et résidus. Technologie peu efficace sur les particules grossières. 	<ul style="list-style-type: none"> Technologie démontrée pour traiter les sols et les boues contaminés par des BPC (pleine échelle).
Procédé Extraksol	<ul style="list-style-type: none"> Technologie démontrée à pleine échelle pour traiter les contaminants organiques des sols. Procédé en système fermé minimise ou élimine les émissions fugitives. Capacité de traiter les matériaux grossiers et fins. 	<ul style="list-style-type: none"> Solvants utilisés sont extrêmement inflammables. Procédé pas aussi efficace sur le gravier quand le gravier a une porosité de particule fine. 	<ul style="list-style-type: none"> Unité mobile a permis de traiter une gamme variée de matrices et de contaminants.
Extraction au solvant à faible énergie	<ul style="list-style-type: none"> Opération aux températures ambiantes. Opération simple et relativement peu coûteuse en utilisant des solvants et des équipements ordinaires. 	<ul style="list-style-type: none"> Démontrée en banc d'essai seulement. Danger de feu dû aux solvants utilisés. Technologie peu efficace sur les particules grossières. L'élimination ou incinération de la phase kérosène / organiques est probablement dispendieuse. 	<ul style="list-style-type: none"> Technologie démontrée à l'échelle pilote pour les BPC. Capacité de traiter une gamme variée de substances organiques volatiles ou semi-volatiles.

Tableau 4.9 Avantages, désavantages et application des technologies d'extraction pour la dépollution de sols contaminés (suite)

TECHNOLOGIES	AVANTAGES	DÉSAVANTAGES	APPLICATIONS / DÉMONSTRATIONS
Procédé extraction par solvants ENSR	<ul style="list-style-type: none"> . Capacité d'enlever une gamme variée de substances organiques. . Aucun pré-traitement requis. . Procédé non influencé par le contenu en humidité ou en argile. 	<ul style="list-style-type: none"> . Résidus de BPC doivent être incinérés ou traités d'une façon quelconque. 	<ul style="list-style-type: none"> . Technologie conçue pour les BPC, mais peut traiter une gamme variée de substances organiques. . Technologies démontées en banc d'essai ou pilote.
Procédé Carver-Greenfield	<ul style="list-style-type: none"> . Technologie appliquée à une gamme variée de matrices de plusieurs industries incluant boues municipales, pâtes et papiers et pharmaceutiques. 	<ul style="list-style-type: none"> . Procédés énergivores pour évaporation, distillation et stripage à la vapeur, augmentant les coûts de traitement. . Procédé très complexe. 	<ul style="list-style-type: none"> . Procédé testé à échelle de banc d'essai. . Procédé démontré en pilote pour des applications industrielles.
Procédé BP d'extraction par solvant	<ul style="list-style-type: none"> . Traitement simultané des substances organiques et inorganiques. . Augmente l'efficacité des procédés de fixation en enlevant les substances organiques des sols/boues. . Pas d'émissions incontrôlables. . Unité mobile ou fixe. 	<ul style="list-style-type: none"> . Jamais appliquée dans un projet de restauration. . Résidus sont une masse solide devant être enfouie. . Constituants inorganiques peuvent compliquer la mise en dépôt ou la rendre dispendieuse. 	<ul style="list-style-type: none"> . Essais pilotes dans des sites de raffineries. . Essais à pleine échelle en cours.
Procédé extraction au solvant Accurex	<ul style="list-style-type: none"> . Procédé relativement simple. . Unité mobile ou fixe. 	<ul style="list-style-type: none"> . Solvants hautement volatils requérant le contrôle des émissions atmosphériques. . Testée à l'échelle de banc d'essai seulement. 	<ul style="list-style-type: none"> . Procédé démontré en banc d'essai pour les BPC et les hydrocarbures.
Procédé Sollex	<ul style="list-style-type: none"> . Information insuffisante pour déterminer les avantages de la technologie. 	<ul style="list-style-type: none"> . Nouvelle technologie, testée à l'échelle pilote seulement. 	<ul style="list-style-type: none"> . Information insuffisante.
Extraction au toluène chaud	<ul style="list-style-type: none"> . Émissions atmosphériques minimales et pouvant être contrôlées. . Très bonne efficacité d'enlèvement des hydrocarbures. 	<ul style="list-style-type: none"> . Dangers pour les travailleurs (toluène chauffé). . Procédé au stade pilote. 	<ul style="list-style-type: none"> . Procédé utilisé pour les hydrocarbures des séparateurs et des fonds de réservoirs.
Extraction par le système CF Corporation	<ul style="list-style-type: none"> . Efficacité à pleine échelle très bien documentée. . Capacité de traiter une gamme variée de matrices et de contaminants. . Possibilités réduites de contamination des résidus. . Émissions atmosphériques peu probables et émissions fugitives peuvent être facilement contrôlées. 	<ul style="list-style-type: none"> . Nécessité de maintenir un système complètement fermé: étanchéisation des pompes, réservoirs, joints de raccordement et pipelines, augmentant considérablement les coûts. . Nécessité d'opérateurs qualifiés dû aux hautes pressions. . Eaux usées doivent être traitées. 	<ul style="list-style-type: none"> . Unité commerciale disponible. . Technologie testée pour les sédiments, fonds de réservoirs, écumeurs, séparateurs, déchets de peinture, goudron, caoutchouc synthétique, huiles usées, sols contaminés au créosote, dioxines, furannes.
Flottation	<ul style="list-style-type: none"> . Technologies utilisées depuis plusieurs années dans l'industrie minière. . Technologie utilisée récemment dans le traitement des sols contaminés par des substances organiques et des métaux lourds. . Grande capacité de traitement et faible besoin en énergie. 	<ul style="list-style-type: none"> . Possibilité de générer de grande quantités de boues. 	<ul style="list-style-type: none"> . Unités commerciales disponibles en Hollande depuis 1983. . Capacité de traiter : huiles, HMA, composés organochlorés, cires, résidus de peinture, pesticides, cyanures, métaux lourds, HAP. . Unité pilote en Alberta.

Source : Adapté de CH2M Hill Engineering Ltd (1991).

Tel qu'indiqué au tableau 4.9, plusieurs de ces procédés sont disponibles sur une base commerciale tant en Europe qu'en Amérique du Nord et ont déjà été utilisés à plusieurs endroits pour dépolluer des sols contaminés par des substances organiques et inorganiques.

En Europe, plusieurs companies possèdent depuis de nombreuses années des installations commerciales de lavage pour le traitement des sols, en particulier en Hollande : Ecotechniek BV, Bodemsanering Netherlands BV, HWZ Bodemsanering BV, Heijman Milieutechniek BV ET Heidemij Froth Flotation et en Allemagne, Harbauer et Bergmann (USEPA,1991c).

Aux États-Unis, les vendeurs pouvant réaliser des essais pilotes ou réaliser des projets de dépollution des sols avec des unités de lavage sont : MTA Remedial Resources Inc., BioTrol Inc., USEPA Risk Reduction Engineering Laboratory et Soil Cleaning Company of America Inc.

Au Canada, des unités pilotes combinant les technologies de lavage des sols et d'extraction par des chélateurs font actuellement l'objet de projets de démonstration en Ontario et au Québec pour le traitement des sols : Tallon Metal Technologies Inc. et l'unité de la Toronto Harbour Commission, conçue par SNC-Lavalin.

Le Centre Saint-Laurent finance actuellement un projet de démonstration d'une technologie de décontamination des sols par lessivage à haute pression en continu pour éliminer les hydrocarbures et le pentachlorophénol. Le lessivage est réalisé dans un réacteur appelé Hydromet développé par la compagnie Géocycle Inc. .

Quant aux technologies d'extraction par solvants, les compagnies américaines ou canadiennes suivantes possèdent les technologies : CF Systems (CF) Corporation (procédé CF Systems), Resources Conservation Company (procédé B. E. S. T.), Sanivan (procédé EXTRAKSOL), Dehydrotech (procédé Caver-Greenfield), HARMON Environmental Services and Acurex Corporation (procédé Acurex), Applied Remediation Technology Inc. (procédé LEEP) et BP Oil (procédé BP).

4.4.5 Avantages et limites pour le traitement des sédiments. - Bien que les technologies d'extraction sont utilisées depuis plusieurs années pour traiter les sols contaminés, leur application dans le traitement des sédiments a été limitée jusqu'à présent à des projets de démonstration en laboratoire, en banc d'essai et à l'échelle pilote, du moins en Amérique du Nord (voir tableau 4.10). Tant que ces technologies n'auront pas été appliquées pour des projets de traitement sur une base de pleine échelle, leur faisabilité pour traiter les sédiments contaminés sera toujours difficile à évaluer. C'est pourquoi des projets de démonstration sont en cours par l'USACE et l'USEPA avec des sédiments contaminés des Grands Lacs.

Comme les technologies d'extraction présentent généralement des efficacités limitées pour traiter les sols avec un haut pourcentage d'argile et de limon, ce qui est souvent le cas pour les sédiments, leur application pour les sédiments pourrait s'avérer difficile. De plus, la toxicité des solvants résiduels présents dans les sédiments pourrait être davantage problématique.

4.4.6 Technologies démontrées pour le traitement des sédiments. - Le tableau 4.11 présente les technologies d'extraction démontrées à différentes échelles pour le traitement des sédiments contaminés. Les paragraphes suivants décrivent ces technologies et les efficacités de traitement démontrées, lorsque disponibles dans la documentation de référence.

Tableau 4.10 Évaluation de la performance anticipée des technologies d'extraction pour la dépollution de sédiments

TECHNOLOGIE	STADE DE DÉVELOPPEMENT	APPLICATION AUX SÉDIMENTS	DISPONIBILITÉ	COTE DE PERFORMANCE (**)		
				Efficacité	Application	Coûts
Acurex (hexane et fréon)	Pilote	Non	Breveté	3	1	2
B.E.S.T. (TEA) (*)	Démontré	Banc d'essai	Breveté	4	3	2
Décontamination électro-acoustique	Conceptuel	Non	Développement	2	2	1
Extraction/aération mécanique	Démontré	Non	Oui	2	2	2
Faible énergie (acétone/kérosène)	Conceptuel	Banc d'essai	Développement	3	2	2
Lavage acide	Démontré	Non	Oui	3	2	2
Lavage des sols MTA Remedial Res.	Démontré	Non	Breveté	2	2	2
O.H. Materials	Pilote	Non	Oui	3	1	2
Oil Crep (sur le site)	Pilote	Non	Étrangère	2	1	2
Procédé Biotrol de lavage des sols	Pilote	Non	Breveté	2	2	2
Procédé CROW	Conceptuel	Non	Breveté	2	1	2
Séparation intégrée (vapeur sous pression)	Démontré	Non	Breveté	2	1	1
Séparation à la vapeur	Démontré	Non	Oui	2	1	2
Soilex (kérosène)	Pilote	Non	Oui	3	2	1
Surfactants	Démontré	Non	Oui	3	2	2
Systèmes C F - CO2	Pilote	Non	Breveté	3	1	2
Système C F -Propane	Pilote	Pilote	Breveté	3	2	2
Unité de lavage Harbauer	Pilote	Non	Étrangère	3	1	2
Unité de lavage Harmon Env. Serv.	Banc d'essai	Non	Breveté	3	1	2
Unité mobile de lavage des sols EPA	Pilote	Non	Oui	2	2	2
Unité mobile Heidemij	Pilote	Non	Étrangère	2	1	2
Vacuum et vapeur sous vide	Démontré	Non	Breveté	2	1	2

Remarques :

* Les technologies en caractère gras ont été retenues par l'USACE et l'USEPA pour des projets de démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs.

** Voir tableau 3.3. pour la signification des cotes de performance.

Source: Averett et al. (1990).

Tableau 4.11 Technologies d'extraction démontrées pour la dépollution de sédiments

TECHNOLOGIE	PROMOTEUR (*)	LIEU DE DÉMONSTRATION		ÉCHELLE DE DÉMONSTRATION	TYPE DE CONTAMINATION	RÉFÉRENCE
		PAYS	SITE			
Extraction chimique des substances organiques . Système CF	CF Systems Corporation	É.-U.	Port de New Bedford, Mass.	Pilote	BPC, HAP, COV, huiles & graisses	USEPA (1991b) Averett et al. (1990)
Extraction chimique des substances organiques . Système BEST	Resources Conservation Corp.	É.-U.	Hermantown, Minnesota	Banc d'essai	BPC, hydrocarbures et substances organiques à poids moléculaire élevé	USEPA (1991b)
		É.-U.	Port New Bedford, Mass.	Banc d'essai	BPC, HAP, COV, huiles & graisses et BPC	Averett et al. (1990)
		É.-U.	Port et Canal Indiana, Indiana	Banc d'essai		Averett et al. (1990)
Extraction chimique des substances organiques . Système LEEP	Art International Inc.	É.-U.	Port Waukegan, Illinois	Banc d'essai	BPC	Averett et al. (1990)
Extraction par lavage	Plusieurs compagnies de traitement : 9 usines pour les sédiments	Europe		Commerciale	Métaux et substances organiques	Averett et al. (1990)
Extraction physico-chimique . Flottation/ Séparation	Publics Works and Water Management of the Netherlands	Hollande	Ports de Geul, Oosterschelde, Canal Apeldoorn	Pleine échelle	Métaux lourds et polluants organiques	Dillen et Bruggeman (1992)

* Pour les adresses et numéros de téléphone des promoteurs, consulter l'Annexe C .

CF Systems (propane). - La compagnie CF Systems a développé un système en continu qui utilise des gaz comprimés (dioxyde de carbone ou propane) aux conditions critiques de température et de pression pour extraire des contaminants organiques variés tels que les BPC, les PCP, les HAP, les essences, les huiles, les acides organiques et les solvants chlorés. Les pressions et les températures du procédé sont au-dessus du point critique de sorte que les solvants présentent des propriétés physiques intermédiaires entre les phases gazeuses et liquides. Ce procédé peut aussi traiter les déchets contenant des particules fines comme les sédiments et les boues de séparateurs de même que les sols. Les contaminants inorganiques et les métaux lourds ne peuvent être éliminés avec ce système (CH2M Hill Engineering Ltd., 1992).

Alors que le dioxyde de carbone est surtout utilisé pour traiter des solutions aqueuses de solvants dangereux et de composés oxygénés, le propane est utilisé pour traiter les sédiments, les sols et les boues contenant des BPC et autres substances organiques : tétrachlorure de carbone, chloroforme, benzène, naphthalène, gazoline, graisses, xylène, toluène, acétone, butanol, phénol, heptane, et autres alcools (Averett *et al.*, 1990).

La figure 4.24 illustre le schéma de principe de ce procédé.

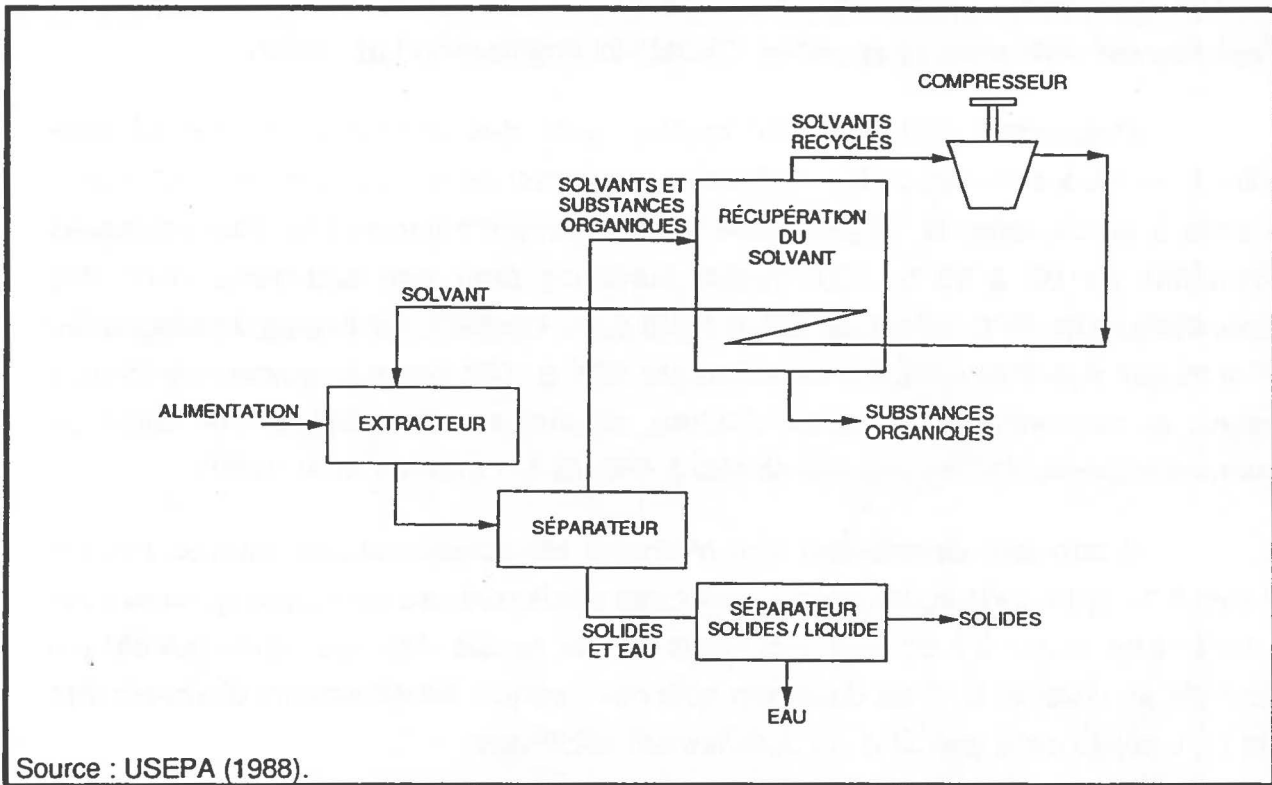


Figure 4.24 Schéma de principe du procédé d'extraction de la compagnie CF Systems

Tel qu'illustré à la figure 4.24, les sols ou les sédiments, après avoir été débarrassés des fractions grossières, subissent une première série d'étapes d'extraction dont le nombre dépend du type de déchets et du degré de contamination. Les gaz comprimés aux conditions critiques ou supercritiques sont injectés dans le réacteur à contre-courant. Le mélange de déchets est ensuite pompé dans un décanteur, à la sortie de chaque étape d'extraction, pour séparer les phases eau/solide des solvants/déchets organiques. Les effluents du décanteur sont dirigés vers une étape de déshydratation (séparateur solide/liquide) où l'eau est extraite et partiellement recyclée dans le système.

Les sols ou les sédiments dépollués sont ensuite enlevés du système alors que la phase solvant/organique est traitée pour enlever l'eau avant d'envoyer le solvant à l'unité de récupération où il est vaporisé en abaissant la pression avant d'être

récupéré, comprimé et recyclé dans le procédé. La fraction liquide des contaminants organiques est enfin enlevée et traitée (CH2M Hill Engineering Ltd., 1992).

Des essais pilotes ont été réalisés avec des sédiments du Port de New Bedford, au Massachusetts. Ces sédiments qui contenaient 350 ppm de BPC, furent ramenés à un contenu de 10 ppm suite à 10 traitements successifs. Des efficacités d'extraction de 90 à 98 p. 100 furent obtenues pour des sédiments avec des concentrations de BPC allant de 350 à 2575 ppm. De plus, les essais de laboratoire démontrèrent des efficacités d'enlèvement de 99,9 p. 100 des substances organiques volatiles et semi-volatiles dans les déchets aqueux et semi-solides. Les coûts de traitement anticipés étaient estimés de 150 à 450 US \$/ t (Averett *et al.*, 1990).

Il convient de préciser que même si les concentrations initiales ont été réduites à 10 ppm, c'est quand même nettement au-dessus des seuils acceptables pour les sédiments, selon les critères intérimaires de la qualité des sédiments qui ont été présentés au chapitre 2. C'est donc dire qu'à ces niveaux, les sédiments devraient être alors acheminés dans des sites de confinement sécuritaire.

Procédé BEST (Best Extraction Sludge Treatment). - Le procédé BEST, commercialisé par Resources Conservation Corporation, est une technologie brevetée d'extraction à base de solvant et utilise la triéthylamine (TEA) comme solvant pour extraire les composés organiques. La triéthylamine est une amine aliphatique produite en faisant réagir l'alcool éthylique et l'ammoniac. La clé du succès du procédé BEST est basée sur la propriété de miscibilité inverse de la triéthylamine; à des températures inférieures à 18 °C, ce solvant est complètement soluble dans l'eau alors qu'au-dessus de cette température, la triéthylamine et l'eau ne sont que partiellement miscibles. Cette propriété de miscibilité inverse peut être utilisée puisque la triéthylamine, une fois refroidie, peut mettre en solution simultanément l'huile et l'eau.

Le procédé BEST produit une solution d'extraction en phase simple qui est un mélange homogène de triéthylamine, d'eau et d'huile (contenant les contaminants organiques tels que BPC, PNA et COV) présents à l'entrée du procédé. Alors que les efficacités d'extraction à l'aide d'autres solvants peuvent être affectées par des

émulsions, la triéthylamine permet d'obtenir un meilleur contact entre les déchets et les solvants et ce, à des températures et pressions presque ambiantes. Cette propriété du TEA permet à ce procédé de traiter des matrices de déchets ayant un fort contenu en eau, sans pour autant affecter l'efficacité d'extraction. Ce procédé peut donc traiter aussi bien les solides que les eaux et les résidus huileux.

La figure 4.25 illustre le schéma de principe de ce procédé.

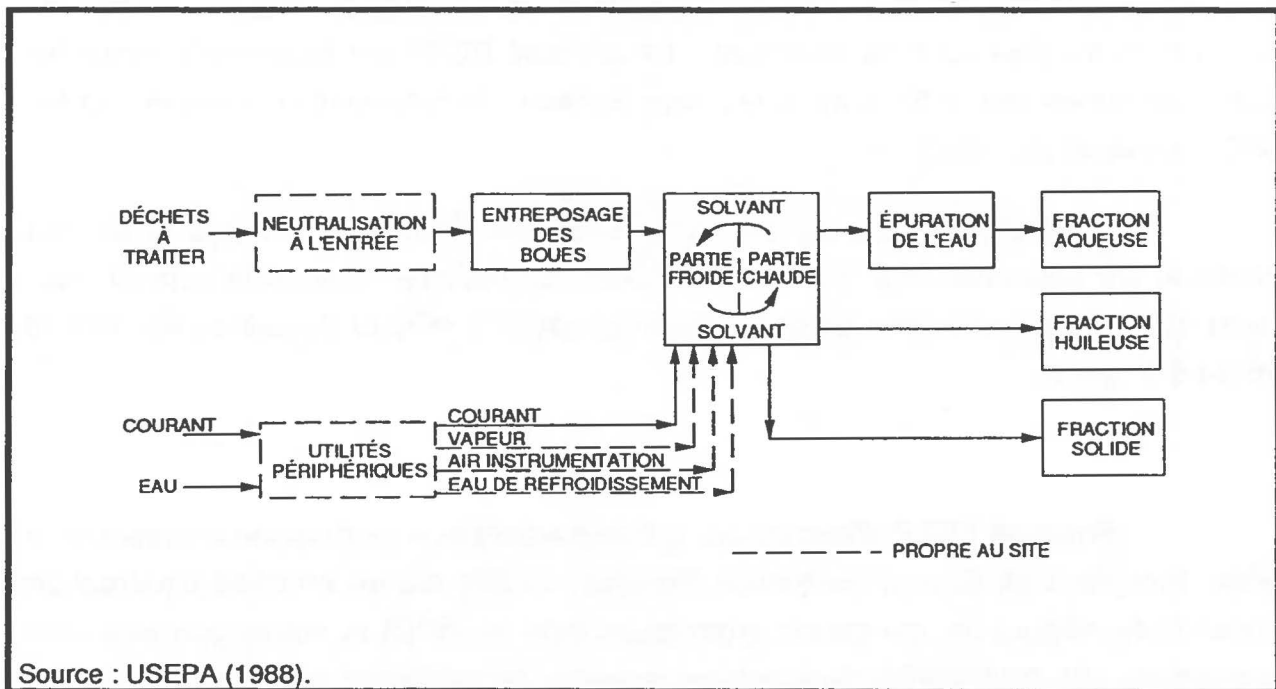


Figure 4.25 Schéma de principe du procédé d'extraction BEST

Ce procédé sépare les contaminants des sédiments en trois fractions : une fraction solide contenant les contaminants inorganiques (tels les métaux lourds); une fraction huileuse contenant les contaminants organiques (tels les BPC) et une fraction aqueuse contenant les contaminants résiduels des sédiments originaux. Ce procédé ne détruit pas par lui-même les contaminants, mais il peut réduire d'une façon substantielle les volumes de sédiments à traiter. Un traitement biologique ou une adsorption sur charbon peut être nécessaire pour enlever les organiques résiduels. Si des métaux sont

présents en solution, leur enlèvement par précipitation ou par d'autres procédés doit être réalisé.

Des sédiments du Port de New Bedford (Mass), ont été testés en banc d'essai avec la technologie BEST. Les résultats des essais ont permis de démontrer des efficacités d'enlèvement de BPC de 99,1 p. 100 pour des sédiments considérés comme moyennement contaminés (400 ppm). La compagnie a utilisé une centrifugeuse pour minimiser le volume à traiter et ainsi réduire les coûts de traitement. Les coûts anticipés pour le traitement des sédiments du Port de New Bedford ont été estimés de 57 à 73 US \$/verge cube de sédiments. Le procédé BEST est également considéré pour le traitement des sédiments de la rivière Hudson très fortement contaminés par les BPC (Averett *et al.*, 1990).

Des bancs d'essai sur des échantillons de sédiments du Canal et du Port d'Indiana ont également été réalisés avec cette technologie. Une unité conçue pour traiter 520 m³/jour, avec une capacité maximale de 675 m³/jour devrait coûter 133,30 US \$/m³ à opérer.

Procédé LEEP d'extraction à faible énergie. - Le procédé d'extraction à faible énergie (Low Energy Extraction Process, LEEP) est un procédé d'extraction solvant/solvant pour les composés organiques (tels les BPC) et autres contaminants organiques. Si l'utilisation d'un solvant comme le méthanol permet une bonne extraction, l'utilisation d'un mélange de solvants (tels l'acétone et le kérosène) permet d'obtenir de meilleurs rendements, dépendant des caractéristiques des sols et des contaminants.

La figure 4.26 illustre le schéma de principe de ce procédé.

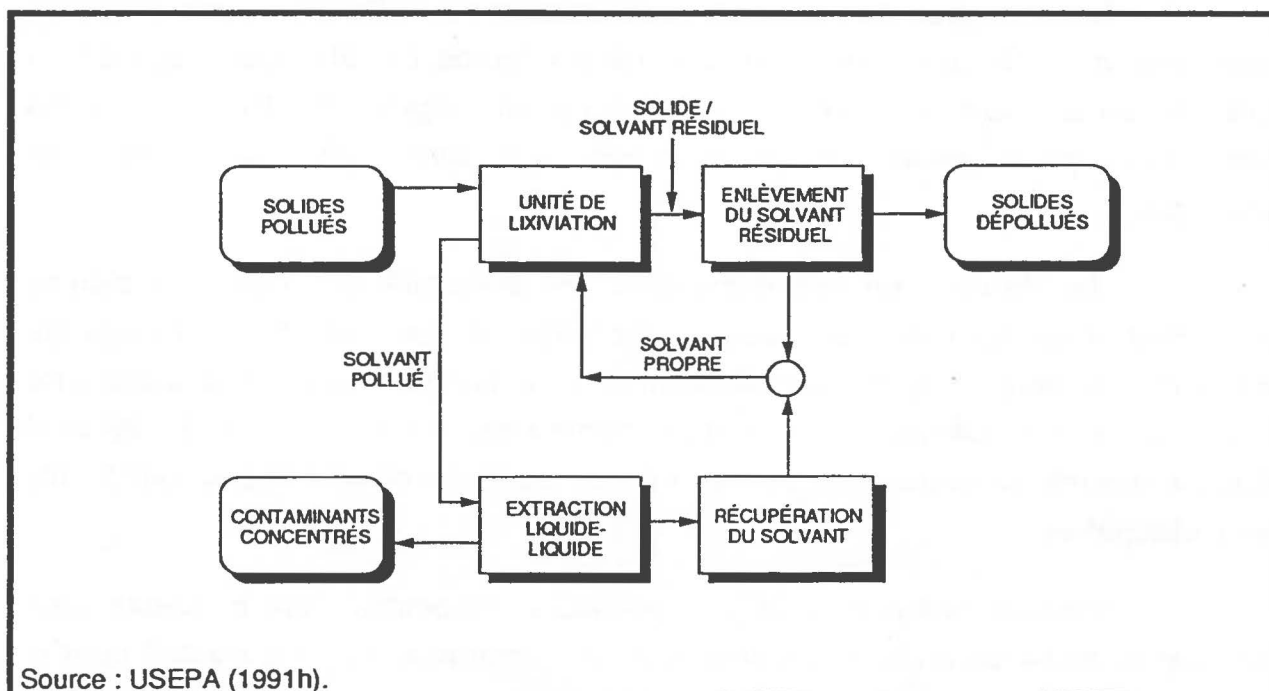


Figure 4.26 Schéma de principe du procédé d'extraction LEEP

Les essais réalisés avec des sédiments du port de Waukegan, Illinois, contaminés avec des BPC, ont confirmé sa valeur pour ce genre de matériaux. Les coûts du traitement de ce procédé d'extraction par acétone-kérosène étaient estimés à 41 US\$ /v³ avec un équipement pouvant traiter entre 260 et 750 v³ par jour (Averett *et al.*, 1990).

Installations de lavage des sols en Europe. - Depuis 1982, plusieurs installations de lavage des sols opèrent sur une base commerciale en Europe pour le traitement de sols contaminés par des métaux lourds et des composés organiques. Sur les 17 installations en opération en 1991, neuf pouvaient traiter des sédiments. La capacité des unités de traitement varie de 10 à 130 t de sédiments/h (USEPA, 1991b).

Technologies d'extraction développées en Hollande. - Des essais de dépollution de sédiments contenant des métaux lourds ont été aussi réalisés en Hollande en utilisant les solvants suivants comme agents d'extraction : acide chlorhydrique (HCl), agents complexants et acide sulfurique (H₂SO₄) produit de façon biologique.

Les résultats de ces recherches ont démontré que ces technologies permettent d'atteindre de très hautes efficacités et que l'aération du mélange sédiments/solvants accélère considérablement la réaction et permet d'accroître l'efficacité. Ces technologies nécessitent par contre beaucoup de produits chimiques et génèrent des résidus contaminés par des métaux lourds qui doivent être ensuite traités avant élimination.

D'autres recherches et une meilleure conception des procédés sont nécessaires avant de réaliser des projets de démonstration à pleine échelle pour le traitement des sédiments (Dillen et Bruggeman, 1992).

4.4.7 Technologies en démonstration pour le traitement des sédiments. - Des 21 technologies d'extraction considérées et évaluées, l'USEPA et l'USACE ont retenu les cinq technologies suivantes pour des projets de démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs : lixiviation acide, procédé BEST, procédé CF Systems, extraction à basse énergie et procédé par surfactants. Tel que mentionné précédemment, la plupart de ces technologies ont déjà fait l'objet de démonstrations concluantes pour les sédiments contaminés. La technologie d'extraction à l'acide a été retenue en raison des limites des autres procédés pour l'élimination des métaux lourds.

Le tableau 4.12 liste les sites où ces projets de démonstration sont actuellement réalisés aux États-Unis, ainsi que la nature de la contamination retrouvée à chaque endroit. Le tableau indique également les technologies d'extraction qui font l'objet de projets de démonstration au Canada via le Fonds d'assainissement des Grands Lacs.

Tableau 4.12 Technologies d'extraction en démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs

TECHNOLOGIE	PROMOTEUR (*)	LIEU DE DÉMONSTRATION		ÉCHELLE DE DÉMONSTRATION	TYPE DE CONTAMINATION	RÉFÉRENCE
		PAYS	SITE			
Extraction chimique des substances organiques . Système BEST	Resources Conservation Corp.	É.-U.	Rivières: Buffalo Grand Calumet Baie Saginaw	Banc d'essai Banc/pilote Banc d'essai	HAP BPC, HAP, H & G BPC	USEPA (1992a)
Extraction chimique des substances organiques . À l'acétone	Rem-Tech	É.-U.	Port Sheboygan	Banc d'essai	BPC	USEPA (1992a)
Extraction avec des surfactants aqueux	Non défini	É.-U.	Port Sheboygan	Banc d'essai	BPC	USEPA (1992a)
Extraction physico-chimique . Bergman	Bergman USA Inc.	É.-U. Canada	Rivières : Buffalo Grand Calumet Baie Saginaw Port Toronto Ontario	Banc d'essai Pilote	HAP BPC, HAP, H & G BPC	USEPA (1992a) Environnement Canada (1993)
Extraction avec chélateurs . Métanetic	Toronto Harbour Commission (THC)	Canada	Port de Toronto Ontario	Pilote	Métaux lourds	Environnement Canada (1993)
Lixiviation séquentielle . Beak	Beak Consultants Ltd	Canada	Canal Welland Ontario	Banc d'essai	HAP	Environnement Canada (1993)
Lavage . Biogenesis	BioGenesis Enterprises Inc.	Canada	Port de Thunder Bay Ontario	Banc d'essai	HAP, crésotes et phénols	Environnement Canada (1993)
Lavage . Unité ALTECH	ALTECH Consulting Ltd	Canada	Canal Welland Ontario	Banc d'essai	HAP	Environnement Canada (1993)
Lixiviation des métaux . COGNIS Terra Met	COGNIS Inc.	Canada	Rivière Ste. Marys Ontario	Banc d'essai	Métaux lourds	Environnement Canada (1993)
Extraction des métaux . Tallon	Tallon Metal Technologies Inc.	Canada	Port Hamilton Ontario	Banc d'essai/ Pilote	Métaux lourds et hydrocarbures	Environnement Canada (1993)

* Pour les adresses et numéros de téléphone des promoteurs, consulter l'Annexe C.

Le procédé BEST a déjà été décrit en 4.4.6. Les autres technologies à base de solvant faisant actuellement l'objet de projets de démonstration en vue de la dépollution des sédiments des Grands Lacs sont relativement similaires. Les paragraphes suivants en présentent un sommaire.

Procédé de lavage Bergmann. - La compagnie Bergmann USA est une filiale de la compagnie allemande Bergmann B.V. qui possède plusieurs installations commerciales de lavage des sols en Europe. La filiale américaine a déjà réalisé aux États-Unis et au Canada plusieurs projets de démonstration avec des unités d'une capacité de 5 à 10 tonnes/heure.

Le procédé de lavage des sols Bergmann utilise des technologies de séparation physico-chimique des contaminants organiques et inorganiques des sols ou des résidus, de façon à obtenir des réductions d'environ 80 p. 100 des volumes de sol contaminé.

Le principe d'opération de ce procédé est basé sur l'hypothèse que la plupart des contaminants présents dans les sédiments sont concentrés dans deux fractions, à savoir : 1) dans les matières organiques (feuilles, racines, etc.) ainsi que les particules fines (inférieures à 63 microns) et 2) dans les fractions plus grossières (sable propre et gravier), généralement moins contaminées (USEPA, 1992c).

La figure 4.27 illustre le schéma de principe du procédé.

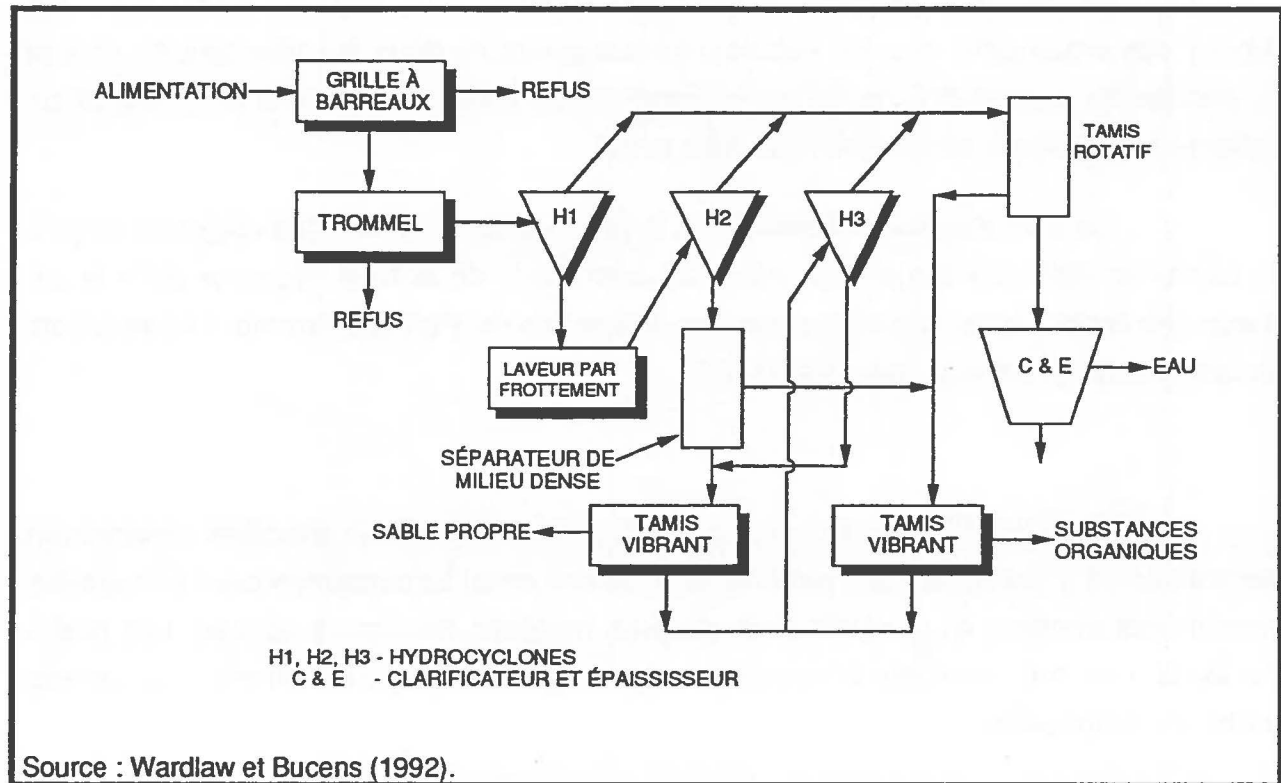


Figure 4.27 Schéma de principe du procédé de lavage Bergmann

Les sédiments sont d'abord tamisés pour éliminer les particules grossières. Ils passent ensuite à travers un Trommel qui sépare les particules de 6 mm, puis à travers trois hydrocyclones en série. Un séparateur de milieu dense facilite l'enlèvement des particules organiques (de gravité spécifique inférieure à 1,6) de la fraction sablonneuse. Un laveur par attrition (frottement des particules) permet d'enlever les contaminants ayant adhéré à la surface des grains de sable. Des surfactants, des acides et des bases peuvent être ajoutés dans le laveur pour faciliter la désorption des contaminants des particules. Le procédé est complété par des tamis vibrants et rotatifs pour séparer le sable propre et les substances organiques et par un clarificateur qui permet la séparation des particules fines par floculation à l'aide de polymères (USEPA, 1992c).

Le procédé Bergmann peut être utilisé pour séparer aussi bien les substances organiques que les substances inorganiques dans le traitement de sols et de sédiments qui ont des contenus en argile et en limon inférieurs à 40 p.100 et un contenu en solide organique inférieur à 20 p.100.

Tel qu'indiqué au tableau 4.12, le procédé Bergmann a fait l'objet de projets de démonstration aux États-Unis avec des sédiments de la baie Saginaw dans le lac Huron (Michigan) et au Canada, avec des sédiments du Port de Toronto. Les résultats de ces essais seront disponibles en 1993.

Procédé Méthanétic. - Le procédé Méthanétic est un procédé d'extraction des métaux. Il a été développé par DeVoe Environmental Laboratories pour extraire les métaux des cendres d'incinérateur et d'autres matrices minérales solides. Les droits d'utilisation de la technologie à travers le monde appartiennent maintenant à la Toronto Harbour Commission.

Le procédé Méthanétic permet d'extraire de façon sélective ou non sélective les métaux lourds. Les étapes principales du procédé sont la dissolution par acidification des métaux liés aux matrices solides contaminées et l'extraction des ions métalliques (hydroxyde, oxyde) de la solution en utilisant des chélateurs. Les étapes d'acidification et de chélation sont conçues de façon à enlever le maximum de métaux visés tout en ayant des effets minimums sur les métaux jugés non problématiques. Les aspects innovateurs du procédé résident dans les chélateurs brevetés et dans la conception des réacteurs (Wardlaw et Bucens, 1992).

La figure 4.28 illustre le schéma de principe du procédé Méthanétic d'extraction des métaux.

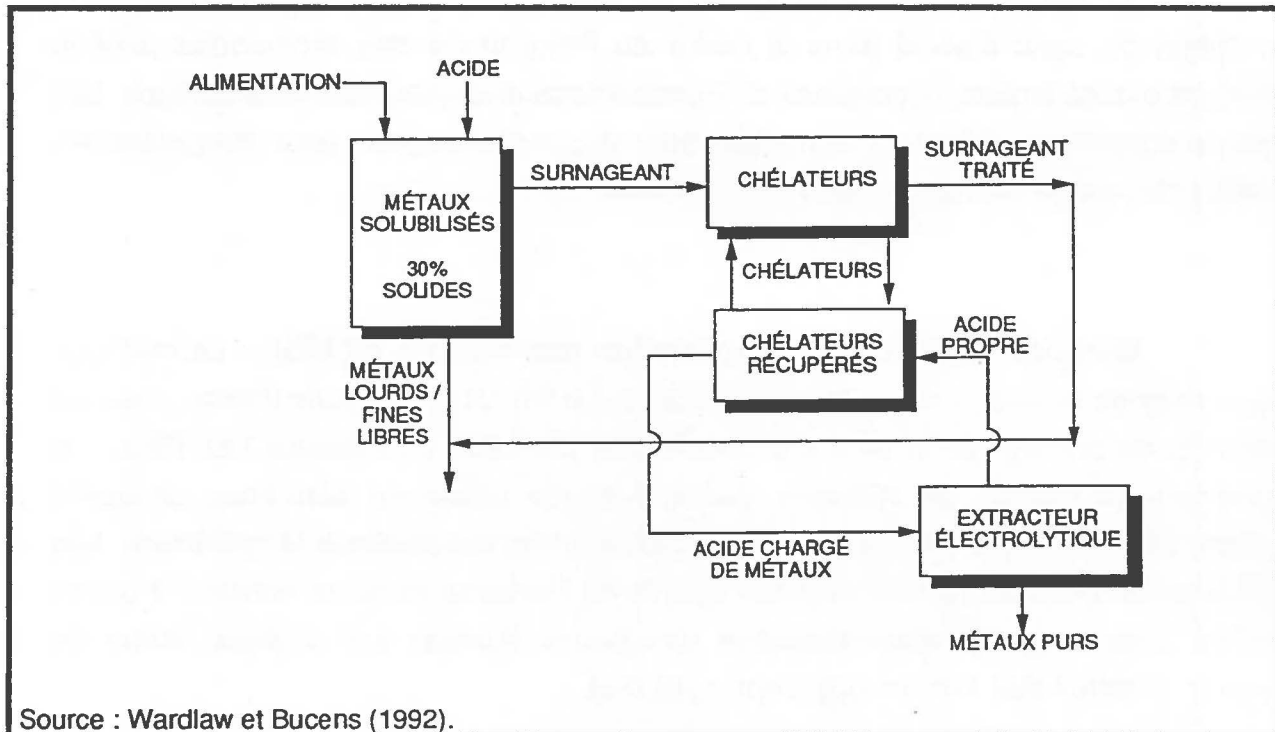


Figure 4.28 Schéma de principe du procédé Métanétic

Tel qu'illustré à la figure 4.28, le procédé consiste d'abord à faire passer les boues fines dans des réacteurs primaires où elles sont mélangées avec des acides pré-sélectionnés pour solubiliser les métaux et avec un chélateur pour complexer les métaux une fois ceux-ci solubilisés. Le choix des acides et leur concentration visent à maximiser l'extraction des métaux lourds sans dissoudre les métaux jugés non contaminants.

Les métaux solubilisés sont ensuite pompés dans le réacteur d'adsorption des métaux où les boues sont mises en contact à contre-courant avec le chélateur. À la sortie, les boues sont débarrassées des métaux lourds tandis que le chélateur, chargé de métaux lourds, passe à travers un réacteur de régénération où il est mis en contact avec des acides régénérateurs pour solubiliser les métaux lourds jusqu'à régénération complète de l'agent. Les métaux lourds sont ensuite récupérés par voie électrolytique (SNC-Lavalin, 1992). Si les concentrations en métaux sont suffisamment élevées, un sous-produit de métal pur peut être obtenu (Wardlaw et Bucens, 1992).

Tel qu'indiqué au tableau 4.13, plusieurs autres technologies d'extraction font l'objet de banc d'essai dans le cadre du Programme des techniques pour le traitement des sédiments contaminés du Fonds d'assainissement des Grands Lacs. Les sections suivantes présentent sommairement des technologies pour lesquelles les résultats des essais seront publiés incessamment.

Méthode séquentielle de lixiviation des métaux (SLMS). - La méthode séquentielle de lixiviation des métaux (SLMS), qui a fait l'objet de banc d'essai avec les sédiments du port de Hamilton, a été développée par Beak Consultants Ltd. (Beak) et l'Université de Guelph de l'Ontario. Cette méthode utilise en séquence un agent oxydant, de l'acide hypochlorique et un chélateur tel l'acide acétique tétradiamine. Les sédiments sont mis en contact avec les agents de lixiviation dans un réacteur à boues liquides. Une étape de déshydratation des boues liquides suit chaque étape de lixiviation (Wastewater Technology Centre, 1992a).

Unité de lavage des sols BioGenesis. - La technologie de lavage des sols BioGenesis, qui a été développée par la compagnie américaine BioGenesis Enterprises Inc. pour le traitement des composés organiques, utilise des produits chimiques brevetés, un camion spécialement aménagé, des séparateurs d'huile/eau, des filtres, un bioréacteur et de l'eau. Les produits chimiques encapsulent les hydrocarbures et améliorent leur biodisponibilité. Les huiles extraites des sols peuvent être recyclées et les boues fines d'huiles et d'eau sont circulées dans les filtres et un bioréacteur (matériel grossier) ou récupérées en utilisant des hydrocyclones et des centrifugeuses à trois phases (Wastewater Technology Centre, 1992a).

La capacité de traitement pour des sols contaminés par 5 000 ppm d'hydrocarbures est de 25 à 35 tonnes/h. Un seul lavage permet d'enlever de 85 à 99 p. 100 des hydrocarbures lorsque la teneur en contaminants ne dépasse pas 15 000 ppm. Pour des niveaux de contamination supérieurs, plusieurs cycles de lavage sont nécessaires. Tel qu'indiqué au tableau 4.13, un projet de démonstration sur banc d'essai est en cours avec les sédiments du port de Thunder Bay fortement contaminés par des créosotes, des phénols chlorés et des HAP (Environnement Canada, 1993).

Unité de lavage des sols Altech. - L'unité mobile commerciale de lavage des sols développée par ALTECH Consulting Ltd., de Willowdale en Ontario pour le traitement des contaminants organiques et inorganiques, a été testée en banc d'essai sur les sédiments du Canal Welland, en Ontario (Environnement Canada, 1993). Ce procédé utilise une forte agitation mécanique des boues liquides pour extraire les contaminants adsorbés aux particules, une phase de séparation liquide/solides suivie par le traitement des eaux usées. L'unité comprend également des filtres au charbon activé pour contrôler les émissions de COV (Wastewater Technology Centre, 1992a).

Unité d'extraction des métaux COGNIS TerraMet™. - Le procédé COGNIS TerraMet™ est un procédé en deux étapes pour traiter les sols, sédiments, etc. contenant des métaux et des contaminants organiques (Environnement Canada, 1993). Les métaux sont d'abord enlevés par des agents de lixiviation soit par réduction ou par échange ionique. Le procédé est conçu pour que les produits de lixiviation et d'extraction puissent être entièrement régénérés et recyclés. Les contaminants organiques sont détruits par biodégradation dans un bioréacteur ou par traitement en pile ou par compostage lorsque les conditions sont favorables (Wastewater Technology Centre, 1992a).

Le procédé a été testé en banc d'essai pour différentes matrices incluant des sols de sites de recyclage de batteries, d'usines de production de zinc, de sites d'essais de munition, d'usines de recyclage des huiles usées, des sols pollués par des déversements de mercure, etc. Les métaux traités incluent le cadmium, le cuivre, le mercure, le plomb et le zinc. Le procédé fait présentement l'objet de banc d'essai avec des sédiments de la rivière Ste. Marys en Ontario (Environnement Canada, 1993).

Unité d'extraction des métaux Tallon. - La compagnie Tallon Metal Technologies Inc., de Guelph Ontario possède une unité commerciale de traitement des métaux pour la dépollution des sols ou des liquides. Le procédé consiste en une série de procédés d'extraction et de récupération hydrométallurgiques qui emploient une

combinaison d'agents de lixiviation organiques et inorganiques non toxiques avec des adsorbants, désignés par le terme Vitrokele^(TM) (Wastewater Technology Centre, 1992a). Cette technologie, qui a déjà été appliquée dans le domaine minier et les industries de placage, fait l'objet de projets de démonstration en banc d'essai et à l'échelle pilote avec des sédiments du port de Hamilton (Environnement Canada, 1993).

Selon l'USEPA et l'USACE, ces procédés de lavage font actuellement l'objet de projets de démonstration parce que la faisabilité technique de la plupart des procédés d'extraction est actuellement difficile à évaluer en raison de l'absence de projets de dépollution à l'échelle réelle. Les projets de démonstration devraient permettre de mieux juger les problèmes potentiels liés à la manutention des sédiments, à la récupération des solvants et les problèmes de toxicité des solvants résiduels. Bien que les coûts ne soient pas très bien documentés, ils sont estimés comme devant excéder les 100 US \$/verge cube (Averett *et al.*, 1990).

4.4.8 Technologies retenues pour des projets de dépollution des sédiments. - En 1990, les technologies de lavage des sols avaient été retenues pour restaurer les sols de 16 sites du Superfund américain, contaminés par l'un et (ou) l'autre des composés suivants : HAP, PCP, métaux, plomb, pesticides et composés organiques volatils. Des 16 sites, cinq contenaient également des sédiments contaminés (USEPA, 1991b). Le tableau 4.13 fait une présentation sommaire de ces sites.

Quant aux technologies d'extraction par solvants, elles avaient été retenues pour sept projets de restauration de sols contaminés entre 1982 et 1990; des sédiments contaminés étaient également présents à l'un des sites (tableau 4.13).

Tableau 4.13 Liste des projets de dépollution de sédiments par des technologies d'extraction dans le cadre du programme américain d'innovation technologique

NOM DU SITE, ÉTAT	TECHNOLOGIE	NATURE DES ACTIVITÉS	MATRICE (QUANTITÉ)	PRINCIPAUX CONTAMINANTS TRAITÉS	STATUT	CONTACTS TÉLÉPHONIQUES
King of Prussia NJ	Lavage	Installations de recyclage	Sols, sédiments, et boues combinés (20 150 v.c.) *	Métaux (chrome, cuivre, argent)	Conception : Été 1993	Jim Hahnenberg 212-264-5387
Myers Property NJ	Lavage précédé par la déchloration	Fabrication de pesticides	Sols et sédiments combinés (50 000 v.c.)	Métaux (aluminium, cadmium, argent, chrome et sodium)	Pré-conception	John Prince 212-264-1213
Vineyard Chemical NJ	Lavage	Fabrication de pesticides	Sédiments (62 600 v.c.)	Arsenic	Pré-conception	Matthew Westgate 212-264-3406
United Scrap Lead OH	Lavage	Recyclage de batteries	Sédiments (45 500 v.c.) Sols (45 500 v.c.)	Plomb, arsenic	En conception	Anita Boseman 312-886-6941
Koppers (Oroville Plant) CA	Lavage	Préservation du bois	Sols et sédiments combinés (200 000 v.c.)	HAP, SVOC (PCP), dioxines	Conception: Été 1992	Fred Schauffler 415-744-2365
O'Connor ME	Extraction aux solvants	Recyclage de transformateurs électriques	Sols et sédiments combinés (23 500 v.c.)	BPC, HAP et plomb	Conception: Printemps 1993	Mike Jasinski 617-573-5786

* v.c.: verge cube

Source : USEPA (1991c).

4.4.9 Conclusions. - Les sections précédentes ont montré que les technologies d'extraction physico-chimique pouvaient être facilement développées pour des unités fixes ou mobiles et que ces technologies étaient aptes à extraire aussi bien les contaminants organiques que les métaux lourds présents dans les sédiments sans entraîner d'émissions atmosphériques difficilement contrôlables. Pour la plupart des procédés, plusieurs cycles d'extraction peuvent être néanmoins nécessaires pour obtenir des hautes efficacités d'enlèvement, en particulier en présence de sols ou de sédiments contenant un pourcentage élevé de silt et d'argile.

En concentrant les contaminants dans des petits volumes à traiter, les technologies d'extraction présentent plusieurs possibilités d'application pour le traitement des sédiments contaminés qui habituellement implique de grands volumes à traiter avec des teneurs relativement faibles en contaminants. Ces volumes résiduels doivent être pour la plupart traités par des technologies dites destructrices (p. ex., incinération) dans le cas de contamination organique ou par des technologies d'immobilisation, en présence de métaux lourds. Certaines technologies de pointe (p. ex., le procédé Metanetic) utilisent des chélateurs pour extraire et récupérer les métaux des sédiments contaminés.

Jusqu'à présent, les technologies d'extraction ont été appliquées à des sédiments contaminés uniquement en laboratoire, en banc d'essai ou à l'échelle pilote, du moins en Amérique du Nord. En Europe, bien qu'il existe plusieurs unités commerciales aptes à traiter les sédiments, celles-ci ne semblent pas utilisées sur une base courante pour la dépollution des sédiments. Tant que ces technologies n'auront pas été appliquées pour des projets de dépollution de plusieurs milliers de mètres cubes de sédiments, leur faisabilité aux plans technique, économique et environnemental sera difficile à évaluer.

4.5 Traitement chimique

4.5.1 Principe de traitement. - Les technologies de traitement chimique utilisent le déplacement du chlore, l'oxydation ou la réduction pour la destruction, la détoxification ou l'enlèvement des contaminants présents dans les matrices contaminées.

Les technologies de traitement chimique incluent les procédés suivants : oxydation-réduction, déchloration, hydrolyse, électrolyse et photolyse.

Selon Manahan (1990), l'application des technologies de traitement chimique pour la dépollution des déchets dépend des propriétés chimiques des contaminants présents dans les matrices de déchets à traiter à savoir : acide-base, oxydation-réduction, précipitation, complexion, réactivité, inflammabilité/combustibilité, corrosivité et compatibilité avec les autres contaminants. Les propriétés et les réactions chimiques possibles influencent forcément le choix d'un des modes de traitement chimique suivants :

- neutralisation par des acides/bases;
- précipitation chimique;
- floculation chimique;
- oxydation;
- réduction;
- extraction et lixiviation chimiques;
- échange ionique.

4.5.2 Technologies disponibles

4.5.2.1 Oxydation/Réduction.- Les réactions chimiques d'oxydo-réduction (redox) sont utilisées pour détruire les composés dangereux ou les convertir en une forme moins dangereuse. Pendant les réactions entre les contaminants des déchets et les

réactifs ajoutés, le niveau d'oxydation d'une substance est augmenté alors qu'il diminue pour l'autre (USEPA,1988).

Le procédé redox consiste en un ajustement du pH initial, l'ajout d'agents réducteurs, le mélange et le traitement pour enlever ou précipiter les produits oxydés ou réduits. La figure 4.29 illustre les intrants et extrants des procédés d'oxydation/réduction.

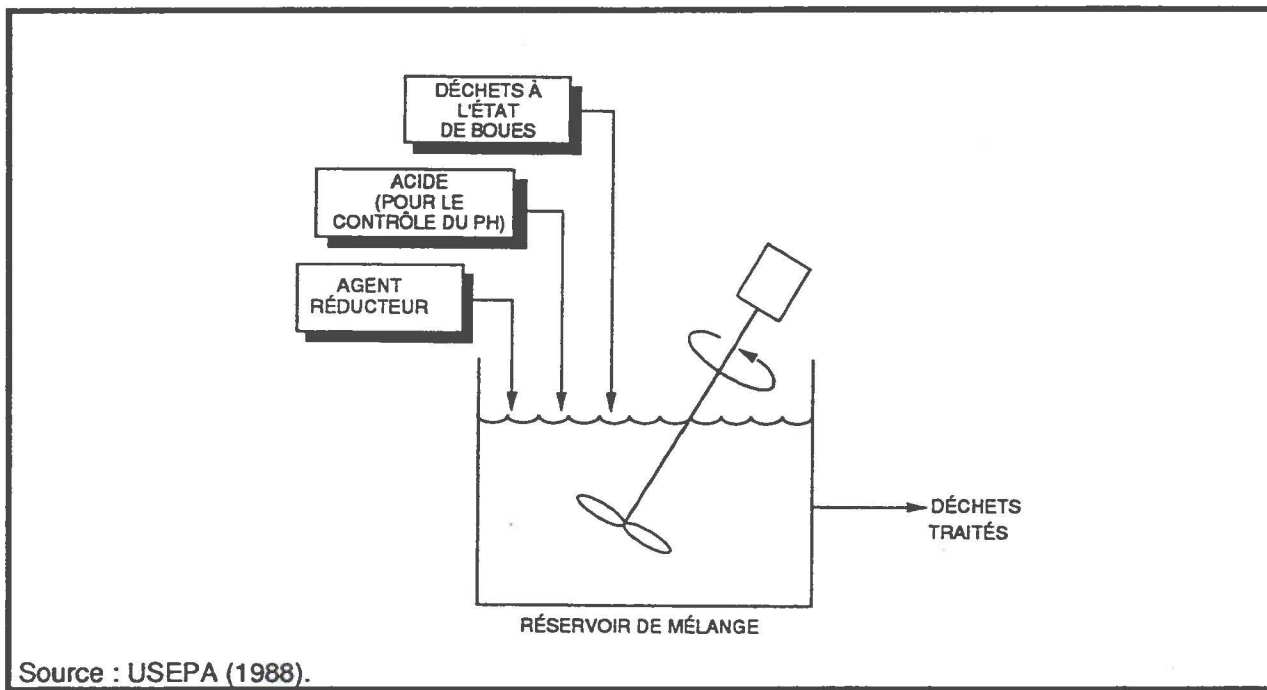


Figure 4.29 Intrants et extrants des procédés d'oxydation/réduction

Le procédé redox est souvent utilisé pour *réduire* le chrome hexavalent (Cr^{+6}) en chrome trivalent, forme moins toxique et qui se prête mieux à une précipitation chimique. Le procédé redox est aussi utilisé pour traiter les déchets contaminés par le mercure, l'argent et le plomb. Les agents réducteurs habituels incluent : les métaux alcalins (sodium, potassium), le dioxyde de soufre, les sels de sulfite et les sulfates ferreux, le fer, l'aluminium, le zinc, et les borohydrides de sodium.

L'oxydation chimique est utilisée principalement pour traiter les cyanures et les eaux usées contenant des substances organiques oxydables, notamment l'aldéhyde, les mercaptans, les phénols, le benzidine, les acides non saturés et certains pesticides. Les principaux oxydants disponibles sur une base commerciale sont le permanganate de potassium, le peroxyde d'hydrogène, les hypochlorites et les gaz chlorés.

La figure 4.30 illustre le schéma de principe des procédés d'oxydation/réduction.

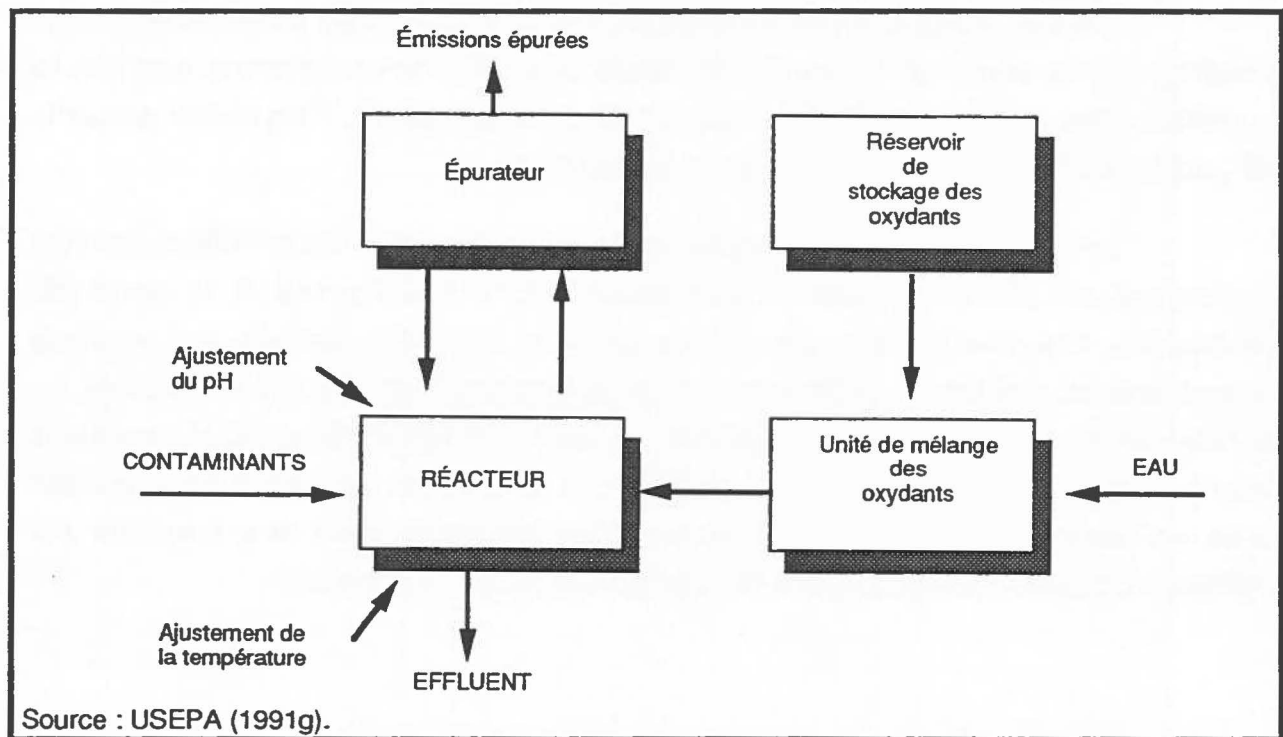


Figure 4.30 Schéma de principe des procédés d'oxydation/réduction

Le procédé redox produit des effluents solides/liquides qui doivent être traités par l'un et (ou) l'autre des procédés suivants : précipitation chimique, filtration, sédimentation, évaporation, traitement biologique ou adsorption du charbon activé. Comme il est possible de produire de l'acide chlorhydrique par ce procédé lors du

traitement des substances organiques chlorées, des tests de lixiviation sont nécessaires sur les résidus solides pour déterminer si une stabilisation est requise avant leur élimination.

La technologie d'oxydation des organiques transforme, dégrade ou immobilise les contaminants des sols en augmentant le degré d'oxydation d'un atome par l'enlèvement d'électrons. La dégradation complète des contaminants en dioxyde de carbone et en eau dépend des concentrations des oxydants, du pH, du potentiel d'oxydation et de la formation de produits intermédiaires stables. Des produits toxiques peuvent se former si la réaction n'est pas complétée.

Comme pré-traitement, les procédés d'oxydation peuvent être utilisés avant la biodégradation pour traiter les effluents dilués contenant des substances organiques oxydables telles que les aldéhydes, les phénols et le benzydine. L'oxydation présente des applications limitées pour les boues et les goudrons.

Les contaminants organiques des sols et des eaux souterraines peuvent être oxydés en place, en utilisant des réactifs forts tels l'ozone et le peroxyde d'hydrogène. D'autres produits d'oxydation peuvent aussi être utilisés, par exemple l'hypochlorite de calcium, le permanganate de potassium, l'hypochlorite de sodium, les fluorures et les gaz chlorés. Ces oxydants peuvent être appliqués dans les solutions d'eau par aspersion directement sur la surface des sols, en les injectant sous la surface ou en les plaçant dans des puits d'injection. Ces options peuvent être adaptées aux sédiments dragués placés dans des cellules de confinement terrestre.

4.5.2.2 Déchloration. - Cette catégorie inclut toute technologie chimique de substitution nucléophile qui enlève ou remplace des atomes de chlore des composés dangereux. Un traitement subséquent des composés chlorés dangereux formés pendant la réaction peut être requis.

La substitution nucléophile peut être utilisée pour traiter chimiquement les déchets en enlevant les atomes de chlore des composés organiques (aromatiques) en utilisant le principe de transfert d'électrons sous des conditions favorables. Puisque cette substitution dépend d'un pH élevé, la réaction doit être réalisée en conditions

alcalines. Les agents sans doute les plus efficaces pour la réaliser sont les hydroxydes de métaux alcalins, dont le glycol de polyéthylène (APEG) ou le méthyle de polyéthylène glycol (APEGM).

La figure 4.31 illustre les intrants et les extrants des procédés de déchloration.

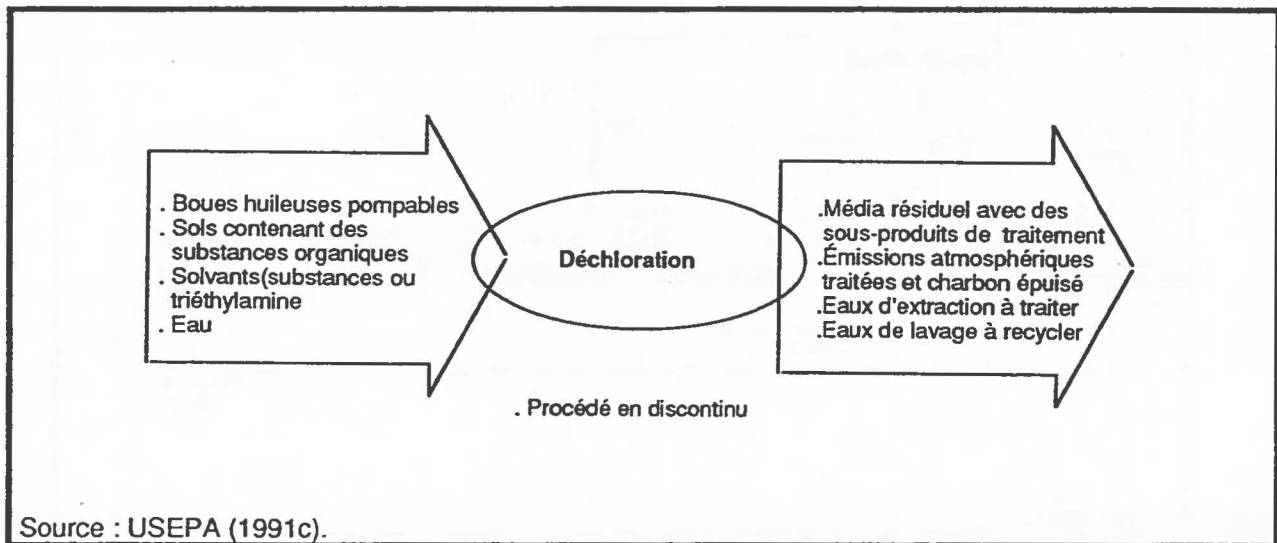
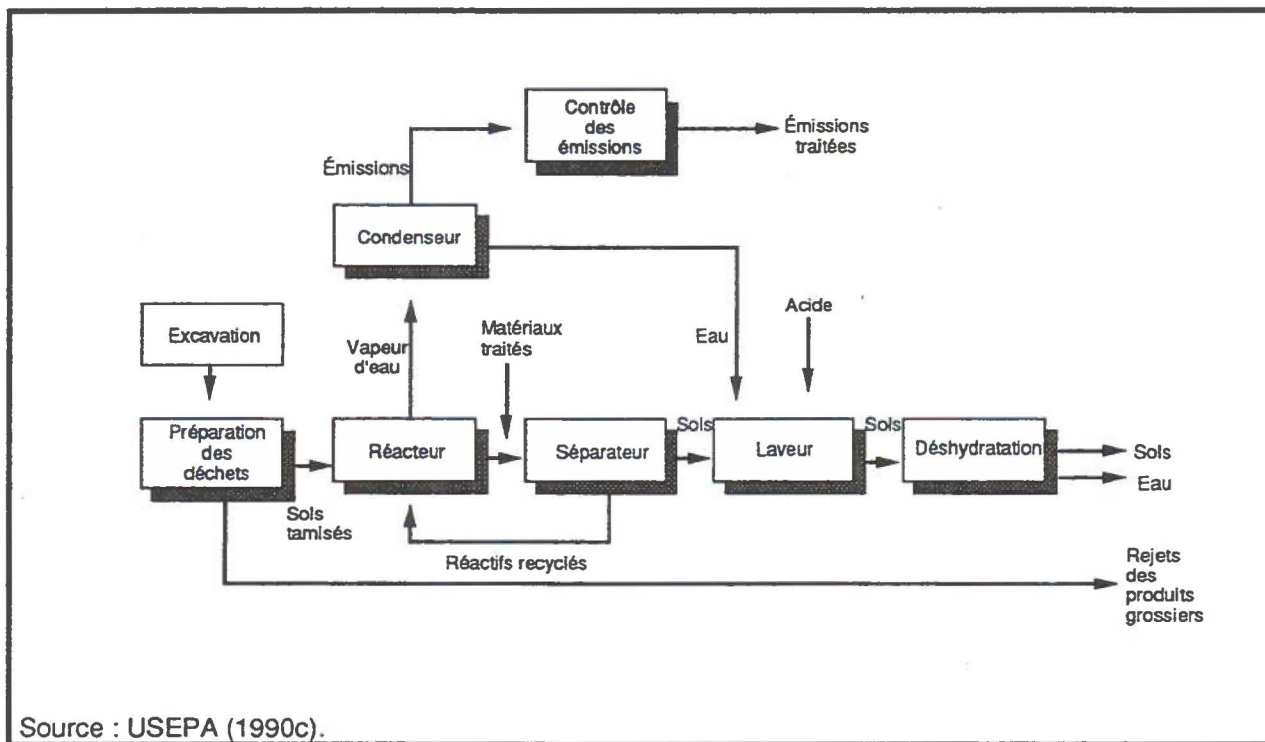


Figure 4.31 Intrants et extrants des procédés de déchloration

L'un des produits APEG les plus utilisés, le glycol de polyéthylène-potassium (KPEG) réduit la toxicité des hydrocarbures chlorés (tels que les BPC) en enlevant les atomes de chlore et en les remplaçant par des métaux alcalins (p. ex., potassium). Des agents de déchloration spécifiques à base de KPEG existent pour les solides, les liquides et les boues. Le procédé KPEG est généralement utilisé pour traiter les huiles usées contenant des dioxines et des essences de diesel contaminées par des BPC, des dioxines et des chlorobenzènes. Le procédé réduit la toxicité mais augmente le volume des déchets. Les sous-produits de la réaction incluent des sels chlorés, des polymères et des métaux lourds. Des traitements additionnels doivent être réalisés soit par oxydation, biodégradation, adsorption sur charbon activé ou incinération (Averett *et al.*, 1990).

La figure 4.32 illustre le schéma de principe des procédés de déchloration APEG.



Source : USEPA (1990c).

Figure 4.32 Schéma de principe des procédés de déchloration APEG

Tel qu'illustré à la figure 4.32, les matrices à traiter doivent faire l'objet d'un tamisage pour enlever les débris et les gros objets. Les agents de déchloration sont ajoutés aux sols chauffés entre 100 °C et 180 °C dans le réacteur de mélange. Après un temps de séjour de 4 à 5 heures, les sols traités passent à travers un séparateur pour récupérer les agents de déchloration. Les vapeurs d'eau circulent dans un condenseur et l'eau à la sortie peut être recyclée vers le laveur ou être envoyée à l'unité de traitement des eaux. Un lit de charbon activé capte les substances volatiles. À la sortie du séparateur, les sols traités sont neutralisés à l'acide puis déshydratés avant leur mise en dépôt (USEPA, 1991c).

Un autre procédé de déchloration évalué par l'USEPA et l'USACE pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs est la *thionation*. Dans ce procédé, le soufre déplace le chlore des molécules organiques. Cette technologie qui en est aux premières étapes de conception devrait pouvoir dégrader les contaminants organiques. Ainsi, le carbonate de sodium et le soufre réagissent avec le p-dichlorobenzène entre 150 et 170 °C pour enlever le chlore, laissant un polymère insoluble, du chlorure de sodium et du CO₂. Ce procédé a toutefois des applications limitées pour les sédiments contaminés (Averett *et al.*, 1990).

4.5.2.3 Hydrolyse. - Plusieurs composés organiques et inorganiques sont dangereux en raison de leur forte réaction en présence d'eau, réaction communément appelée hydrolyse. Dans certaines situations, la réaction est telle qu'elle peut provoquer un incendie ou une explosion ou produire un gaz dangereux, tel le H₂, explosif ou corrosif, ou du HCl, un gaz toxique.

Une des façons de traiter certains composés chimiques très réactifs avec l'eau est de les soumettre à une hydrolyse sous des conditions contrôlées. Les contaminants inorganiques pouvant être traités par hydrolyse incluent les métaux qui réagissent avec l'eau : carbures métalliques (carbures de calcium), hydrides (hydrides d'aluminium de sodium, NaAlH₄), amides (amides de sodium, NaNH₂), alkoxides (éthoxyde de sodium, NaOC₂H₅) et halides (tétrachlorure de silice, SiCl₄).

L'hydrolyse se produit quand un composé rompt ces liens et se dissout dans une solution de mélange ionique et d'eau. Cette rupture peut se faire par l'ajout de produits chimiques, par irradiation (photolyse) ou lors du clivage de la réaction enzymatique. L'hydrolyse, qui peut se réaliser par lots dans des réservoirs ouverts ou en mode continu dans des grandes tours permet de traiter des liquides, des gaz ou des solides contaminés avec des composés aliphatiques et des aromatiques tels que les esters, les phosphates et les nitrates mais ne convient pas pour traiter les contaminants inorganiques.

Selon les produits utilisés pour la réaction, l'hydrolyse peut produire des sous-produits toxiques. L'application de l'hydrolyse est toutefois limitée pour les sédiments contaminés (Averett *et al.*, 1990).

4.5.2.4 Électrolyse. - L'électrolyse consiste en une réduction électrochimique et en une oxydation des composés chimiques dans une solution, à l'aide d'électricité appliquée à des électrodes par une source extérieure. Un des composés en solution (généralement un ion métallique) est réduit par des électrons à la cathode et un autre composé est oxydé à l'anode. Dans le traitement de déchets dangereux, l'électrolyse est la plupart du temps utilisée pour la récupération des métaux.

4.5.2.5 Photolyse. - La réaction photolytique est un procédé utilisant les photons de la lumière de faible longueur d'onde ou de radiation ultraviolette pour décomposer chimiquement les contaminants (p. ex., photodécomposition du dioxyde d'azote dans l'atmosphère, ce qui produit des atomes d'oxygène réactifs qui déclenchent le processus de formation du smog). Cette technologie est encore au stade du développement en banc d'essai.

Tableau 4.14 Efficacité des technologies de traitement chimique par groupe de contaminants et par type de déchets

GROUPE DE CONTAMINANTS	OXYDATION CHIMIQUE		DÉCHLORATION AU GLYCOL	DÉCHLORATION CHIMIQUE APEG			
	Liquides	Sols/Boues	Sols/Débris	Sédiments	Huiles	Sols	Boues
ORGANIQUES							
Volatils halogénés	2	1	1	1	1	1	1
Semi-volatils halogénés	2	1	1	1	1	1	1
Volatils non halogénés	2	1	0	0	0	0	0
Semi-volatils non halogénés	2	1	0	0	0	0	0
BPC	2	0	2	2	2	2	2
Pesticides (halogénés)	2	1	1	1	2	2	1
Dioxines / Furannes	1	0	2	2	2	2	2
Cyanures organiques	2	2	0	0	0	0	0
Substances organiques corrosives	1	1	0	0	0	0	0
INORGANIQUES							
Métaux volatils	2	1	0	0	0	0	0
Métaux non volatils	2	1	0	0	0	0	0
Amiante	0	0	0	0	0	0	0
Matériaux radioactifs	0	0	0	0	0	0	0
Substances inorganiques corrosives	0	0	0	0	0	0	0
Cyanures inorganiques	2	1	0	0	0	0	0
RÉACTIFS							
Oxydants	0	0	0	0	0	0	0
Réducteurs	2	1	0	0	0	0	0

Légende

2: Efficacité de bonne à excellente; forte probabilité que la technologie soit efficace.

1: Efficacité de marginale à moyenne ou potentielle; des précautions doivent être prises dans le choix des technologies; les experts sont d'avis que cette technologie fonctionnera.

0: Efficacité nulle: les experts sont d'avis que la technologie ne pourra traiter ce type de déchets et de contaminants.

X: Effets néfastes potentiels.

Source: USEPA (1990c; 1991c)

Tableau 4.15 Avantages, désavantages et application des technologies chimiques pour la dépollution des sols

TECHNOLOGIES	AVANTAGES	DÉSAVANTAGES	APPLICATION / DÉMONSTRATION
Déchloration · Procédé APEG	<ul style="list-style-type: none"> · Produits de la déchloration moins toxiques et généralement biodégradables. · Réactifs utilisés non toxiques et relativement faciles à synthétiser. · Technologie pouvant être appliquée sur place et hors site. · Unités de traitement mobiles. 	<ul style="list-style-type: none"> · Nécessité de suivre le pH des sols et doit être neutralisé si des réactifs sont présents. · Procédé moins efficace en présence de fortes concentrations d'argiles et de matières organiques. · Traitement sur place est efficace seulement en surface en raison de la méthode d'application. 	<ul style="list-style-type: none"> · Technologies démontrées en banc d'essai et à échelle pilote pour des sols contaminés par des BPC, dioxines.
Déchloration · Procédé Eco Logic	<ul style="list-style-type: none"> · Capacité de traiter une variété de composés halogénés dans des sols différents. · Taux d'enlèvement de 99,999 % sur banc d'essai. · Unité mobile. · Procédé recommandé pour de grands volumes, des projets de courte ou longue durée. · Pas de formation de dioxines ou furannes en raison de l'absence d'oxygène. 	<ul style="list-style-type: none"> · Nécessité des opérateurs qualifiés dû à la complexité du procédé et des systèmes de contrôle. 	<ul style="list-style-type: none"> · Technologie démontrée en banc d'essai pour une variété de contaminants organiques tels HAP, BPC, dioxines, furannes et dérivés de ces composés. · Conçue pour traiter les sols, sédiments, les boues et le lixiviat des décharges contrôlées.
Déchloration · Procédé radiolytique	<ul style="list-style-type: none"> · Procédé réalisé en absence d'air éliminant les possibilités de production de dioxines et furannes. · Suivi en continu du procédé assure une destruction complète. · Procédé applicable aux déchets contenant des BPC et autres composés similaires. 	<ul style="list-style-type: none"> · Procédé au début du stade de conception. · Très peu de données sur l'efficacité du procédé et des effets des diverses matrices et contaminants sur le procédé. 	<ul style="list-style-type: none"> · En début de développement. · Expériences réalisées par Énergie Atomique du Canada.
Déchloration · Procédé électrochimique	<ul style="list-style-type: none"> · Efficacité relativement bonne pour détoxifier les pentachlorophénols. 	<ul style="list-style-type: none"> · Pas applicable directement sur les sols. · Nécessite une étape d'extraction qui augmente les coûts de traitement. · Procédé au début du stade de conception. 	<ul style="list-style-type: none"> · En début de développement par le gouvernement néerlandais.
Réactions d'oxydation · Dioxyde de chlore	<ul style="list-style-type: none"> · Pas de production de substances organiques halogénées toxiques. · Produits de réaction: substances organiques non toxiques et sels. · Dioxyde de chlore peut être produit sur le site en faisant réagir du chlore avec de l'hypochlorite de sodium. 	<ul style="list-style-type: none"> · Procédé pas démontré pour la dépollution des sols. · Plus de données nécessaires avant une application à pleine échelle. 	<ul style="list-style-type: none"> · Appliquée pour traiter les déchets aqueux contaminés par les cyanures. · Application aux sols devrait être facile. · Procédé retenu pour des projets du Superfund.
Réactions d'oxydation · Réactions catalysées	<ul style="list-style-type: none"> · Pesticides organophosphérés et carbonatés peuvent se dégrader par hydrolyse sous des conditions alcalines. · Procédés vérifiés sur le terrain pour plusieurs classes de contaminants, incluant triazines et composés organophosphatés. · Concentrations toxiques peuvent être aussi réduites par atténuation par ajout de sol. 	<ul style="list-style-type: none"> · Oxydation des contaminants organiques peut produire des composés plus toxiques que les contaminants d'origine. · Diminution de l'humidité devrait réussir à retarder l'activité microbienne ou augmenter la ventilation des composés organiques volatils. 	<ul style="list-style-type: none"> · Essais de traitabilité démontrée pour plusieurs classes de substances chimiques (triazine, organophosphates et éthyl parathion).
Réactions d'oxydation · Peroxyde d'hydrogène	<ul style="list-style-type: none"> · Oxydant facilement disponible dont l'efficacité a été démontrée. · Relativement peu dispendieux. · Réaction très rapide. 	<ul style="list-style-type: none"> · Réactions très exothermiques avec volatilisation possible des hydrocarbures légers avant leur oxydation par le peroxyde. · Odeurs néfastes potentielles des produits intermédiaires. · Évolution contrôlable de ces composés mais à des coûts très élevés. · Coûts élevés de produits chimiques considérant que cet oxydant est non sélectif et peut oxyder des composés non visés. · Oxydation possible de composés organiques essentiels des sols. 	<ul style="list-style-type: none"> · Utilisé pour restaurer un site contaminé par du formaldéhyde. · Utilisée en banc d'essai pour des sols contaminés au PCP.
Réactions d'oxydation · Ozone	<ul style="list-style-type: none"> · Réaction très rapide. · Produits intermédiaires sont biodégradables et sont normalement moins toxiques que les composés similaires. 	<ul style="list-style-type: none"> · Nécessité d'une production sur le site en raison de sa demi-vie très courte: coûts d'opération très élevés. · Oxydation de certains pesticides peut produire à l'occasion des produits plus toxiques que les composés initiaux. 	<ul style="list-style-type: none"> · Essences, huiles minérales et HAP. · Efficace pour traiter les hydrocarbures aromatiques et aliphatiques. · Utilisée en Allemagne pour traiter des sols et les eaux souterraines.

Source : Adapté de CH2M Hill Engineering Ltd (1991).

4.5.3 Domaines d'application. - Le tableau 4.14 présente les efficacités démontrées et anticipées des technologies chimiques par groupe de contaminants et par type de déchets. Le tableau montre que les procédés d'oxydation chimique et de déchloration sont capables de traiter une gamme variée de contaminants organiques présents dans les liquides, les sols, les boues et les sédiments. Les technologies d'oxydation/réduction peuvent traiter les métaux et les cyanures inorganiques tandis que les procédés de déchloration ne sont pas conçus pour le traitement des inorganiques.

À l'exception de l'oxydation chimique, apte à traiter les contaminants de type réactif (réducteurs), les autres technologies chimiques ne peuvent pas traiter les contaminants réactifs et ce, quelle que soit la matrice à traiter.

4.5.4 Avantages, limites et applications démontrées de chaque technologie.
- Tel que montré au tableau 4.15, le principal avantage de la déchloration chimique est qu'elle permet d'obtenir des composés solubles moins toxiques qu'à l'origine en modifiant la structure chimique des molécules des contaminants par enlèvement des atomes de chlore via une réaction réductive. Ces procédés éliminent le risque de production de dioxines et de furannes pendant la réaction.

La déchloration peut être réalisée par des procédés in situ (APEG) ou au-dessus du sol (APEG, EcoLogic, à fréquence radio ou électrochimique). Toutefois, certains de ces procédés en sont encore au stade de la conception (électrochimique, radiolytique) et requièrent des opérateurs qualifiés (CH2M Hill Engineering Ltd., 1992).

Les procédés APEG et EcoLogic ont déjà fait l'objet de banc d'essai concluants pour traiter une gamme variée de contaminants organiques chlorés présents dans les sols tels que les HAP, les BPC, les dioxines et les furannes.

Quant aux procédés d'oxydation réalisés soit par ajout de composés de charge électrique négative tels que le chlore, l'hydroxyle, l'oxygène, ou par la perte d'hydrogène, ils ont été utilisés jusqu'à présent pour le traitement des eaux usées. Les réactions sont généralement très rapides et nécessitent un bon contrôle des opérations afin de s'assurer que l'oxydation des contaminants organiques ne produise pas de

composés organiques plus toxiques ou encore plus récalcitrants au traitement que les contaminants initiaux.

4.5.5 Avantages et limites pour le traitement de sédiments. - Peu de technologies de destruction chimique ont été utilisées jusqu'à présent pour le traitement des métaux lourds et le traitement des substances organiques retrouvées dans les sédiments contaminés. Selon Averett *et al.* (1990) et l'USEPA (1991b), plusieurs de ces procédés ont été évalués à l'échelle du laboratoire mais seule la *substitution nucléophile (déchloration)*, utilisant de l'hydroxide de potassium et du polyéthylène glycol (KPEG), avait été testée sur une base de banc d'essai au début des années 1990, tel qu'indiqué au tableau 4.16.

L'*oxydation des substances inorganiques* est applicable à un nombre limité de composés; une utilisation possible pour les sédiments serait l'oxydation des cyanures en cyanates moins toxiques et la conversion des arsenites en arsenates moins solubles. Soumis à des conditions oxydantes, les autres composés peuvent devenir plus mobiles, limitant ainsi l'utilisation de ce procédé pour la plupart des problèmes de contamination des sédiments.

L'*oxydation des composés organiques* peut être réalisée par une aération naturelle des sédiments ou en ajoutant des oxydants tels que l'ozone, le peroxyde d'hydrogène, le dioxyde de chlore ou le permanganate de sodium. L'aération des sédiments sur une longue période n'est pas une solution pratique et l'ajout d'oxydants aux sédiments peut produire des sous-produits toxiques (Averett *et al.*, 1990).

Les recherches réalisées aux Pays-Bas depuis 1989 sur les technologies de dépollution des sédiments ont démontré que l'ajout du peroxyde d'hydrogène aux matériaux dragués pour oxyder les contaminants organiques n'avait pas donné les résultats théoriques escomptés. Le développement de cette technologie a été par conséquent arrêté après l'étape en laboratoire.

Tableau 4.16 Évaluation de la performance anticipée des technologies chimiques pour la dépollution de sédiments

TECHNOLOGIE	STADE DE DÉVELOPPEMENT	APPLICATION AUX SÉDIMENTS	DISPONIBILITÉ	COTE DE PERFORMANCE (**)		
				Efficacité	Application	Coûts
Chélation (*)	Démontré	Non	Oui	3	2	2
Hydrolyse chimique	Conceptuel	Non	Développement	2	1	2
Oxydation des substances inorganiques	Conceptuel	Non	Développement	2	1	2
Oxydation des substances organiques	Pilote	Non	Oui	3	2	2
Réduction des métaux	Conceptuel	Non	Développement	2	1	2
Réduction des substances organiques	Conceptuel	Non	Développement	1	1	2
Substitution nucléophile	Pilote	Banc d'essai	Breveté	4	2	2
Thionation	Conceptuel	Non	Développement	1	1	2

Remarques :

* Les technologies en caractère gras ont été retenues par l'USACE et l'USEPA pour des projets de démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs.

** Voir tableau 3.3. pour la signification des cotes de performance.

Source : Averett et al. (1990).

Avant que le *procédé de déchloration APEG* puisse être appliqué sur une base de pleine échelle aux sédiments contaminés, les problèmes suivants doivent être résolus : conception du mélangeur pour le transfert de masse; réactions cinétiques et séparation des solides; récupération des réactifs et leur élimination; élimination des solides; traitement des substances organiques encore présentes dans les solides après déchloration.

Les procédés de *photolyse* par énergie radiante utilisent soit l'énergie radiante naturelle (lumière ultraviolette, rayon UV) ou l'énergie simulée pour la photodégradation des contaminants organiques. Comme la lumière UV ne peut pas pénétrer les sédiments ou les solutions opaques, les contaminants doivent être préalablement extraits des sédiments avant d'être irradiés aux rayons UV. Ces technologies n'ont pas fait l'objet de projets de démonstration à pleine échelle et sont encore au stade de développement (Averett *et al.*, 1990).

4.5.6 Technologies démontrées pour le traitement des sédiments. - Le tableau 4.17 présente les technologies chimiques qui ont été démontrées pour la dépollution des sédiments contaminés. Le tableau précise pour chaque technologie, le nom des promoteurs, le lieu et l'échelle de démonstration et le type de contaminant traité. En date de 1992, il semble que seules les technologies de déchloration par le système KPEG et le procédé thermochimique EcoLogic aient démontré leur efficacité dans le traitement des sédiments.

Les résultats sur banc d'essai de dépollution de sédiments du port de New Bedford (Mass.) avec le procédé KPEG développé par Galson Research Corporation, dont le principe a été discuté précédemment, ont démontré une réduction des teneurs en BPC de 6000 à 7000 ppm jusqu'à 4 ppm après 12 heures, à des températures de 165 °C, et une récupération de 98 p.100 des résidus. Les coûts de traitement devraient varier entre 146 et 175 US \$/verge cube (Averett *et al.*, 1990).

Tableau 4.17 Technologies chimiques démontrées pour la dépollution de sédiments

TECHNOLOGIE	PROMOTEUR (*)	LIEU DE DÉMONSTR.		ÉCHELLE DE DÉMONSTRATION	TYPE DE CONTAMINATION	RÉFÉRENCE
		PAYS	SITE			
Déchloration . Procédé EcoLogic	EcoLogic	Canada	Ports de Hamilton et Thunder Bay, Ontario	Laboratoire et pilote Banc d'essai	BPC, HAP, métaux lourds BPC, HAP, métaux lourds	WTC (1992b)
Déchloration . Système KPEG	Galson Research Corporation	É.-U.	Port de New Bedford, Mass.	Banc d'essai	BPC	USEPA (1991b)

* Pour les adresses et numéros de téléphone des promoteurs, consulter l' Annexe C

ELI EcoLogic International Inc., de Rockwood en Ontario, a développé le procédé EcoLogic de déchloration en utilisant de l'hydrogène à haute température.

Partant du principe qu'à des températures élevées (850 °C et plus), l'hydrogène gazeux réagit avec les molécules organiques pour former des molécules plus petites, plus légères et moins toxiques, la compagnie ELI EcoLogic a mis au point en 1986 un incinérateur non conventionnel de déchets aqueux.

L'eau qui peut être utilisée comme agent réducteur et comme source d'hydrogène, favorise la réaction. Comme l'hydrogène produit une atmosphère évitant la présence d'oxygène libre, le procédé EcoLogic élimine le risque de formation de dioxines ou de furannes. De plus, l'utilisation de l'hydrogène comme agent réducteur actif produit un gaz de faible poids moléculaire sans former d'hydrocarbures lourds associés habituellement aux procédés pyrolytiques.

La figure 4.33 illustre le schéma de principe du procédé EcoLogic.

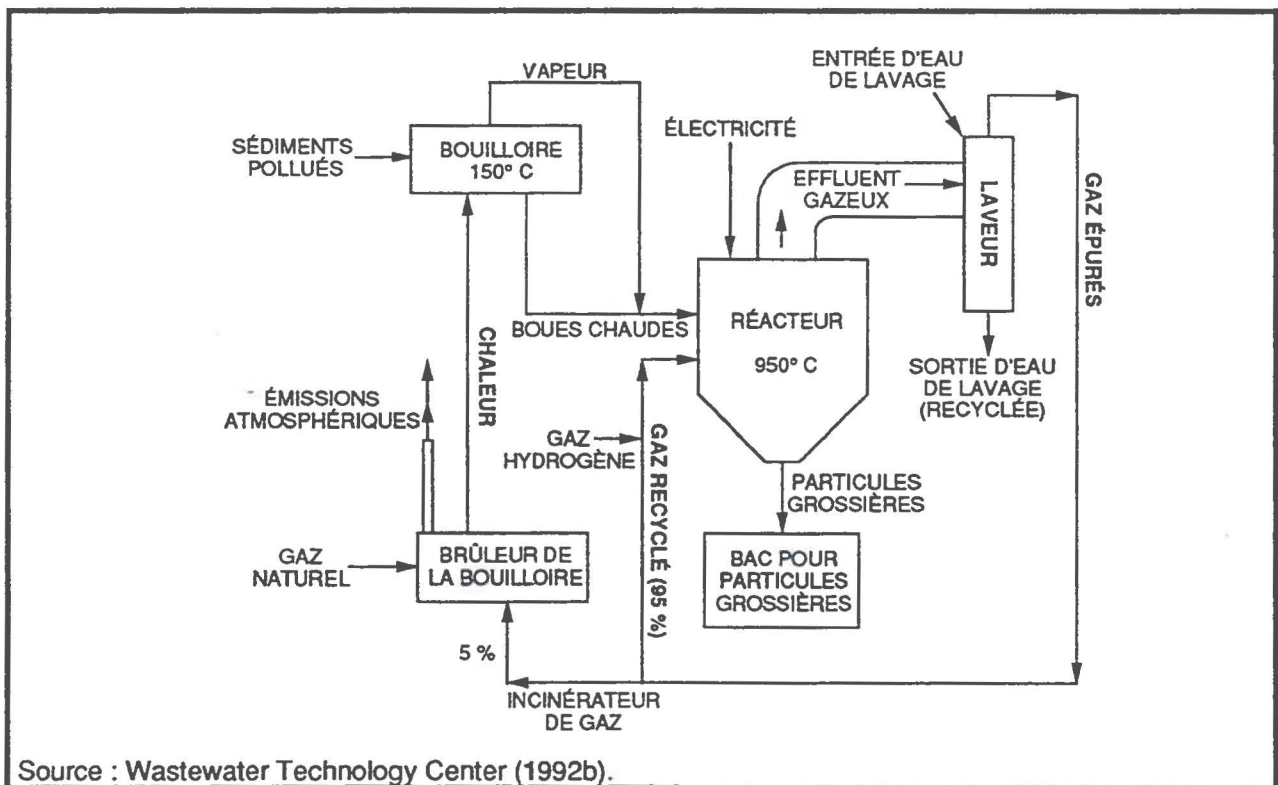


Figure 4.33 Schéma de principe du procédé EcoLogic

Les déchets sont d'abord préchauffés à 150 °C en utilisant la vapeur avant d'être injectés autour des tubes de céramique du réacteur afin que les composés organiques volatils (COV) se volatilisent. Les particules lourdes tombent dans le bas du réacteur et les parties fines sont entraînées dans l'effluent gazeux. Les gaz sont recirculés à 97 p. 100 et 3 p. 100 sont redirigés comme apport calorifique à la bouilloire utilisée pour préchauffer les matrices à traiter. Les gaz passent à travers un laveur pour enlever les chlorures d'hydrogène et les particules fines. Les résidus du procédé sont des matériaux grossiers, les boues de chlorures de calcium du laveur et les boues des eaux condensées (Cambell et Hallet, 1992; Wastewater Technology Centre, 1992b).

Plus d'une centaine de tests réalisés depuis deux ans ont démontré des efficacités de destruction de 99,9999 p. 100 ou plus. Cette technologie peut traiter une gamme variée de matrices contaminées: sols, sédiments, liquides, gaz, effluents industriels, eaux de lixiviation des décharges contrôlées, boues des étangs d'aération, déchets contaminés par des BPC, déchets d'usines de pâtes et papier, de solvants chlorés, huiles contaminées et déchets d'usines de préservation du bois, d'usines de peinture, d'industries du nettoyage à sec, d'usines de produits chimiques ou de produits plastiques.

Les contaminants pouvant être traités par le procédé EcoLogic incluent les composés chimiques halogénés ou non halogénés, volatils et non volatils: BPC, HAP, chlorophénols, pesticides et herbicides (organiques et organométalliques), solvants, benzène-toluène, éthylbenzène, xylène.

Les coûts de traitement anticipés varient entre 250 à 300 \$/t pour une unité commerciale de 100 t/d.

Une unité de démonstration pleine grandeur, d'une capacité de 5 à 7 t/d a été utilisée pour traiter 20 m³ de sédiments contaminés par des HAP (3 à 26 100 ppm) et des BPC (110 à 500 ppm) du Port de Hamilton. Tous les tests ont démontré une efficacité de destruction de 99,9999 p. 100; ce projet de démonstration, supervisé par le CTEU, a été financé par Environnement Canada via le Fonds d'assainissement des Grands Lacs et le ministère de l'Environnement de l'Ontario (WTC, 1992b).

Tableau 4.18 Technologies chimiques en démonstration pour la dépollution de sédiments des Grands Lacs

TECHNOLOGIE	PROMOTEUR(*)	LIEU DE DÉMONSTRATION		ÉCHELLE DE DÉMONSTRATION	TYPE DE CONTAMINATION	RÉFÉRENCE
		PAYS	SITE			
Déchloration · Procédé EcoLogic	EcoLogic	É.-U.	Port Sheboygan	Banc d'essai	BPC	USEPA (1992a)
Déchloration chimique · Système KPEG	Galson Research Corporation	É.-U.	Rivières : Asthabula Grand Calumet Port Sheboygan	Banc d'essai	BPC	USEPA (1992a)

* Pour les adresses et les numéros de téléphone des promoteurs, consulter l'Annexe C.

4.5.7 Technologies en démonstration pour le traitement des sédiments.- En raison des applications limitées jusqu'à présent des technologies chimiques, de leur complexité et des coûts d'utilisation anticipés, des 8 procédés chimiques considérés pour l'assainissement des sédiments contaminés des Grands Lacs, seules les technologies chimique et thermique de substitution nucléophile (déchloration) furent retenues pour des projets de démonstration (tableau 4.18).

Cependant, tel qu'indiqué au tableau 4.16, les technologies d'oxydation des substances organiques par chélateurs ont été considérées comme des solutions alternatives pour des projets de démonstration dans le futur.

4.5.8 Technologies retenues pour des projets de dépollution des sédiments.

- En 1992, les technologies chimiques de déchloration ont été retenues seulement pour la dépollution des sédiments d'un site du New Jersey dont le sol et les sédiments étaient contaminés par des COVSV (hexachlorobenzène), du DDT, des dioxines, du TCDD, du DDD et du DDE. Ce projet est encore au stade de la conception (USEPA, 1991c).

4.5.9 Conclusions. - Les sections précédentes ont montré que si les technologies chimiques étaient largement utilisées dans l'industrie, peu d'entre elles ont été appliquées et démontrées pour le traitement des composés organiques et des métaux lourds dans les sédiments.

En 1992, seules les technologies par déchloration et le procédé EcoLogic développé par une compagnie canadienne, avaient démontré leur efficacité en banc d'essai et à l'échelle pilote pour le traitement des sédiments contaminés par des composés organiques. Pour le moment, aux États-Unis, une technologie de déchloration n' a été utilisée qu'à un seul site présentant une contamination importante par plusieurs composés organiques.

Du fait que la plupart de ces technologies ont été développées par l'industrie chimique pour traiter un nombre limité de composés chimiques présents

majoritairement dans l'eau, l'identification de la réaction chimique apte à traiter un contaminant spécifique est souvent difficile pour les sédiments contaminés. Ainsi, à titre d'exemple, il arrive fréquemment qu'une réaction destinée à traiter un contaminant donné fasse augmenter la mobilité d'autres contaminants.

L'application sur une grande échelle des technologies chimiques pour la dépollution des sédiments contaminés pourrait être longue et difficile considérant que les technologies de manutention des matériaux et de contrôle qu'elles requièrent n'ont pas encore été complètement démontrées. Les coûts de ces procédés ne sont pas très bien documentés et donc difficiles à évaluer. Ils devraient néanmoins être supérieurs à 100 US \$/verge cube.

4.6 Traitement thermique

Les technologies thermiques utilisent la chaleur pour détruire, encapsuler, désorber ou volatiliser les contaminants. Les procédés les plus communs sont l'incinération qui détruit les contaminants organiques par combustion (conditions aérobies) et la pyrolyse qui détruit les contaminants organiques en l'absence d'oxygène (conditions anaérobies). De nouvelles technologies qui visent à encapsuler les contaminants dans une masse vitrifiée ou qui utilisent la chaleur pour désorber les contaminants des sols, sans les détruire directement, font présentement l'objet de recherches intensives.

4.6.1 Principe de traitement. - Les technologies d'*incinération* consistent à brûler les déchets en présence d'oxygène. L'incinération volatilise et (ou) détruit les contaminants organiques présents dans les liquides, les boues, les boues liquides et les solides. Les métaux, les radionucléides et les composés volatils qui ne sont pas éliminés s'accumulent dans les cendres des sous-produits ou peuvent se retrouver dans les émissions. Dépendant des déchets traités, des systèmes antipollution pour les gaz peuvent être requis : quench, filtres à manches, absorbeurs de gaz, dévésiculeurs, etc. (CH2M Hill Engineering Ltd., 1992).

Les *procédés thermiques à haute température* incluent habituellement l'incinération, la pyrolyse, la vitrification et tout autre procédé qui requiert le chauffage des sols ou des sédiments à plusieurs centaines ou milliers de degrés. Les boues et les sédiments doivent être préalablement déshydratés. Ces procédés sont généralement les plus efficaces pour détruire les contaminants organiques mais sont aussi les plus dispendieux. De plus, ils sont fort mal perçus par la population.

Les *procédés thermiques à basse température* incluent la désorption et l'extraction thermique à basse température, les procédés de désorption-pyrolyse du type AOSTRA-Taciuk et d'oxydation à l'air humide.

Les technologies de *vitrification* font fondre les déchets à très hautes températures pour encapsuler les contaminants organiques dans des scories vitrifiées tandis que les composés organiques sont détruits par les hautes températures utilisées

dans ces procédés. La *désorption* ne détruit pas les contaminants mais les volatilise ou les concentre sous une autre forme (liquide ou gazeuse) pour un traitement subséquent (CH2M Hill Engineering Ltd., 1992).

4.6.2 Technologies disponibles

4.6.2.1 Incinération. - Les technologies d'incinération utilisent des températures entre 871 et 1204 °C pour volatiliser et brûler en présence d'oxygène les contaminants organiques et permettent habituellement des rendements supérieurs à 99,99 p. 100.

La figure 4.34 illustre les intrants et les extrants des procédés d'incinération.

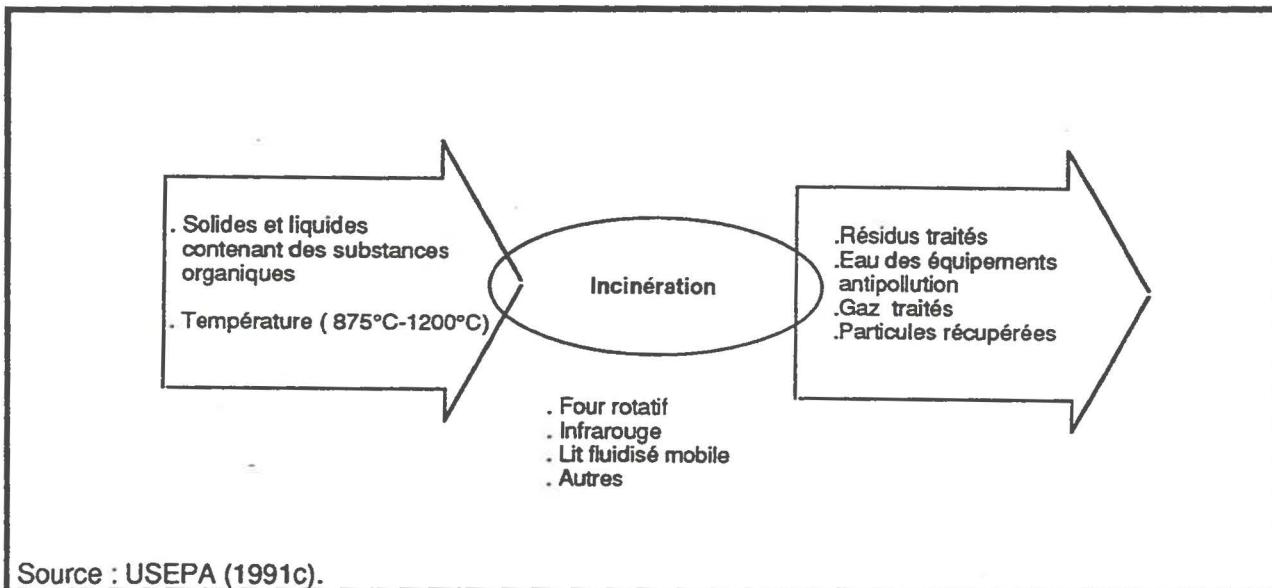


Figure 4.34 Intrants et extrants des procédés d'incinération

Tel que montré à la figure 4.34, il existe plusieurs types d'incinérateurs sur le marché pour la destruction des déchets organiques dangereux : fours rotatifs, sur lit

fluidisé ou mobile, à radiation infrarouge, procédés industriels, à injection de liquides et incinérateurs de pointe.

Il existe également des unités d'incinération mobiles et transportables d'incinération qui ont démontré leur efficacité pour traiter des sols, des sédiments, des boues et des liquides contenant principalement des contaminants organiques tels les halogénés volatils et semi-volatils, les BPC, les pesticides, les dioxines/furannes, les cyanures organiques et les substances organiques corrosives (USEPA, 1991c).

La figure 4.35 présente le schéma de principe d'une unité mobile d'incinération.

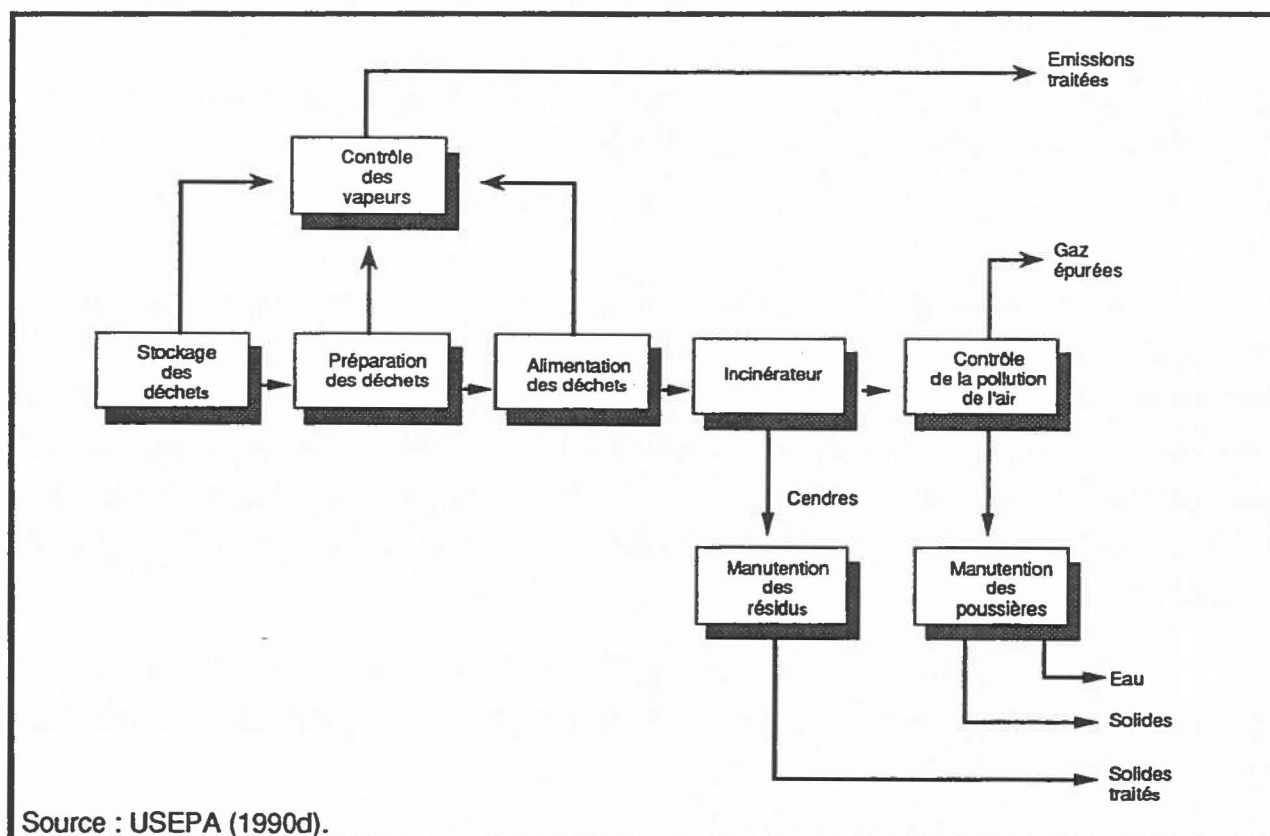


Figure 4.35 Schéma de principe d'une unité mobile d'incinération

Les principales composantes d'une unité d'incinération sont généralement :

- la préparation des déchets : classification, tamisage, mélange, etc.;
- l'alimentation : convoyeur à courroie, à vis, etc.;
- l'incinérateur : fours rotatifs, à lit fluidisé/mobile ou à infrarouge;
- le contrôle de la pollution de l'air : chambre de post-combustion, séparation cyclonique, filtres à manches, électrofiltres, tours à garnissage, etc.;
- la manutention des résidus : élimination ou immobilisation des cendres, élimination ou traitement des déchets liquides et des résidus d'épuration de l'air.

Les paragraphes suivants présentent sommairement les divers types d'incinérateurs disponibles actuellement sur le marché.

Fours rotatifs. - Dans les fours rotatifs, les contaminants sont évaporés à des températures variant entre 200 °C et 700 °C par chaleur directe ou indirecte. Les vapeurs sont incinérées dans un brûleur post-combustion à des températures variant entre 750 °C et 1300 °C. Toutes les usines hollandaises qui font de la dépollution de sols contaminés par destruction thermique sont basées sur ce principe (Annokkee, 1989). C'est également une technologie bien éprouvée en Suède, en Allemagne et également en Amérique du Nord.

Aux États-Unis, les principaux vendeurs de ce type d'incinérateurs sont : Weston Services Inc., Ensco, IT Corporation, Haztox, Vesta, OH Materials, et Von Roll Inc. (Intera Kenting, 1990).

La figure 4.36 présente une vue en coupe d'un incinérateur à four rotatif.

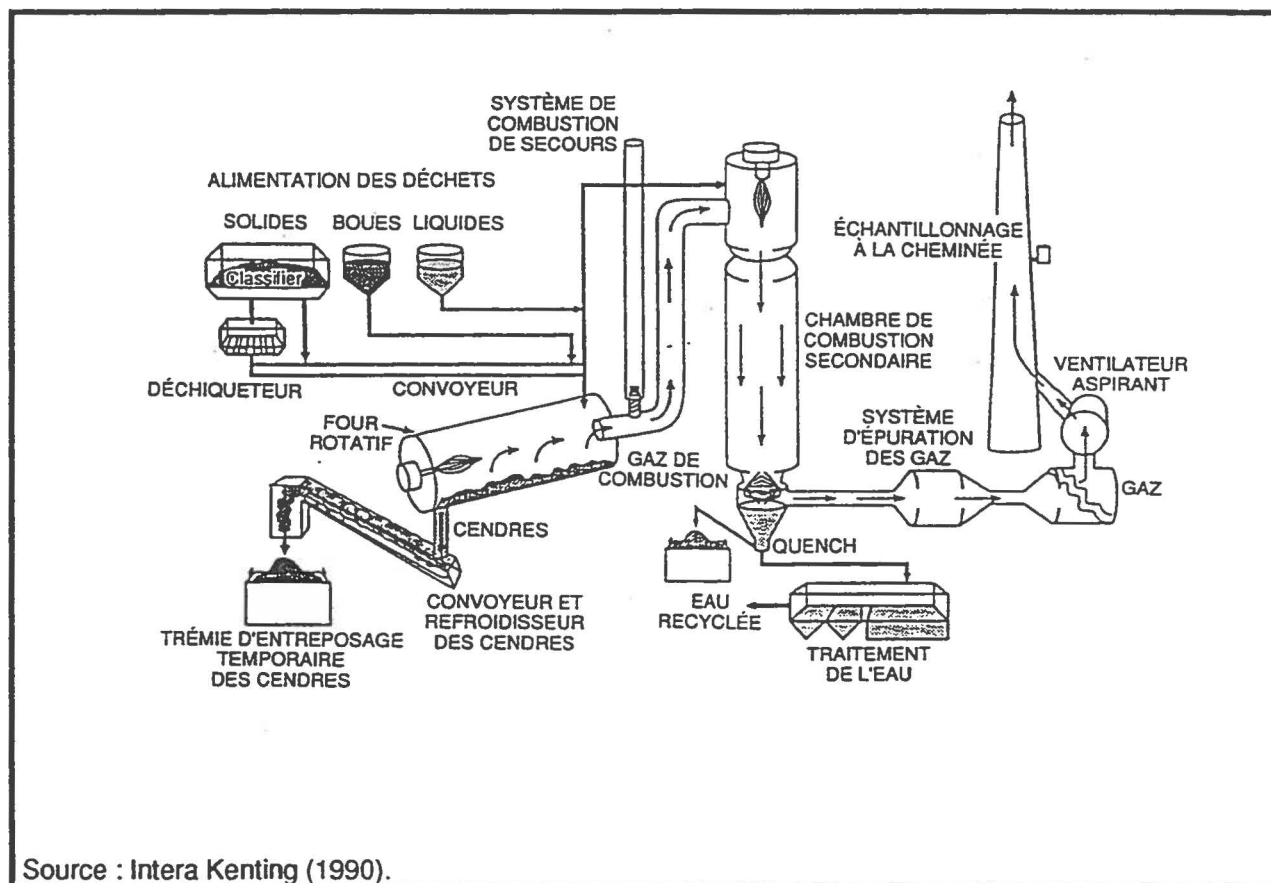


Figure 4.36 *Vue en coupe d'un incinérateur à four rotatif*

Incinérateur sur lit fluidisé/mobile. - L'incinération sur lit fluidisé développée aux États-Unis notamment par Waste-Tech Inc. et Combustion Engineering permet de traiter les solides halogénés ou non halogénés, les boues et les liquides dans une atmosphère contrôlée avec excès d'oxygène (Petitpas, 1990).

Ce procédé utilise un lit de matériaux inertes (souvent du sable) sur lequel sont déposés les déchets afin d'améliorer le transfert d'énergie aux déchets à incinérer. L'air de combustion est introduit à la base du lit dans un courant ascendant. La chaleur de combustion est fournie par apport minimal d'un combustible d'appoint et par la chaleur dégagée par la combustion. La chambre de combustion secondaire permet un temps de séjour de deux secondes pour obtenir une combustion complète des contaminants. Un système de dépollution permet d'épurer efficacement les émissions

gazeuses avant leur rejet à l'atmosphère. Une variante de cette technologie, commercialisée par la compagnie Odgen Environmental Services, utilise un four à lit mobile.

La figure 4.37 présente une vue en coupe d'un incinérateur à lit mobile.

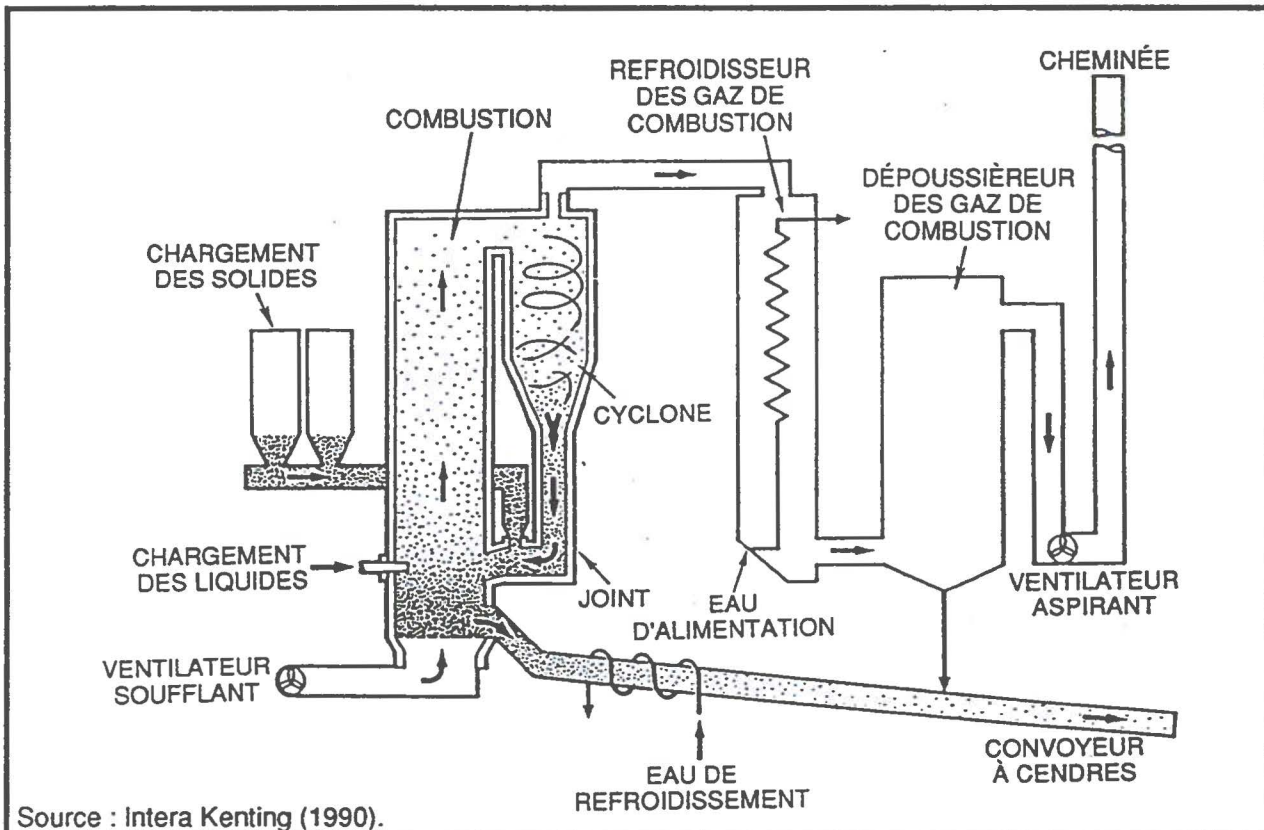


Figure 4.37 *Vue en coupe d'un incinérateur à lit mobile*

Ce procédé utilise de l'air à grande vitesse pour créer une zone de combustion avec une grande turbulence pour obtenir une meilleure efficacité de destruction. La forte turbulence et le temps de séjour relativement long dans ce type de four permettent l'incinération des composés organiques à des températures plus basses que dans les fours rotatifs (800 à 850 °C). L'incinération à basse température permet de réduire le taux d'émissions d'oxydes d'azote (NOx) et évite l'agglomération des cendres. L'ajout de chaux solide à l'alimentation permet d'éliminer les gaz acides

dans la chambre de combustion évitant ainsi la nécessité de neutraliser les émissions gazeuses.

Incinération par radiations infrarouges. - La technologie d'incinération par radiations infrarouges a été conçue pour le traitement des solides et des sols contaminés. La figure 4.38 présente une vue en coupe d'un incinérateur à radiations infrarouges.

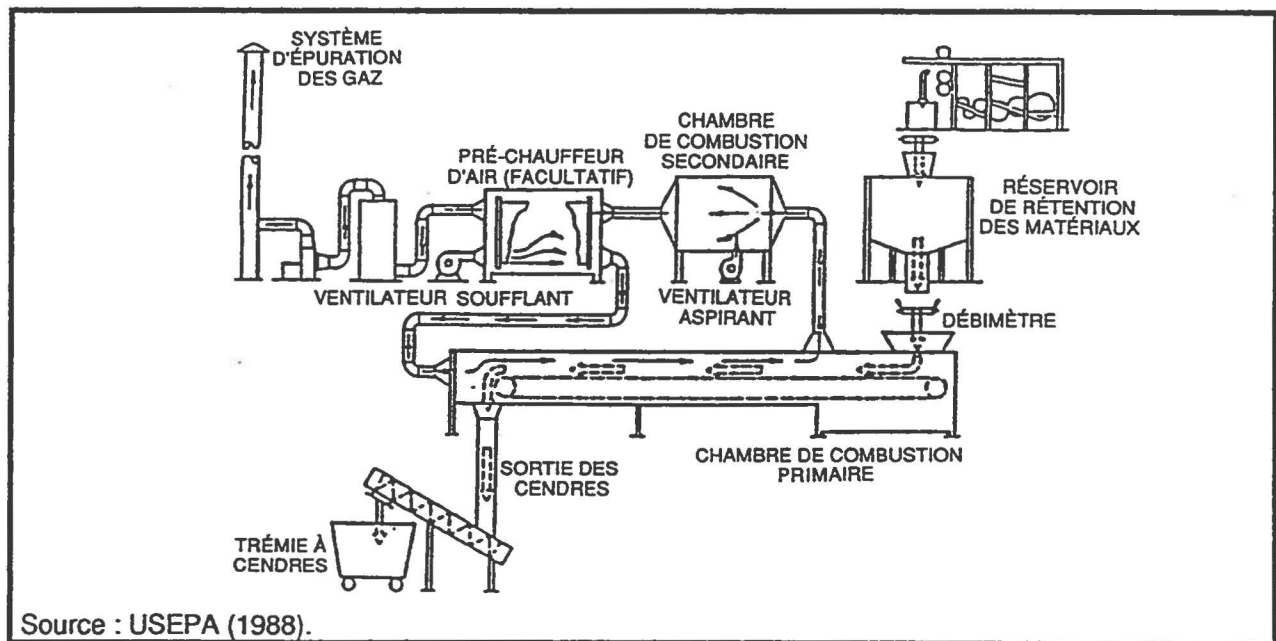


Figure 4.38 *Vue en coupe d'un incinérateur à radiations infrarouges*

L'unité d'incinération comprend un système d'alimentation, une chambre de combustion primaire chauffée par un rayonnement infrarouge (1000 °C), une chambre de combustion secondaire (1260 °C) chauffée au propane et un système d'épuration des gaz. Le procédé permet d'atteindre l'efficacité de destruction requise pour les BPC, soit de 99,9999 p. 100 (Intera Kenting, 1990).

Le procédé SHIRCO est commercialisé par différentes compagnies dont OH Materials Inc., Haztec Inc. et Riedel Environmental Technologies Inc. Les déchets

contaminés par les BPC à la base canadienne de Goose Bay ont été traités avec succès par OH Materials avec ce type d'incinérateur.

Incinérateur à injection de liquide. - Les incinérateurs à injection de liquide ne peuvent être utilisés pour la dépollution des sols.

Procédés industriels. - Certains procédés d'incinération utilisés dans l'industrie pour détruire les déchets dangereux par exemple les incinérateurs à plateaux, les fours à ciment ou à la chaux et les chaudières industrielles présentent des applications limitées pour la dépollution des sols du fait qu'il s'agit d'installations fixes, qui ne sont en général pas conçues pour manipuler et traiter ce type de déchets.

Incinérateur de pointe. - La compagnie américaine American Combustion Technologies Inc. a développé le système Pyretron Oxygen Burner, un brûleur oxygène-air-essence utilisant un système de pointe d'injection et de mélange d'essence pour brûler des déchets solides et les boues (CH2M Hill Engineering Ltd., 1992).

4.6.2.2 Pyrolyse. - La pyrolyse est un procédé thermique de décomposition chimique des composés organiques dans un environnement privé d'oxygène. Comme il n'est pas possible en pratique d'obtenir totalement une atmosphère libre d'oxygène, une certaine oxydation peut survenir. Si des composés volatils ou semi-volatils sont présents, une désorption thermique se produit (USEPA, 1992d).

La figure 4.39 présente les intrants et extrants de la pyrolyse.

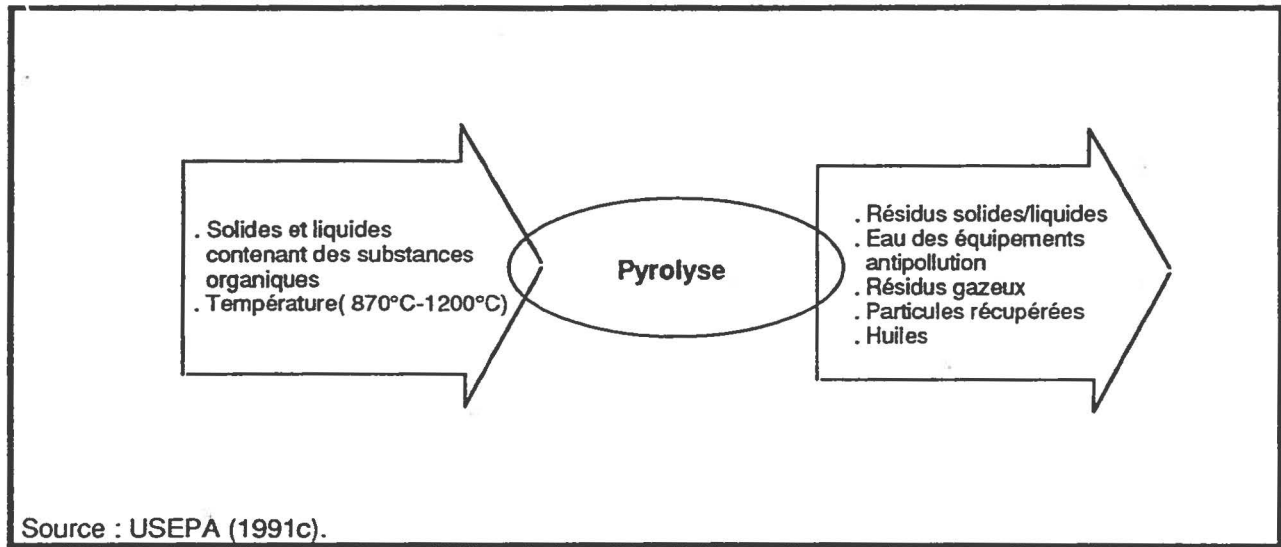


Figure 4.39 Intrants et extrants des procédés de pyrolyse

La pyrolyse des substances organiques entraîne la formation de gaz de combustion tels le CO_2 , l'hydrogène, le méthane et autres hydrocarbures de faible poids moléculaire et d'un résidu solide (coke) contenant du charbon fixé et des cendres. Une fois refroidis, les gaz se condensent et forment un résidu de goudron/huile. La température dans la chambre de combustion primaire varie entre 500 et 750 °C alors que celle de la chambre de combustion secondaire est réglée à 1200 °C (Petitpas, 1990).

La figure 4.40 illustre le schéma de principe du procédé de pyrolyse.

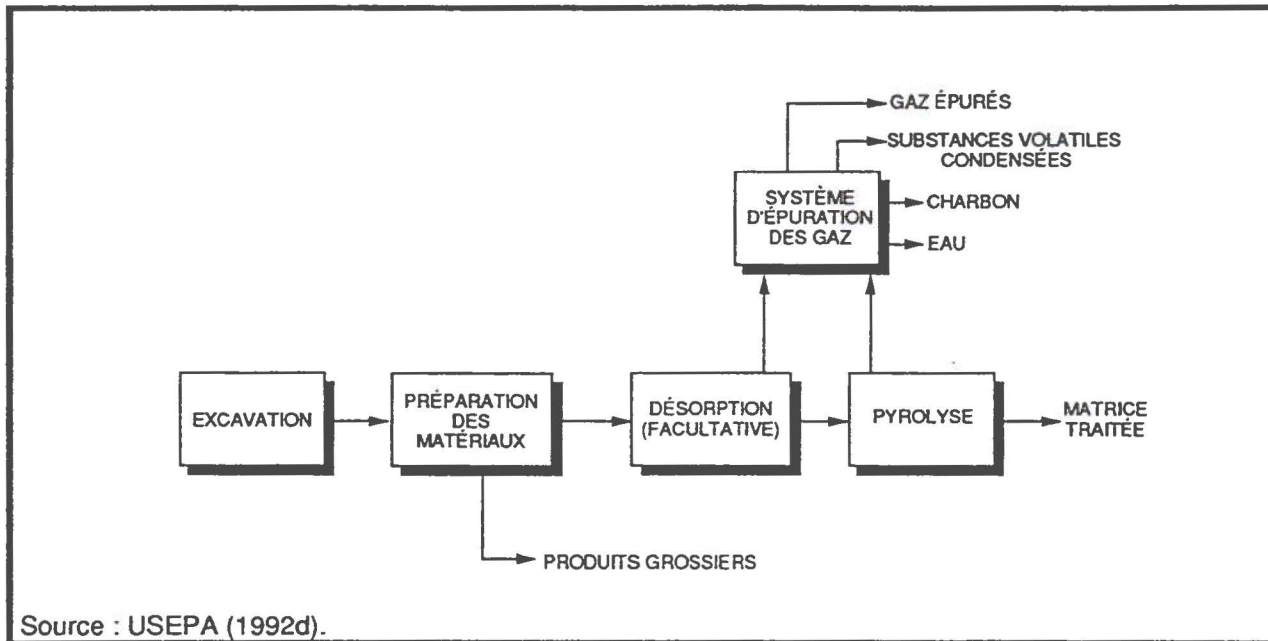


Figure 4.40 Schéma de principe du procédé de pyrolyse

Comme pour beaucoup de procédés de traitement, le matériel à traiter doit faire l'objet d'un tamisage pour éliminer les branches, les roches, etc. Les systèmes de pyrolyse incluent habituellement une étape de désorption avant la pyrolyse. Comme la pyrolyse transforme les composés organiques en coke et en composés volatils, les gaz doivent être traités par condensation ou autres systèmes d'épuration ou par incinération avec épuration subséquente des gaz (USEPA, 1992d).

Les déchets liquides des systèmes d'épuration des gaz pouvant contenir certains métaux et composés organiques, ils doivent être traités par un ou plusieurs des procédés suivants : neutralisation, précipitation chimique, sédimentation ou filtration.

De même, les cendres et les sols/solides traités peuvent contenir des métaux lourds qui doivent faire l'objet d'un traitement par stabilisation/solidification si les normes de lixiviation ne sont pas rencontrées.

Deux compagnies américaines opèrent des unités de pyrolyse : TDI Thermal Dynamics (système de distillation thermique HT-V) et Soil Tech Inc. (procédé canadien ATP, connu sous le nom d'AOSTRA-Taciuk).

4.6.2.3 Vitriification. - Les technologies de vitriification s'appliquent aux déchets contenant principalement des métaux et aux matériaux avec teneur élevée en silicates. Ces technologies utilisent habituellement la chaleur obtenue avec de l'énergie électrique pour fondre les sols et les boues contaminés dans une forme d'une matrice stable et de structure cristalline non facilement lixiviable. Les déchets sont chauffés à des températures variant entre 1600 °C et 2000 °C soit à des températures bien au-dessus du point de fusion des sols (USEPA, 1992b).

La figure 4.41 présente les intrants et les extrants des procédés de vitriification.

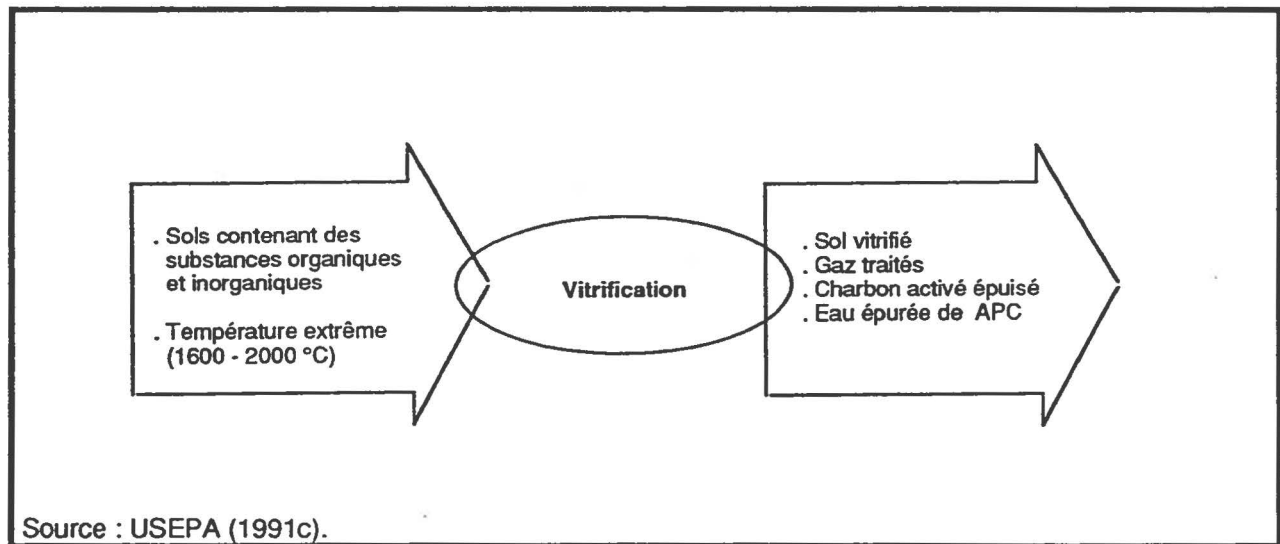


Figure 4.41 Intrants et extrants des procédés de vitriification

Dans ce procédé, les substances organiques sont détruites à haute température et les métaux sont encapsulés dans une structure de verre composée de silicates fondus. Certains procédés de vitriification transforment les déchets en un matériau de structure semblable à la céramique par divers moyens :

a) four à scories à haute température (1200 °);

- b) réacteur à plasma (10 000 à 20 000 °C);
- c) réacteur à flamme (2000 °C);
- d) réacteur électrique (2200 °C);
- e) combustion cyclonique.

La technologie avec four à scories à haute température est éprouvée. Les options *b)* et *c)* sont au stade de projet de démonstration. Quant aux options *d)* et *e)*, elles sont en voie de développement (CHM2 Hill Engineering Ltd., 1992).

Certaines technologies de vitrification prévoient des systèmes d'épuration des gaz qui liquéfient et récupèrent les composés volatilés soit par adsorption sur du charbon activé, soit par des procédés catalytiques sans flamme à basse température, ou encore par incinération des composés organiques. Avec ces équipements de traitement, les technologies de vitrification peuvent traiter les déchets contenant à la fois des métaux et des composés organiques.

4.6.2.4 Sels fondus. - La technologie d'incinération dans des sels fondus consiste à mélanger les déchets à traiter avec de l'air avant d'être déposés sur un lit de sels fondus (carbonate de sodium), maintenu à des températures entre 800 et 1 000 °C. Les hydrocarbures sont oxydés en CO₂ et en eau pendant que le phosphore, le soufre et l'arsenic et les substances halogénés réagissent avec le carbonate de sodium pour former d'autres sels. Ce procédé est encore au stade expérimental (CH2M Hill, Engineering Ltd., 1992).

4.6.2.5 Désorption. - Les technologies de désorption utilisent la chaleur dans un environnement contrôlé pour provoquer la volatilisation des composés organiques présents dans les matrices contaminées. Dans certains cas, des gaz inertes sont utilisés pour transporter les substances organiques désorbées.

La figure 4.42 identifie les intrants et les extrants des procédés de désorption thermique.

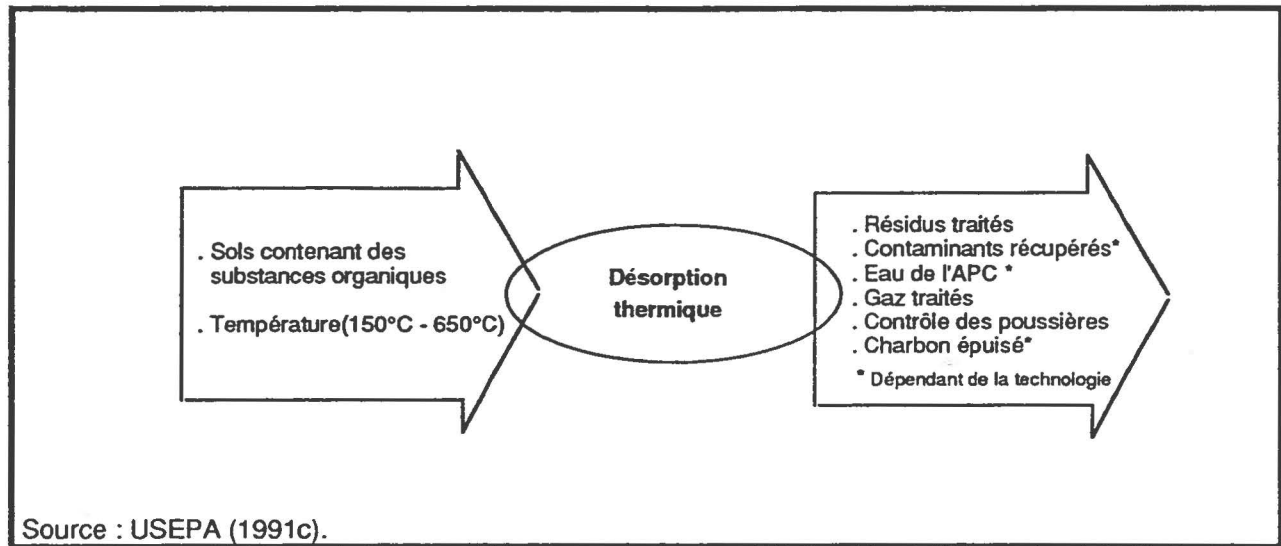


Figure 4.42 Intrants et extrants des procédés de désorption

Les procédés de désorption sont planifiés et conçus pour éviter la combustion (absence d'oxygène) dans l'unité principale. Ces technologies diffèrent également de l'incinération en raison des températures inférieures (entre 150 °C et 650 °C). Des températures plus élevées peuvent être utilisées en l'absence d'oxygène dans la chambre de désorption. Les composés volatilisés nécessitent un traitement additionnel par des systèmes qui liquifient et qui récupèrent les substances volatiles, adsorbent les gaz avec du charbon activé, par destruction catalytique ou par un procédé de combustion à flamme contrôlée. Les poussières et les particules peuvent être contrôlées par des cyclones, des filtres à manches ou des épurateurs à venturi. Des vapeurs acides peuvent également nécessiter un traitement (USEPA, 1991c).

La figure 4.43 illustre le schéma de principe des procédés de désorption thermique.

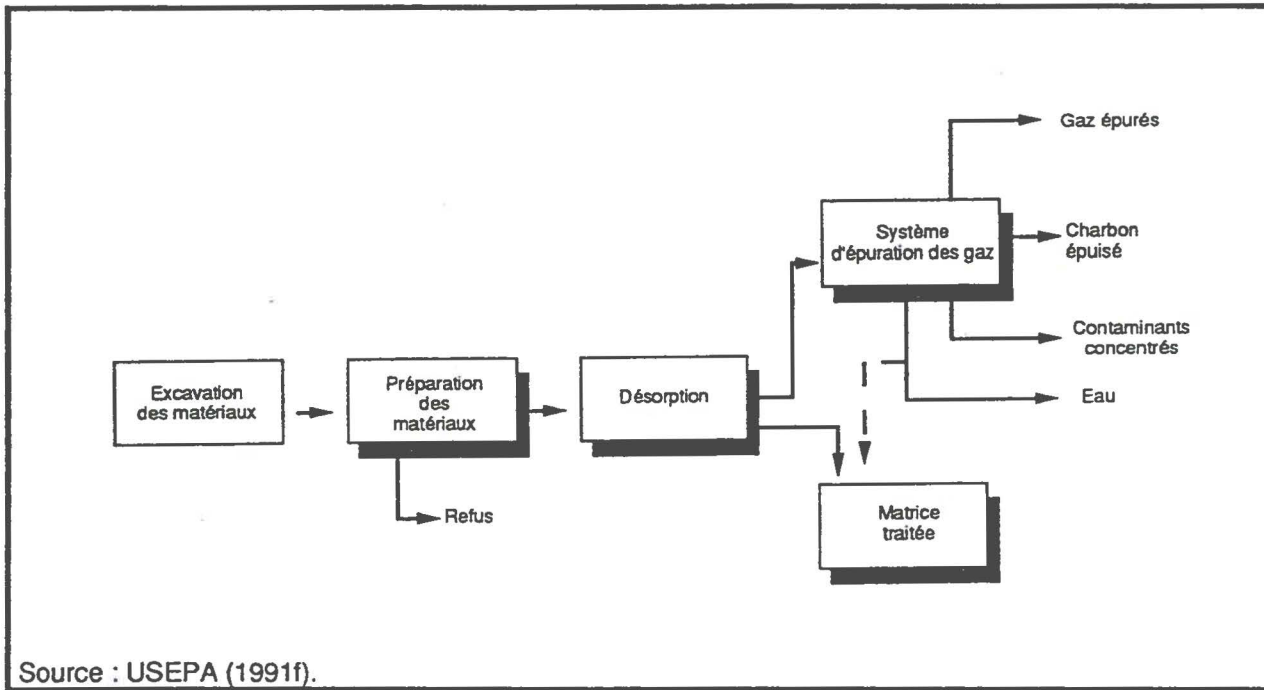


Figure 4.43 Schéma de principe des procédés de désorption thermique

Selon l'USEPA, les technologies de désorption peuvent être regroupées selon trois procédés :

- désorption par chaleur directe;
- désorption par chaleur indirecte;
- extraction à la vapeur sur place.

Désorption par chaleur directe. - Les technologies de désorption par chaleur directe utilisent un brûleur auxiliaire qui peut être à l'intérieur ou à l'extérieur de la première chambre de chauffage. Les unités à chaleur interne ressemblent à des fours rotatifs; l'air chauffé passe à contre-courant à travers les sols. Les unités opèrent à des températures inférieures à 426 °C; leur utilisation a été surtout limitée au traitement des substances organiques non chlorées. Les compagnies américaines OH

Materials Inc. et Canonie Environmental opèrent des procédés de désorption par chaleur directe (USEPA, 1991c).

Désorption par chaleur indirecte. - Dans ces procédés, la chaleur de la surface du métal des fours est transférée aux déchets. Ces procédés opèrent habituellement à des températures d'environ 315 °C et produisent forcément moins de particules en suspension et de gaz qui doivent être ensuite traités. Les contaminants vaporisés sont extraits du réacteur en utilisant un gaz d'entraînement pauvre en oxygène pour prévenir une oxydation (combustion et explosion). Les substances organiques désorbées sont condensées et (ou) enlevées par adsorption sur du charbon activé (USEPA, 1991c).

Weston Services Inc. et l'U. S. Army Toxic and Hazardous Materials Agency (USATHAMA) ont des unités de désorption par chaleur indirecte opérant à des températures d'environ 232 °C. Les compagnies Chemical Waste Management's (système X*TRAX) et Soiltech's (procédé AOSTRA-Taciuk) utilisent pour leur part des températures plus élevées (supérieures à 315 °C).

Extraction in situ à la vapeur. - Avec ces procédés, de l'air chaud et de la vapeur sont injectés dans le sol par des puits de forage. Les substances organiques volatiles sont extraites des sols ou des eaux souterraines et sont captées en surface pour traitement.

4.6.2.6 Oxydation à air humide. - Les technologies d'oxydation à air humide sont des procédés qui réalisent une oxydation en phase aqueuse des substances organiques ou inorganiques à des températures allant de 175 à 320 °C et des pressions de 300 psig et plus. Ce procédé est développé depuis une trentaine d'années déjà et a été utilisé avec succès pour traiter les boues des usines d'épuration des eaux municipales.

Des essais ont été réalisés à des températures excédant le point critique de l'eau pour limiter la quantité d'eau évaporée. De l'air comprimé ou de l'oxygène pur peuvent être une source d'oxygène qui sert alors d'oxydant dans les procédés d'oxydation à air humide. Ces procédés ne devraient convenir que pour les résidus solides et liquides.

4.6.3 Domaines d'application. - Tel qu'indiqué au tableau 4.19, les technologies thermiques à haute température (incinération et vitrification) et à basses températures (désorption) présentent des efficacités démontrées ou anticipées pour la plupart des contaminants organiques et la plupart des matrices (sols, boues et sédiments).

Pour ce qui est des contaminants inorganiques, les procédés de désorption thermique peuvent extraire uniquement les métaux volatils. En revanche, la vitrification convient pour la majorité des contaminants inorganiques, mais pas les métaux volatils. À l'exception des cyanures inorganiques, l'incinération ne permet pas le traitement des contaminants inorganiques.

Pour les contaminants réactifs, seules les technologies d'incinération et de vitrification présentent des efficacités démontrées de marginales à moyennes ou potentielles.

Tel qu'indiqué au tableau 4.19, la pyrolyse est applicable à une gamme de contaminants organiques présents dans les sols, les sédiments et les boues huileuses. Des données de performance sont disponibles pour les BPC, les dioxines, les HAP et bien d'autres composés organiques. La pyrolyse n'est toutefois pas conçue pour détruire ou séparer physiquement les composés inorganiques. Certains métaux volatils peuvent se désorber en raison des hautes températures du procédé mais ils ne sont pas détruits (USEPA, 1992d).

TABLEAU 4.19 Efficacité des technologies de traitement thermique par groupe de contaminants et par type de déchets

GROUPE DE CONTAMINANTS	INCINÉRATION			PYROLYSE		VITRIFICATION		DÉSORPTION THERMIQUE				OXYDATION À
	Sols/ Sédiments	Boues	Liquides	Sols	Sédiments/ Boues	Sols / Boues	Sols	Boues	Sédiments	Filtres gâteaux	AIR HUMIDE Boues	
ORGANIQUES												
Volatils halogénés	2	2	2	1	1	1	2	1	1	2	1	
Semi-volatils halogénés	2	2	2	1	1	1	2	1	1	2	1	
Volatils non halogénés	2	2	2	1	2	1	2	1	1	2	1	
Semi-volatils non halogénés	2	2	2	2	2	1	2	1	1	2	1	
BPC	2	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	
Pesticides (halogénés)	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1	1	
Dioxines/Furannes	2	2	2	1	2	1	2	1	1	1	1	
Cyanures organiques	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Substances organiques corrosives	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	
INORGANIQUES												
Métaux volatils	0	0	0	0	0	X	2	1	1	1	0	
Métaux non volatils	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Amiante	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	
Matériaux radioactifs	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Substances inorganiques corrosives	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
Cyanures inorganiques	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	
RÉACTIFS												
Oxydants	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	-	
Réducteurs	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	-	

Légende

2: Efficacité de bonne à excellente; forte probabilité que la technologie soit efficace.

1: Efficacité de marginale à moyenne ou potentielle; des précautions doivent être prises dans le choix des technologies et les experts sont d'avis que cette technologie fonctionnera.

0: Efficacité nulle; les experts sont d'avis que la technologie ne pourra traiter ce type de déchets et de contaminants.

X: Effets néfastes potentiels.

Source : USEPA (1988,1990d, 1991c, 1991d, 1992d).

4.6.4 Avantages, limites et applications démontrées de chaque technologie. - Le tableau 4.20 présente les principaux avantages, désavantages et les applications/démonstrations de 13 technologies chimiques thermiques conventionnelles pour le traitement de matrices contaminées.

Tel qu'indiqué sur ce tableau, les technologies d'incinération permettent de traiter un gamme de composés organiques présents dans les solides, les boues et les déchets ou effluents liquides. Les procédés à four rotatif, à lit mobile et à infrarouge sont des technologies éprouvées à travers le monde. Cependant, ils impliquent des coûts de traitement relativement élevés et l'élimination des résidus de traitement est souvent problématique.

Aux États-Unis, un inventaire récent révélait l'existence de neuf vendeurs d'incinérateur à four rotatif, quatre à infrarouge et un à lit fluidisé. En 1990, 55 incinérateurs étaient approuvés pour l'incinération des déchets hors site et 55 pouvaient être utilisés directement sur le site. Cependant, il existait au début des années 90 une capacité limitée pour l'incinération des sols (USEPA, 1991c).

Au Canada, seules les provinces de l'Alberta (Swan Hills), de l'Ontario (Sarnia) et du Québec (Ville Mercier) disposaient en 1992 d'incinérateurs pour le traitement des déchets dangereux. Celui de Ville Mercier est un incinérateur à injection de liquides et ne peut donc traiter les sols. Au Nouveau-Brunswick, les sols contaminés par certains métaux sont acceptés dans deux fonderies (Brunswick et Belledune), tandis que les sols contaminés par des hydrocarbures peuvent être acheminés pour l'incinération à cinq sites approuvés (Fédéricton, Bathurst, Saint-Jean et deux à Moncton) (Crittenden, 1992).

Les incinérateurs à four rotatif, à infrarouge et à lit fluidisé ont démontré leur efficacité pour le traitement des sols.

Tableau 4.20 Avantages, désavantages et applications des technologies thermiques conventionnelles de traitement des sols contaminés

TECHNOLOGIES	AVANTAGES	DÉSAVANTAGES	APPLICATIONS / DÉMONSTRATIONS
Four rotatif	<ul style="list-style-type: none"> Technologie éprouvée pour les substances organiques. Unités mobiles et transportables disponibles Capacité de traiter une variété de matrices (sable, argile, solides et liquides) 	<ul style="list-style-type: none"> Coûts de traitement prohibitifs (235-1 176 \$/t). Cendres peuvent être un déchet dangereux. 	Technologies éprouvées: Hollande, Suède, Allemagne et Amérique du Nord.
Incinérateur à lits mobiles ou fluidisés	<ul style="list-style-type: none"> Ne requiert pas un brûleur post-combustion d'0 à la haute turbulence. Ne requiert pas une énergie d'appoint pour maintenir la combustion. 	<ul style="list-style-type: none"> Cendres peuvent être un déchet dangereux. Coûts de traitement prohibitifs (118-353 \$/t). Nécessite un pré-traitement des déchets. 	Technologies utilisées en Europe, à être démontrées en Amérique du Nord.
Incinérateur à infrarouge	<ul style="list-style-type: none"> Unités transportables disponibles. Convoyeur assure une alimentation en continu. Requiert peu d'énergie d'appoint. Émissions particulaires plus faibles que pour les autres types d'incinérateurs. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiert une alimentation électrique. Cendres peuvent être un déchet dangereux. Coûts de traitement élevés (425\$/t) Nécessite un pré-traitement des déchets. 	Technologies éprouvées: É.-U. Technologies utilisées dans plusieurs sites du Superfund
Procédés industriels: <ul style="list-style-type: none"> À plateaux Fours à ciment Fours à chaux Chaudières 	<ul style="list-style-type: none"> Technologies disponibles dans l'industrie. Certaines technologies sont utilisées pour incinérer les boues, les déchets domestiques et industriels. 	<ul style="list-style-type: none"> Équipement généralement non transportable. Déchets avec faible contenu calorifique et des fortes concentrations de métaux et de chlore sont généralement non souhaités. 	Technologies largement utilisées pour détruire les déchets municipaux et industriels. Technologies utilisent les déchets comme combustibles d'appoint.
Incinérateurs de pointe	<ul style="list-style-type: none"> Haut rendement et faible consommation de carburant. Haute efficacité d'enlèvement. Coûts de traitement faibles 	<ul style="list-style-type: none"> Émissions potentielles de NOX. Production de scories, due aux hautes températures. 	Système de brûleur d'oxygène Pyretron a été démontré sur un site du Superfund.
Pyrolyse	<ul style="list-style-type: none"> Chaleur de la chambre de combustion secondaire peut être récupérée. Système complètement fermé et les gaz de combustion sont brûlés dans un brûleur de post-combustion. 	<ul style="list-style-type: none"> Cendres résiduelles doivent être traitées pour enlever les non volatils avant d'être éliminées. Déchets contenant des métaux ou des sels ne sont pas détruits mais se retrouvent dans les cendres. 	Technologies démontrées pour les liquides, les boues et les sols contaminés avec des substances organiques volatiles.
Vitrification: <ul style="list-style-type: none"> Incinérateur à scories à haute température 	<ul style="list-style-type: none"> Immobilisation des substances organiques dans les scories. Bon rendement pour les déchets hautement toxiques et radioactifs. 	<ul style="list-style-type: none"> Nécessite un pré-traitement des déchets. Unité non transportable. Faible capacité du procédé (0,06 t/h). Coûts de traitement élevés. 	Technologies couramment utilisées au Japon et en Belgique pour traiter les déchets radioactifs.
Vitrification: <ul style="list-style-type: none"> réacteur à plasma 	<ul style="list-style-type: none"> Immobilisation des organiques dans les scories. Haute efficacité d'enlèvement. Utilisation possible pour les déchets liquides. 	<ul style="list-style-type: none"> Puissance électrique requise. Faible capacité du procédé. 	Technologie en démonstration pour le Superfund.
Vitrification: <ul style="list-style-type: none"> réacteur à flamme 	<ul style="list-style-type: none"> Haute capacité. Oxydes métalliques sont récupérés. 	<ul style="list-style-type: none"> Nécessite un pré-traitement des déchets. 	Technologie en démonstration pour le Superfund.
Vitrification: <ul style="list-style-type: none"> réacteur électrique 	<ul style="list-style-type: none"> Destruction des substances organiques. Immobilisation des inorganiques. 	<ul style="list-style-type: none"> Nécessite un pré-traitement des déchets. Coûts de capitalisation élevés. Très énergivore. 	Technologie démontrée à l'échelle pilote seulement.
Vitrification: <ul style="list-style-type: none"> combustion cyclonique 	<ul style="list-style-type: none"> Produits d'une combustion incomplète sont fixés dans les scories. 	<ul style="list-style-type: none"> Peu de renseignements disponibles sur la technologie. 	Technologie en développement pour le Superfund, essais pilotes à réaliser.
Vitrification sur place	<ul style="list-style-type: none"> Procédé sur place sans aucune excavation. Traitement jusqu'à des profondeurs de 5 m. Produit obtenu est chimiquement inerte et stable structurellement. 	<ul style="list-style-type: none"> Nécessite un traitement des gaz. Réduction possible des volumes (affaissement). Objets et débris métalliques interfèrent avec le passage du courant. 	Technologie démontrée à pleine échelle pour des déchets radioactifs. Essais pilotes en cours pour BPC, dioxines, déchets métalliques.

Source : Adapté de CH2M Hill Engineering Ltd (1991).

Les procédés industriels conventionnels (incinérateur à plateau, four à ciment, chaudière) sont des technologies disponibles et largement utilisées pour traiter une gamme variée de déchets. En raison des équipements requis, ces procédés peuvent être difficilement transportés sur le site. Les technologies d'incinération de pointe apparaissent pour le moment très prometteuses en vue de réduire les coûts liés au traitement thermique.

L'utilité de la pyrolyse a été démontrée pour le traitement des liquides, des boues et des sols contaminés par des composés organiques volatils. Elle est avantageuse parce que les réactions se passent dans des enceintes étanches et qu'elle permet la récupération de la chaleur. Cependant, les métaux et les sels ne sont pas détruits et se retrouvent dans les cendres.

La vitrification qui convertit les déchets en un matériau fondu qui se transforme après refroidissement en une scorie vitrifiée, présente l'avantage de détruire les substances organiques par des hautes températures de réaction ou dans des brûleurs post-combustion. Les substances inorganiques et les produits de combustion incomplète sont immobilisés dans la masse vitrifiée (CH2M Hill Engineering Ltd., 1992). Plusieurs procédés de vitrification requièrent cependant un pré-traitement des déchets, impliquent des coûts de traitement relativement élevés et peu d'entre eux ont fait l'objet de démonstration pour la dépollution de sols contaminés.

Le tableau 4.21 présente pour sa part les principaux avantages, désavantages, applications et démonstrations de huit technologies thermiques non conventionnelles à haute température (sels fondus, à la vapeur à hautes pression et température, pré-traitement avec des argiles) et les technologies à basse température (désorption, procédé AOSTRA-Taciuk, valorisation des résidus chlorés, grillage du mercure, chauffage à la fréquence radio et à la vapeur sur place)

Les trois premières sont avantageuses en raison de l'absence d'émissions atmosphériques problématiques comparativement aux incinérateurs conventionnels mais sont encore au stade du développement expérimental et les matrices et contaminants traités sont relativement limités.

Tableau 4.21 Avantages, désavantages et applications des technologies thermiques non conventionnelles de traitement des sols contaminés

TECHNOLOGIES	AVANTAGES	DÉSAVANTAGES	APPLICATIONS / DÉMONSTRATIONS
Sels fondus	<ul style="list-style-type: none"> Aucune production de gaz acides dû à la formation de sels. Technologie conçue pour les composés Inorganiques hautement toxiques ou composés halogénés. 	<ul style="list-style-type: none"> Corrosivité des sels fondus. Déchets à base de sels doivent être enfouis dans une décharge contrôlée. 	<ul style="list-style-type: none"> Procédé au stade expérimental.
Vapeur à hautes température et pression	<ul style="list-style-type: none"> Pas de production de dioxines et de furannes en raison de de l'absence d'oxygène dans le procédé. 	<ul style="list-style-type: none"> Coûts de traitement de 2 \$/kg. Traitement des déchets liquides seulement. Technologie seulement au stade pilote. 	<ul style="list-style-type: none"> Procédé au stade pilote. Essais pour les liquides contaminés par des BPC.
Technologie à basse température <ul style="list-style-type: none"> Désorption 	<ul style="list-style-type: none"> Faible besoin en énergie. Aucun produit de combustion. Contaminants peuvent être récupérés. 	<ul style="list-style-type: none"> Production d'autres déchets (filtres au charbon). Efficacité du procédé réduite en présence d'un haut taux d'humidité et de particules fines. Enlèvement des composés volatils seulement. 	<ul style="list-style-type: none"> Procédé au stade de démonstration.
Technologie à basse température <ul style="list-style-type: none"> Procédé AOSTRA-Tacluk 	<ul style="list-style-type: none"> Recyclage des huiles non contaminées. 	<ul style="list-style-type: none"> Déchets dangereux ne sont pas détruits 	<ul style="list-style-type: none"> Technologie démontrée pour récupérer les huiles des sables bitumineux. Technologie démontrée à l'échelle pilote pour les déchets dangereux. Technologie démontrée à l'échelle pilote pour les sols et sédiments pour le Superfund et l'assainissement des Grands Lacs.
Pré-traitement avec des argiles	<ul style="list-style-type: none"> Transformation des déchets en un produit utile. Vente du produit peut permettre de récupérer une partie des coûts du traitement. 	<ul style="list-style-type: none"> Production d'autres déchets 	<ul style="list-style-type: none"> Technologie démontrée en Allemagne pour le traitement des sédiments contaminés par des métaux lourds.
Technologie à basse température <ul style="list-style-type: none"> Valorisation des résidus chlorés 	<ul style="list-style-type: none"> Récupération de l'acide chlorhydrique. Refroidissement des gaz limite la corrosion et la maintenance. Traitement des solvants organiques chlorés dans les liquides, solides et gaz. 	<ul style="list-style-type: none"> Coûts de capitalisation pour une unité de 2 t/h sont de 5 millions \$. 	<ul style="list-style-type: none"> Technologies en opération en Europe depuis au moins 15 ans. Unités en opération: 1 aux É.-U. et 9 en Europe.
Technologie à basse température <ul style="list-style-type: none"> Grillage du mercure 	<ul style="list-style-type: none"> Récupération du mercure des sols. 	<ul style="list-style-type: none"> Résidus solides doivent être éliminés dans une décharge contrôlée. 	<ul style="list-style-type: none"> Usine commerciale en opération au Japon.
Chauffage à fréquence radio	<ul style="list-style-type: none"> Restauration sur place des sols contaminés par des substances organiques volatiles. 	<ul style="list-style-type: none"> Potentiellement dispendieux pour des applications à grand échelle. Traitement plus dispendieux pour des sols en-dessous de la nappe phréatique. 	<ul style="list-style-type: none"> Application démontrée à l'échelle laboratoire pour plusieurs types de sols. Application pour les sols argileux.
Chauffage à la vapeur sur place	<ul style="list-style-type: none"> Améliore l'enlèvement des substances volatiles et plus particulièrement les semi volatiles. Rythmes de traitement plus élevés si les procédés de volatilisation fonctionnent à la température ambiante. 	<ul style="list-style-type: none"> Nécessité d'une source de vapeur. Enlèvement moins efficace pour les zones de faible perméabilité à moins d'utiliser le système "Detoxifier". Séchage des sols, en augmentant la sorption peut empêcher l'enlèvement des substances volatiles. Condensation peut limiter aussi l'enlèvement. Système "Detoxifier", pas applicable au sol de sable grossier et est difficile à suivre. 	<ul style="list-style-type: none"> Application démontrée en laboratoire. Technologies disponibles de plusieurs vendeurs en Europe. Technologies en démonstration pour des projets du Superfund.

Source : Adapté de CH2M Hill Engineering Ltd (1991).

Le procédé AOSTRA-Taciuk qui a démontré son efficacité pour extraire les hydrocarbures des sables bitumineux de l'ouest canadien a fait l'objet d'essais concluants aux États-Unis et au Canada pour la dépollution des sols contaminés et le traitement des déchets dangereux.

La technologie de pré-traitement avec de l'argile est une technologie thermique démontrée en Allemagne pour le traitement des sédiments contaminés par des métaux lourds. Cette technologie, décrite à la section 4.6.6, permet la réutilisation des sédiments traités, ce qui se traduit par une réduction des coûts de traitement.

Les technologies de valorisation des résidus chlorés sont en opération en Europe depuis une quinzaine d'années déjà pour éliminer les solvants organiques chlorés des liquides, des solides ou des gaz. Ces technologies sont avantageuses parce qu'elles permettent la récupération de l'acide chlorhydrique mais les coûts de capitalisation sont relativement élevés (CH2M Hill Engineering Ltd., 1992).

Une unité commerciale de grillage du mercure est en opération au Japon pour le traitement des sols contaminés par le mercure. Les sols sont placés dans une fournaise où le mercure est volatilisé, et récupéré dans des condenseurs. Ce procédé requiert que les résidus solides soient ultérieurement éliminés dans une décharge contrôlée.

Les technologies in situ de chauffage à la fréquence radio et à la vapeur sont intéressantes pour restaurer les sols contaminés par les composés organiques volatils mais elles ont été testées seulement en laboratoire sur les sols. Des projets de démonstration sont actuellement en cours dans le cadre du *Superfund* américain (Averett *et al.*, 1990).

4.6.5 Avantages et limites pour le traitement des sédiments. - Selon l'USEPA, en plus de considérer le volume de sédiments à traiter, la faisabilité des procédés thermiques à haute température pour le traitement des sédiments est déterminée par les caractéristiques physiques et chimiques des sédiments qui peuvent influencer grandement les conditions de traitement, à savoir :

- le niveau requis de classification des particules;

- le niveau de déshydratation requis et le type de technologie utilisée pour la déshydratation;
- le type d'incinérateur ou d'appareil de combustion utilisé;
- la conception des épurateurs de gaz;
- le traitement des cendres avant leur élimination (USEPA, 1991b).

En 1990, les incinérateurs n'avaient pas encore été testés aux États-Unis pour le traitement des sédiments mais ils avaient été retenus pour plusieurs sites du *Superfund* américain en raison de leur haute efficacité (>99 p. 100) pour détruire ou enlever les contaminants organiques. Tel que le montre le tableau 4.22, la faible valeur calorifique et la forte teneur en eau des sédiments contribuent cependant à augmenter les coûts d'incinération et limiter son application.

Comme pour les autres procédés thermiques, la performance des procédés de pyrolyse est réduite par le contenu en eau des matrices à traiter et en conséquence, une étape de déshydratation est nécessaire pour le traitement des sédiments.

L'application des procédés d'extraction thermique à basse température qui démontrent pourtant des efficacités élevées pour le traitement des sols et ce pour plusieurs composés organiques volatils, est également limitée pour les sédiments en raison de leur forte teneur en eau. Les sédiments doivent être au préalable déshydratés, ce qui peut considérablement augmenter les coûts de traitement.

Tableau 4.22 *Evaluation de la performance anticipée des technologies thermiques pour la dépollution des sédiments*

TECHNOLOGIE	STADE DE DÉVELOPPEMENT	APPLICATION AUX SÉDIMENTS	DISPONIBILITÉ	COTE DE PERFORMANCE (**)		
				Efficacité	Application	Coûts
Énergie radiante						
Larc	Conceptuel	Non	Breveté	3	1	2
Ozonocs	Conceptuel	Non	Breveté	2	1	2
Photolyse	Conceptuel	Non	Développement	2	1	2
Thermique						
Chauffage à fréquence radio	Conceptuel	Non	Développement	3	1	1
EcoLogic (*)	Pilote	Pilote	Breveté	4	3	2
Haut fourneau	Démontré	Non	Oui	3	2	1
Four rotatif industriel	Démontré	Non	Oui	3	2	1
Incinérateur à lit mobile	Démontré	Oui	Oui	4	3	2
Incinérateur à lit fluidisé (II) ***	Démontré	Non	Oui	4	2	1
Incinérateur à scorification à H.T. (II)	Démontré	Non	Breveté	4	2	1
Incinérateur pyretron	Pilote	Non	Breveté	3	1	1
Incinération à arc à plasma	Pilote	Non	Développement	3	1	1
Incinération à four rotatif	Démontré	Non	Oui	4	2	2
Incinération à infrarouge (Shirco) (II)	Pilote	Non	Breveté	4	2	1
Incinération à injection de liquide	Démontré	Non	Oui	3	1	1
Incinération à plateaux (II)	Démontré	Non	Oui	4	2	1
Incinération à sels fondus	Conceptuel	Non	Développement	4	1	1
Oxydation à air humide	Démontré	Banc d'essai	Breveté	2	3	3
Oxydation au point critique de l'eau (II)	Pilote	Non	Breveté	4	2	1
Procédé de boulettage Lurgi	Pilote	Oui	Breveté	3	1	1
Procédé de réaction à flamme	Pilote	Non	Breveté	3	2	1
Procédé de pyroplasma	Pilote	Non	Breveté	3	2	1
Procédé AOSTRA-Taciuk	Pilote	Pilote	Breveté	3	3	2
Pyrolyse (II)	Démontré	Non	Oui	4	2	1
Pyrométallurgie	Démontré	Non	Oui	2	2	1
Réacteur électrique de pointe (II)	Pilote	Non	Breveté	4	2	1
Rôtissage	Conceptuel	Non	Développement	3	1	1
Séparation thermique à basse température	Démontré	Non	Oui	3	2	2
Vitrification (II)	Pilote	Banc d'essai	Breveté	4	3	1
Vitrification de verre fondu	Conceptuel	Non	Développement	3	1	1
Vitrification in situ (Batelle)	Pilote	Banc d'essai	Breveté	4	2	1

Remarques :

* Les technologies en caractère gras ont été retenues par l'USACE et l'USEPA pour des projets de démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs.

** Voir tableau 3.3. pour la signification des cotes de performance.

*** II : Technologies retenues pour des projets de démonstration dans une phase ultérieure.

Source: Averett et al. (1990).

4.6.6 Technologies démontrées pour le traitement des sédiments. - Le tableau 4.23 présente les technologies thermiques qui ont été démontrées pour le traitement des sédiments. Le tableau précise pour chacune, le nom des promoteurs de la technologie, le lieu et l'échelle de démonstration ainsi que les contaminants traités.

Incinérateurs. - Tel que l'indique le tableau 4.23, les incinérateurs à four rotatif et par radiations à infrarouge ont déjà été utilisés en Europe et aux États-Unis pour le traitement des sédiments contaminés. En Europe, plusieurs usines opèrent sur une base commerciale pour le traitement des sédiments.

La compagnie canadienne Superburn Systems Ltd. procède actuellement au traitement de 700 000 tonnes de sédiments et de sols contaminés avec des HAP (concentrations moyennes de 6900 ppm) et par le zinc, le plomb, le cuivre et l'aluminium du Sydney Tar Ponds, en Nouvelle Écosse. Le traitement est effectué dans deux incinérateurs à lit mobile. Les coûts de dépollution des sols et des sédiments de ce site ont été estimés à 50 millions sur une période de sept ans (Kendall, 1991).

Procédé DAVES. - La compagnie Recycling Sciences International Inc. a développé un système de désorption et d'extraction à la vapeur (procédé DAVES, Desorption and Vapor Extraction) qui utilise de basses températures et un lit fluidisé pour enlever les composés organiques et les composés inorganiques volatils des sols, des sédiments et des boues. Le procédé a été testé à l'échelle pilote pour traiter les sédiments du port de Waukegan (Illinois). Les teneurs des sédiments en BPC qui allaient jusqu'à 250 ppm ont été réduites à moins de 2 ppm (USEPA, 1991c)

La figure 4.44 illustre le schéma de principe du procédé de désorption DAVES:

Tableau 4.23 Technologies thermiques démontrées pour la dépollution des sédiments

TECHNOLOGIE	PROMOTEUR(*)	LIEU DE DÉMONSTRATION		ÉCHELLE DE DÉMONSTRATION	TYPE DE CONTAMINATION	RÉFÉRENCE
		PAYS	SITE			
Destruction thermique Four rotatif	Plusieurs compagnies	É.-U.	Grand Island Nebraska et Shreveport, Louisiana	Commerciale	Explosifs	USEPA (1991b)
	Plusieurs compagnies	Hollande	Non défini	Commerciale	Substances organiques	USEPA (1991b)
	Plusieurs compagnies	Allemagne	Non défini	Commerciale	Substances organiques	USEPA (1991b)
Incinération à infrarouge	Shirco Infrared Systems Inc. (maintenant ECOVA Corporation)	É.-U.	Brandon, Floride	Commerciale	Métaux, BPC et autres substances organiques	USEPA (1991b)
	Ogden Environmental Services Inc.	É.-U.	Rivière Swanson, Alaska	Pleine échelle	BPC	USEPA (1991b)
Incinération à lit mobile	Superburn Systems Ltd	Canada	Sidney Tar Ponds, N.E.	Pleine échelle	HAP	Averett et al. (1990)
Oxydation à air humide	Zimpro/Passavant Inc.	É.-U.	Banc d'essai		BPC	Averett et al. (1990)
Désorption thermique . Procédé DAVES . Procédé LTTS . Procédé AOSTR- Taciuk	Recycling Sciences International Inc.	É.-U.	Port Waukegan, Illinois	Pilote	BPC	USEPA (1991b)
	US Army Toxics and Hazardous Materials Agency (USATHAMA)	É.-U.	Wilmington, Delaware	Banc d'essai	BPC, substances orga- niques volatiles et semi volatiles	USEPA (1991b)
	Soitech Inc.	É.-U.	Waukegan, Superfund Site	Pilote	BPC	Averett et al. (1990)
	UMATAC Industrial Process	Canada	Port de Hamilton, Thunder Bay, Ontario	Banc d'essai	BPC, HAP et métaux lourds	WTC (1992b)
Procédé Lurgi	Lurgi Canada Ltd.	Allemagne	Port Hambourg	Pleine échelle	Substances organiques et métaux	WTC (1992b)

* Pour les adresses et les numéros de téléphone des promoteurs, consulter l'Annexe C

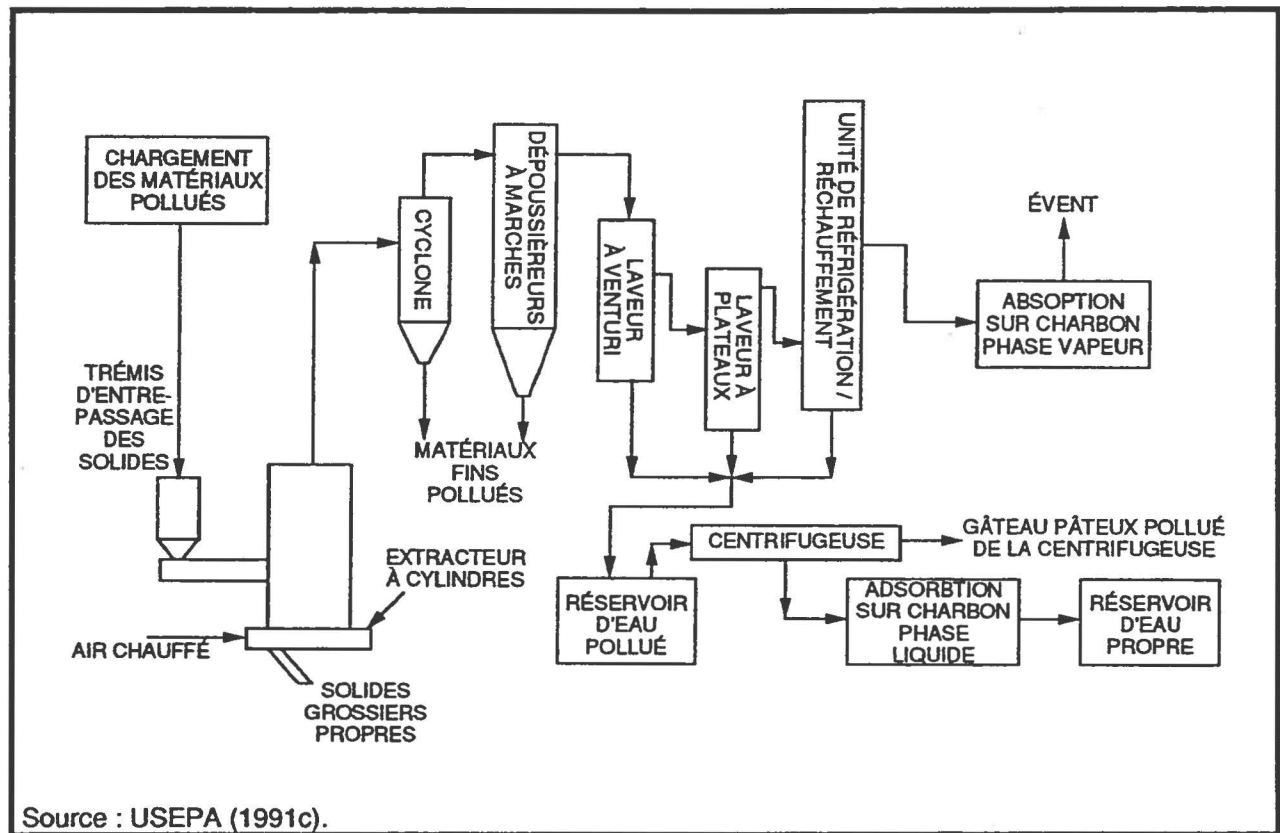


Figure 4.44 Schéma de principe du procédé de désorption DAVES

Les matrices contaminées sont d'abord acheminées à contre-courant dans un lit fluidisé où elles sont mises en contact avec de l'air chaud (535 à 760 °C) par un brûleur au gaz naturel. Le contact direct entre l'air chaud et les déchets déplace l'eau et les contaminants dans l'effluent gazeux qui est en contact avec le lit fluidisé à des températures de 175 °C. L'air chaud vaporise l'eau et les substances organiques. Les particules entraînées passent à travers un séchoir avant d'être acheminées au système d'épuration des gaz.

L'effluent gazeux est débarrassé des particules solides, de l'eau vaporisée et des vapeurs organiques dans le système d'épuration des gaz. La plupart des particules sont captées par un cyclone-dépoussiéreur et des filtres à manche. Les

vapeurs du cyclone sont refroidies dans un laveur à venturi, un laveur à contre-courant et une unité de réfrigération avant d'être traitées au charbon activé.

Ce procédé peut enlever les substances organiques volatiles et semi-volatiles incluant les BPC, les HAP et les PCP, les substances inorganiques volatiles (tétraéthyle de plomb) et certains pesticides des sols, des sédiments et des boues. En général, le procédé traite les déchets dont le contenu total en matière organique est inférieur à 5 p. 100 et qui contiennent entre 30 et 90 p. 100 de solides. Les contaminants inorganiques non volatils et les métaux ne sont pas éliminés mais n'influencent pas le procédé (US EPA, 1991).

Procédé LTTS (Stripage thermique à basse température). - Les procédés de stripage thermique à basse température (Low-temperature thermal stripping, LTTS) séparent physiquement les contaminants volatils et semi-volatils des sols, des sédiments, des boues et des gâteaux de filtration. Les systèmes LTTS peuvent être utilisés seuls pour la dépollution de sites contaminés contenant jusqu'à 10 p. 100 de composés organiques.

Le procédé LTTS convient pour les substances organiques volatiles telles que les HAP et il n'est généralement pas utilisé pour traiter les contaminants inorganiques et les métaux. La matrice contaminée est chauffée entre 95 et 538 °C, soutirant l'eau et les contaminants volatils. Les températures requises par ce procédé sont inférieures à celles des procédés d'incinération.

La figure 4.45 illustre le schéma de principe du procédé de désorption LTTS.

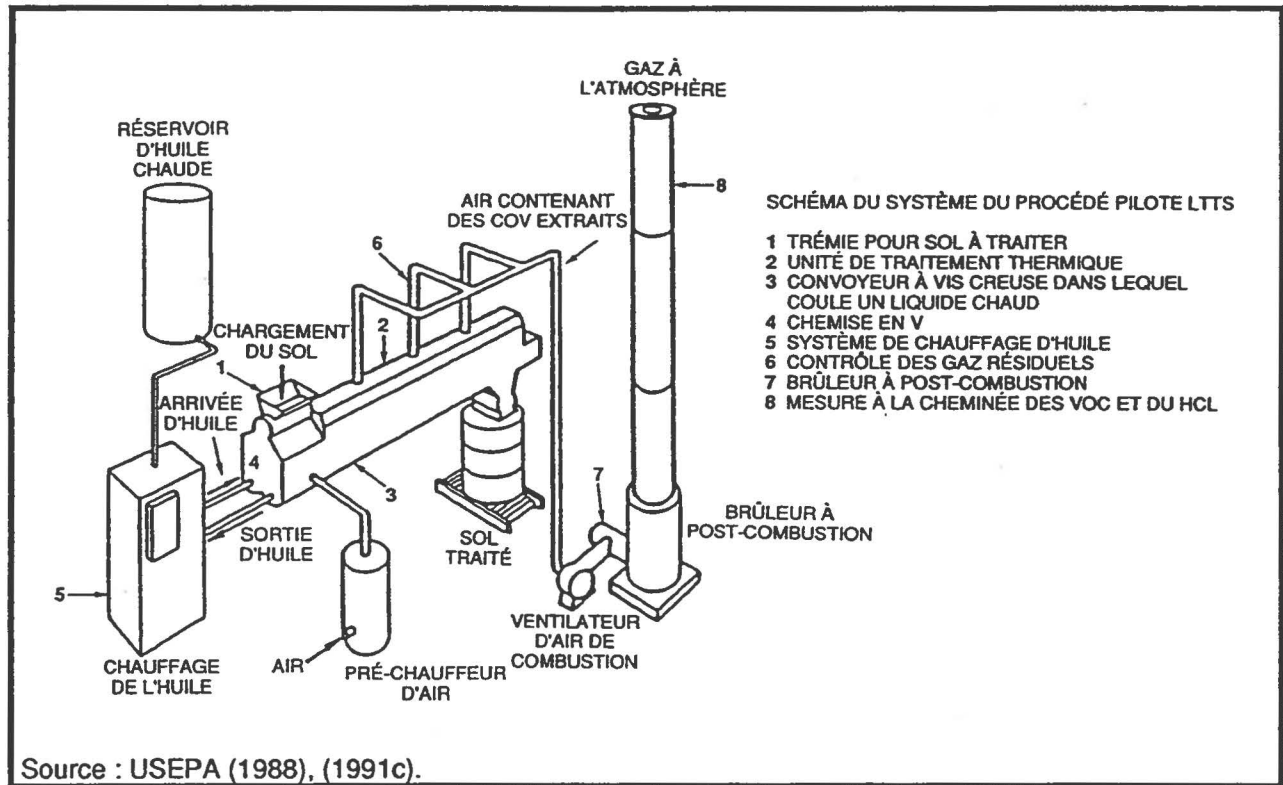


Figure 4.45 Schéma de principe du procédé de désorption LTTS

Les gaz d'émission peuvent être soit brûlés dans un brûleur à post-combustion, soit condensés pour en réduire le volume, soit captés par des lits de charbon activé. Pour les essais de traitabilité réalisés aux Etats-Unis dans le cadre du programme de dépollution des sédiments des Grands Lacs, seuls les procédés avec captage des polluants atmosphériques ont été considérés. Ce type de procédé devrait convenir pour les solides, les eaux et les résidus huileux. Il n'est pas conçu pour détruire complètement les contaminants mais les sédiments traités par ce procédé devraient être plus faciles à éliminer.

Procédé AOSTRA-Taciuk. - Durant les années 1970, un procédé de désorption thermique a été développé par l'Alberta Oil Sands Technology et l'Alberta Research Authority (AOSTRA) en collaboration avec UMATAC Industrial Process Inc.,

pour extraire les huiles des sables bitumineux dans l'Ouest canadien. Avec la chute des prix du pétrole, la technologie est maintenant appliquée au traitement des sols, des sédiments et autres déchets dangereux.

Une unité pilote de 5 t/h, opérée par UMATAC est disponible à Swan Hills à Calgary pour des projets de démonstration. Pour l'Est du Canada, Décontam Inc., de Montréal détient la licence d'exploitation de la technologie AOSTRA-Taciuk. Une unité commerciale de 5 à 20 t/h est également construite et opérée aux États-Unis par SoilTech. Des projets de démonstration et dépollution avec cette unité ont été réalisés avec des sols du site de Wide Beach contaminés par des BPC et des sols/sédiments du port de Waukegan contaminés par les BPC (USEPA, 1992g; USEPA, 1992h).

La technologie AOSTRA-Taciuk est similaire aux autres technologies de désorption à basse température. Les matrices contaminées sont alimentées dans le réacteur de pyrolyse/combustion connu sous le nom d'AOSTRA-Taciuk Processor qui constitue le coeur du procédé et la composante la plus innovatrice du procédé (CHM2 Hill ENGINEERING LTD., 1992).

Tel qu'illustré à la figure 4.46, le réacteur consiste en un four rotatif horizontal composé de quatre compartiments individuels, à l'intérieur desquels s'effectuent les étapes successives de conversion thermo-chimique. Les autres composantes majeures du procédé sont illustrées à la figure 4.47.

Le premier compartiment du réacteur est une zone hermétique de pré-chauffage où les matrices contaminées sont chauffées à 260 °C. Les composés chimiques de faible tension de vapeur telles l'eau et les huiles légères se volatilisent des déchets. L'eau et les vapeurs d'huiles sont extraites du réacteur et condensées dans un système séparé.

Les déchets passent ensuite dans le second compartiment où les températures varient entre 370 et 590 °C pour volatiliser les huiles lourdes et les BPC. Pour assurer une non oxydation des hydrocarbures, les zones de pré-chauffage et de réaction sont maintenues en conditions anoxiques (absence d'oxygène). Les réactions de pyrolyse produisent un courant gazeux et un résidu solide dont les particules sont enrobées de coke. Tel que présenté à la figure 4.47, les vapeurs d'eau et les vapeurs

organiques résiduelles sont acheminées au système de récupération d'huile de l'usine de traitement.

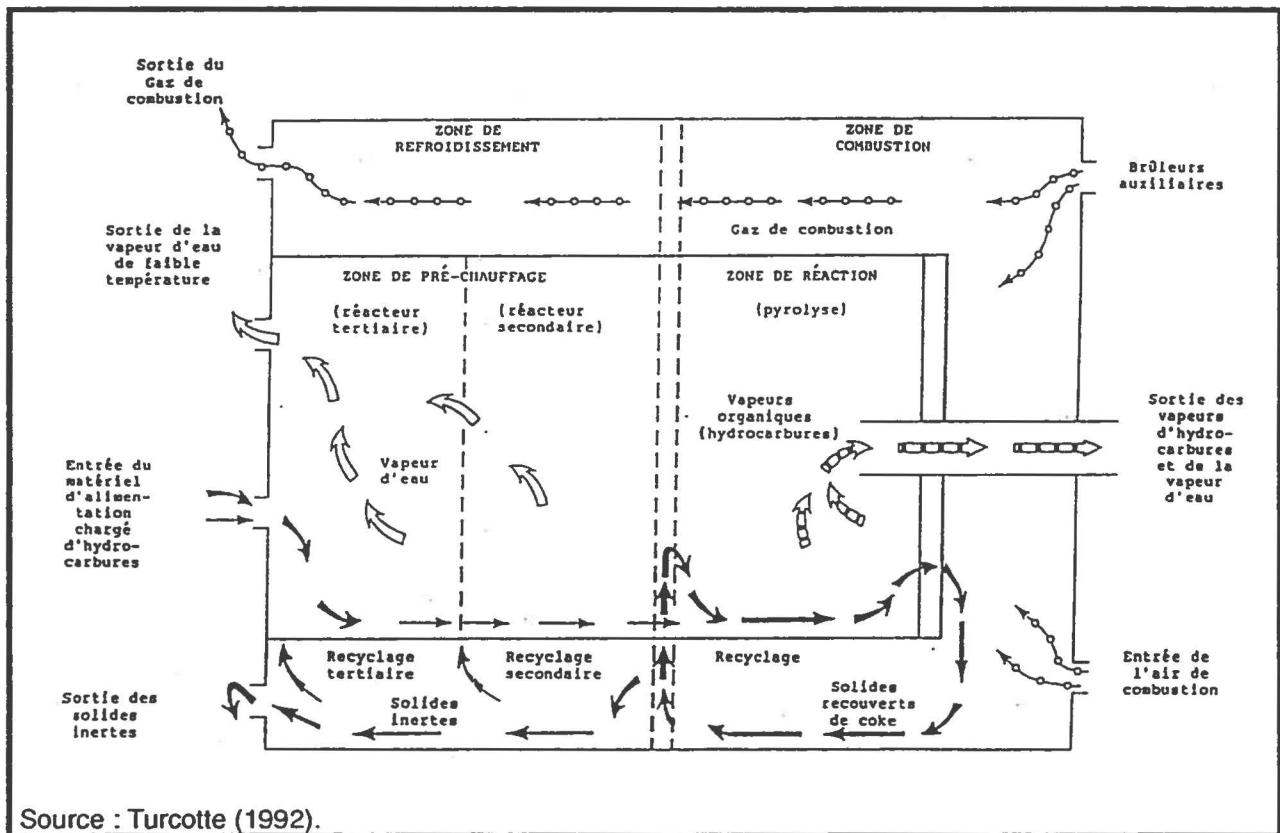


Figure 4.46 Schéma du réacteur AOSTRA-Taciuk

Les particules solides enrobées de coke sont transférées de la zone de réaction à la zone de combustion où l'air de combustion préchauffé est injecté pour brûler la majeure partie du coke et fournir l'énergie requise par le procédé. Des brûleurs au gaz naturel sont aussi utilisés pour maintenir les températures d'opération entre 540 et 815 °C. Les solides inertes chauds sont ensuite recyclés vers la zone de réaction et la fraction excédentaire de solide passe dans le compartiment externe de l'échangeur de chaleur de la zone de refroidissement où ils sont refroidis en transmettant leur chaleur aux déchets alimentant le réacteur. Les solides inertes quittent le réacteur et

sont refroidis davantage par l'addition d'eau avant d'être acheminés par convoyeurs ou camions à l'aire d'entreposage.

Les huiles lourdes récupérées à la base de la colonne de fractionnement peuvent être retournées à la zone de pyrolyse, utilisées comme combustible d'appoint, acheminées vers une unité d'hydro-traitement ou encore être vendues comme combustible.

Les gaz de combustion du réacteur sont traités en série par des cyclones pour réduire les concentrations de particules en suspension, par des dépoussiéreurs , par des filtres à manche ou des électrofiltres et par des laveurs qui enlèvent les particules solides résiduelles et le dioxyde de soufre produit par la combustion du coke.

Les eaux du système de récupération et de séparation des vapeurs pyrolytiques sont désulfurées à la vapeur avant d'être acheminées à l'unité de traitement des eaux.

Suite à des essais concluants pour le traitement des sols du site de Wide Beach et des sédiments du port de Waukegan, la technologie AOSTRA-Taciuk a été retenue pour traiter l'ensemble des sédiments de ce port fortement contaminés par les BPC.

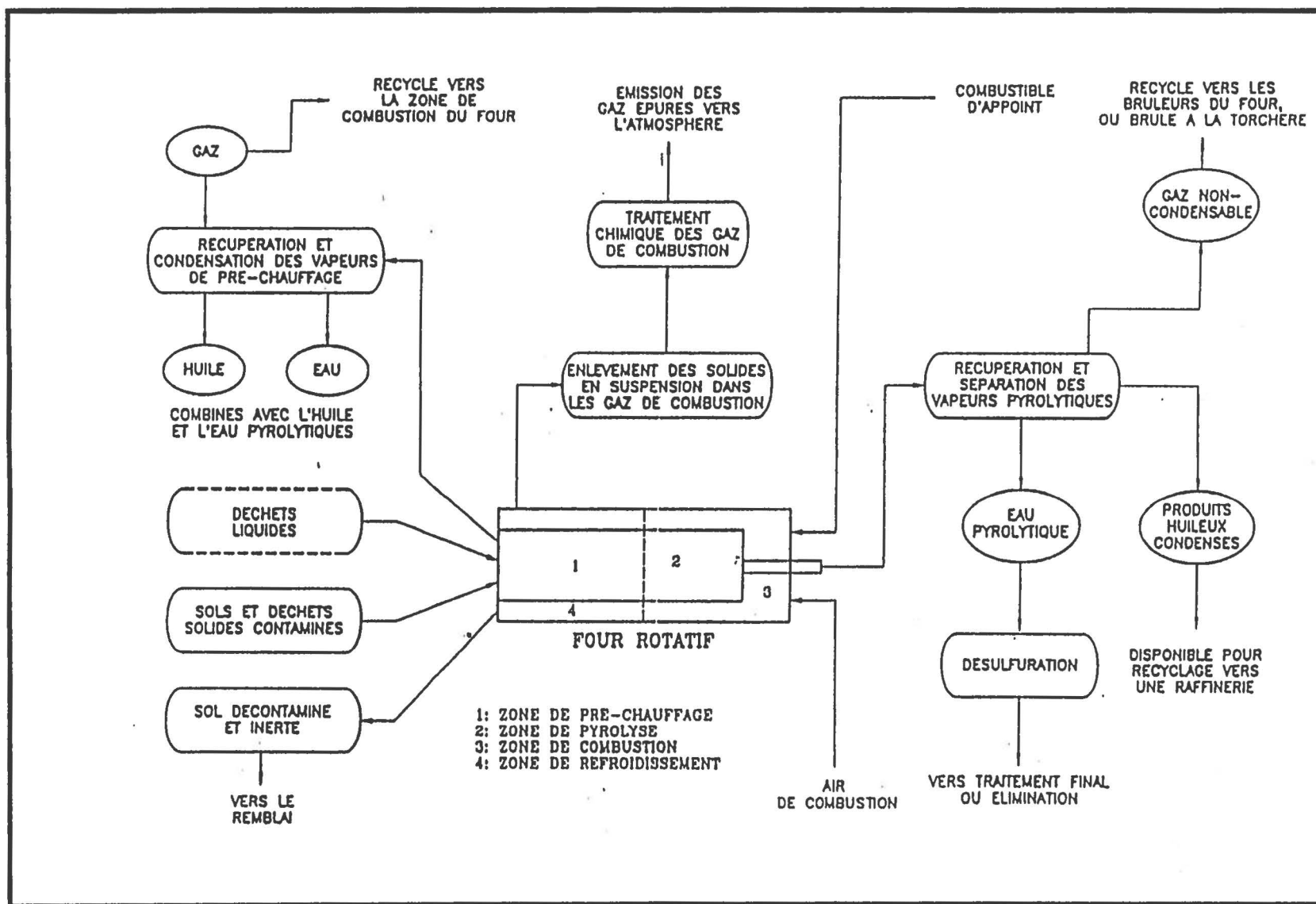


Figure 4.47 Schéma de principe du procédé AOSTRA-Taciuk

Procédé Lurgi. - La compagnie Lurgi Canada Limitée, inscrite dans la banque de technologies SEDTEC, est une filiale de la compagnie Lurgi basée en Allemagne qui a développé un procédé qui permet la déshydratation des sédiments contaminés dans un lit ouvert. Les sédiments, une fois asséchés, sont convertis en petites boulettes qui sont ensuite incinérées pour détruire les contaminants organiques qu'elles contiennent. Les résidus solides sont récupérés et sont utilisés comme matériau de construction et comme substitut de gravier.

Tel qu'illustré à la figure 4.46, ce procédé disponible commercialement comprend essentiellement quatre étapes pour convertir les sédiments en boulettes vitrifiées :

- séparation par classificateurs et hydrocyclones des fractions solides et limoneuses des sédiments;
- déshydratation mécanique de la fraction limoneuse par filtres-presses;
- production de boulettes à partir de la fraction limoneuse;
- traitement thermique à des températures variant entre 1150 et 1180°C, avec excès d'air, de façon à fixer les métaux dans une matrice de céramique, sous forme de boulettes qui peuvent être utilisées dans la construction.

Pour éviter des pointes de températures non contrôlées dans les boulettes, le contenu en carbone des sédiments doit être réduit en ajoutant un calciné doux d'argile réfractaire, un matériau amaigrissant (c'est-à-dire qui diminue la plasticité de l'argile) couramment utilisé dans l'industrie de la céramique.

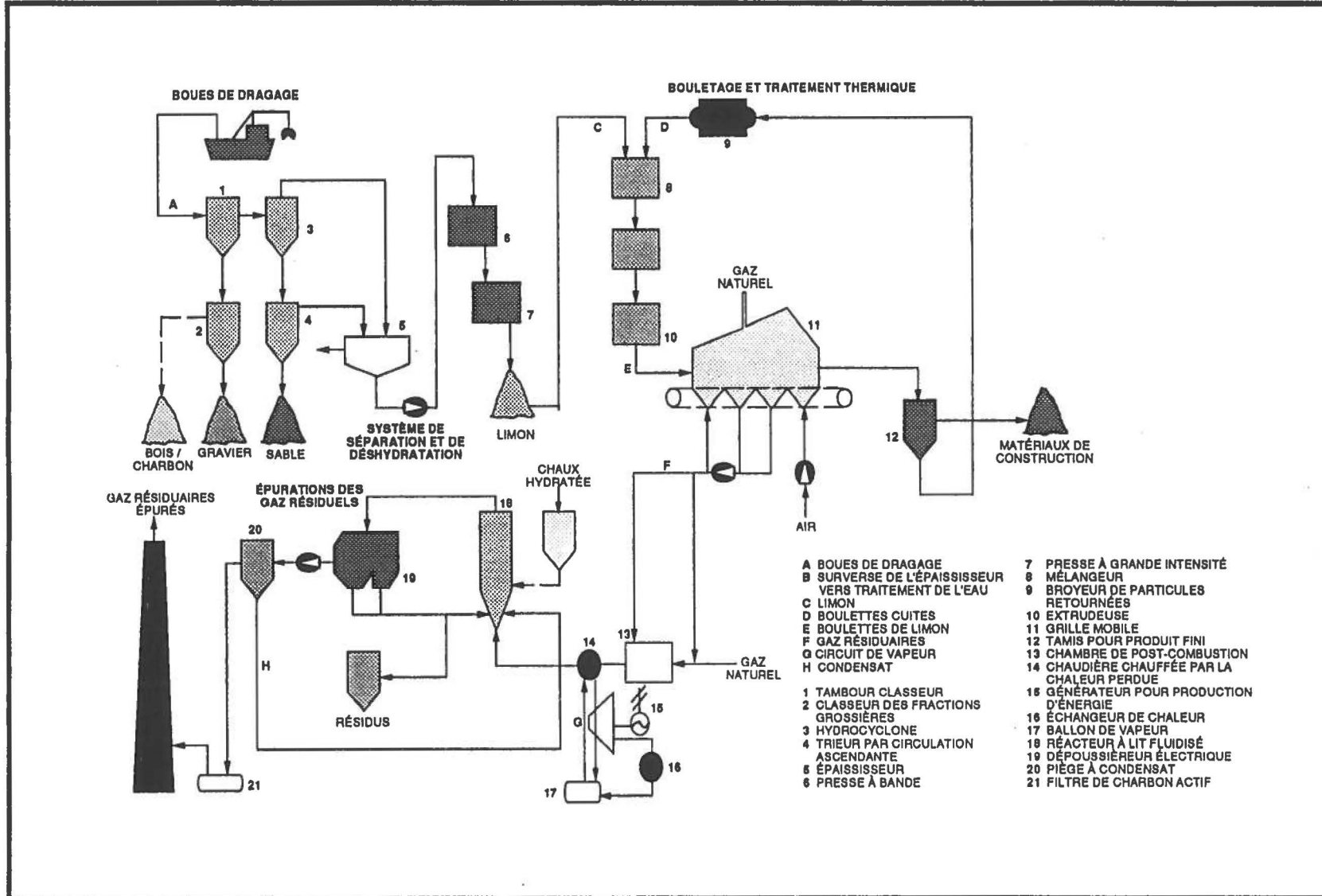


Figure 4.48 Schéma de principe du procédé Lurgi

Selon le vendeur, les essais réalisés avec les sédiments du Port de Hambourg en Allemagne ont démontré que le procédé Lurgi permettait :

- une destruction complète des contaminants organiques;
- une fixation chimique efficace des métaux;
- la fabrication d'un agglomérat de forme et de dimensions variées pouvant être utilisé comme matériau de construction;
- aucune augmentation du volume des produits contrairement à la plupart des autres procédés de stabilisation/solidification;
- un traitement efficace des émissions atmosphériques tout en minimisant les volumes des résidus du traitement à éliminer;
- des coûts de traitement n'excédant pas les coûts d'élimination dans un site à sécurité accrue.

Oxydation à air humide. - La compagnie Zimpro/Passavant Inc. a réalisé des projets de démonstration en banc d'essai sur les sédiments du Port d'Indiana, Indiana, avec une technologie d'oxydation à air humide. Les essais ont démontré que cette technologie permettait d'obtenir des réductions de rendements de 52 p.100 pour les BPC, et les solides traités n'étaient plus considérés comme un déchet dangereux suite aux essais de toxicité et de lixiviation. Les coûts d'utilisation de cette technologie ont été estimés à 25 US \$/verge cube (Averett *et al.*, 1990).

La figure 4.49 illustre le schéma de principe du procédé d'oxydation à air humide.

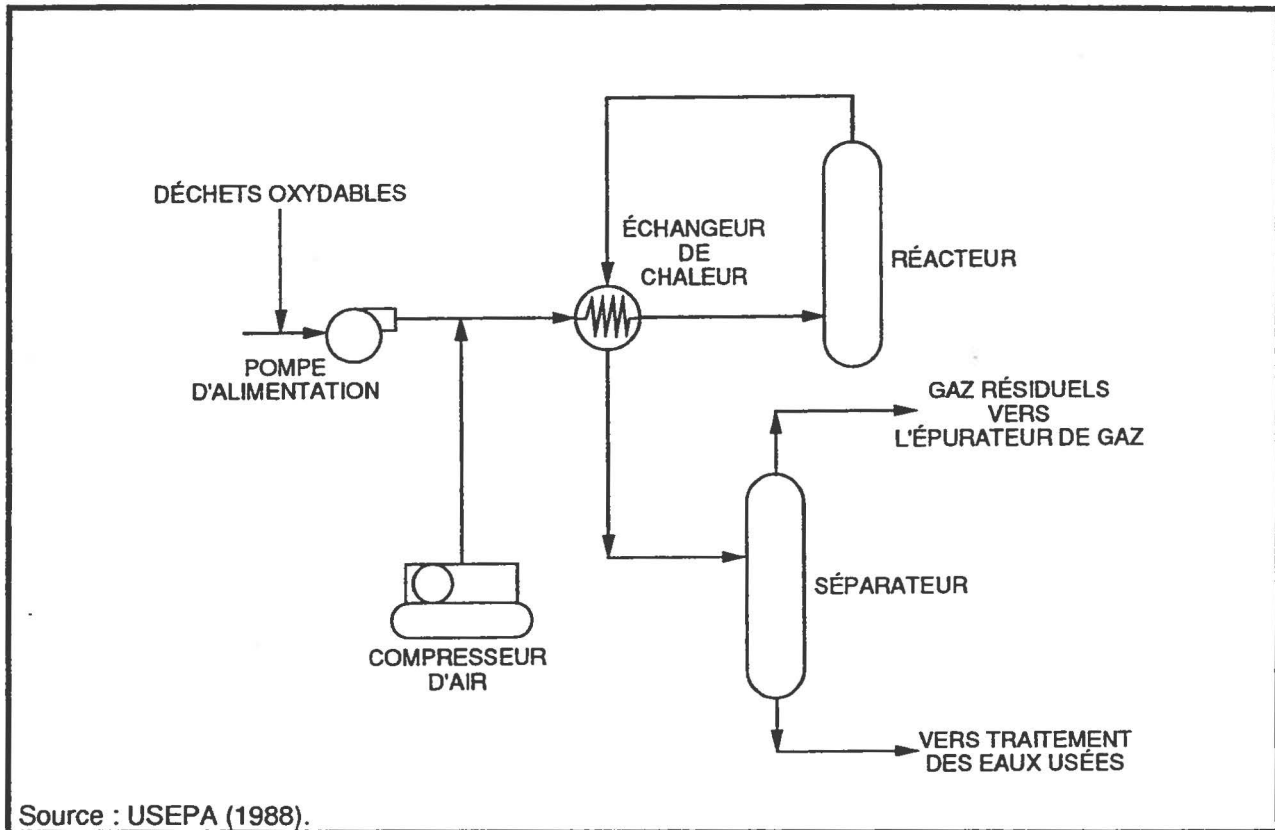


Figure 4.49 Schéma du procédé Zimpro/Passavant d'oxydation à air humide

4.6.7 Technologies en démonstration pour le traitement des sédiments. - Tel que montré au tableau 4.24, l'USEPA et l'USACE ont retenu pour des projets de démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs quatre des 28 technologies thermiques considérées et évaluées. Les technologies retenues sont : l'oxydation à air humide, le strippage thermique à basse température, le procédé de pyrolyse AOSTRA-Taciuk et le procédé thermo-chimique EcoLogic présenté à la section 4.5.

Basé sur les cotes de performance apparaissant au tableau 4.22, ces procédés de désorption thermique ont été choisis parce qu'ils peuvent être plus facilement réalisables économiquement et socialement que les procédés thermiques d'incinération, sujets à des réticences de la population en raison des inquiétudes soulevées par les émissions atmosphériques.

Tableau 4.24 Technologies thermiques en démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs

TECHNOLOGIE	PROMOTEUR(*)	LIEU DE DÉMONSTRATION		ÉCHELLE DE DÉMONSTRATION	TYPE DE CONTAMINATION	RÉFÉRENCE
		PAYS	SITE			
Désorption thermique Procédé ReTec	Remediation Technologies Inc.	É.-U.	Rivières : Ashtabula, Buffalo Grand Calumet Port Sheboygan	Banc d'essai/pilote Banc d'essai/pilote Banc d'essai Banc d'essai	BPC, autres organochlorés HAP, H & G BPC, HAP, H & G BPC	USEPA (1992a)
Désorption thermique AOSTRA-Taciuk (ATP)	SoiTech Inc.	É.-U.	Rivière Buffalo, (NY) Port Indiana, (IND)	Banc d'essai	HAP, H & G BPC	USEPA (1992a)
Incinération	Non défini	É.-U.	Rivière Grand Calumet	Banc d'essai	BPC, HAP, H & G	USEPA (1992a)
Oxydation à air humide	Zimpro/Passavant Inc.	É.-U.	Port Sheboygan Rivière Grand Calumet	Banc d'essai	BPC BPC, HAP, H & G	USEPA (1992a)

* Pour les adresses et numéros de téléphone des promoteurs, consulter l'Annexe C

D'autres technologies thermiques ont été retenues pour éventuellement faire l'objet de démonstration en deuxième et en troisième phases, de façon à acquérir de l'expérience avec les sédiments contaminés et également pouvoir mieux en préciser les coûts d'utilisation. Les technologies considérées sont : four rotatif, incinérateur à lit mobile, réacteur électrique de pointe, incinérateur à lit fluidisé, incinérateur à scories à hautes températures, incinérateur à infrarouge et incinérateur à plateaux (Averett *et al.*, 1990).

Les procédés AOSTRA-Taciuk et d'oxydation à air humide ont été déjà décrits dans la section des technologies démontrées. Les paragraphes suivants présentent les technologies thermiques non décrites.

Procédé de désorption ReTeC. - La compagnie Remediation Technologies Inc. (ReTeC) a développé un procédé de désorption thermique à haute température pour traiter les solides et les boues contaminées par des composés organiques. Ce procédé a été retenu par l'USEPA et l'USACE pour des projets de démonstration en banc d'essai avec des sédiments des rivières Ashtabula, Grand Calumet et du port de Sheboygan (USEPA, 1992a).

Tel que montré sur la figure 4.50 illustrant le schéma de principe du procédé, le procédé ReTeC comprend les composantes suivantes : système d'alimentation, processeur thermique, système d'enlèvement des particules, système de condensation indirecte et lits de charbon activé (USEPA, 1991h).

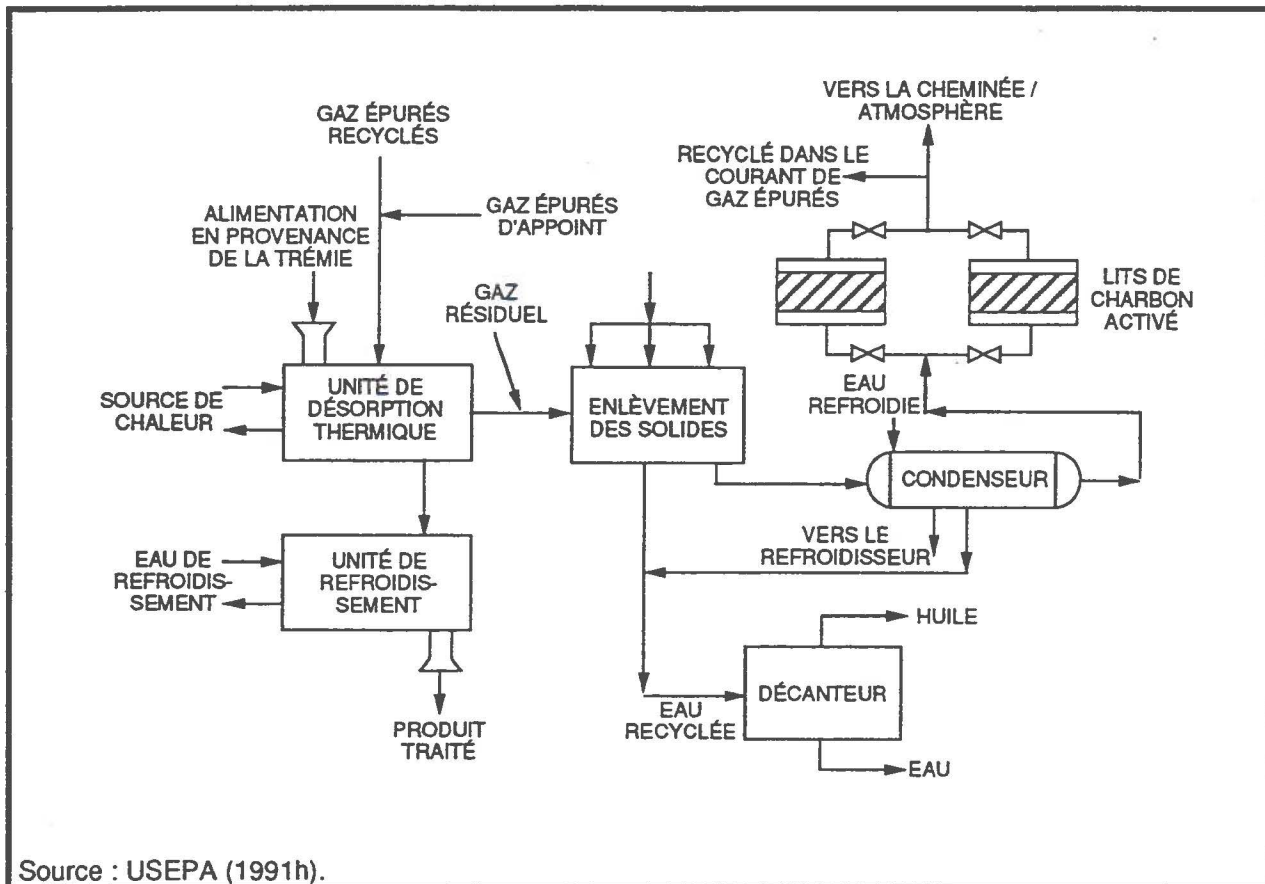


Figure 4.50 Schéma de principe du procédé de désorption à haute température ReTeC

Les déchets sont introduits via deux convoyeurs rotatifs à contre-courant où un constituant eutectique fondu, principalement du nitrate de potassium, sert de médium de transfert. Ce sel fondu a les mêmes caractéristiques de transfert de chaleur que les huiles et permet d'obtenir des températures maximum de 455 °C. Le sel fondu est non combustible, ne présente aucun risque d'explosion et les vapeurs qu'il pourrait dégager ne sont pas toxiques. Des brûleurs électriques ou alimentés au gaz naturel ou au pétrole maintiennent la température du médium de transfert. Le produit traité est ensuite refroidi à des températures inférieures à 65 °C.

Le système de traitement des gaz comprend : un cyclone ou une tour de lavage pour enlever les particules, des condenseurs pour les substances organiques,

des lits de charbon activé pour le contrôle des composés organiques volatils et un dévésiculeur.

Procédé de désorption thermique X* TRAX. - Tel qu'indiqué au tableau 4.24, des sédiments du port de Thunder Bay font présentement l'objet de banc d'essai avec le procédé de désorption thermique X*TRAX™ développé par la compagnie américaine Chemical Waste Management Inc.. Cette technologie extrait les contaminants organiques (composés volatils, semi volatils et BPC) des sols, boues et d'autres matrices. Cette technologie diffère de l'incinération ou de la pyrolyse dans le sens que les réactions et l'oxydation chimique ne sont pas favorisées et qu'il n'y a pas de formation de sous-produits de la combustion. Les contaminants organiques extraits se retrouvent dans un liquide condensé à haute valeur calorifique qui peut être détruit dans un incinérateur autorisé ou utilisé comme source d'énergie d'appoint. En raison des faibles températures (90 à 480 °C) et des débits réduits des gaz, ce procédé est moins dispendieux que l'incinération (USEPA, 1992f).

Un four rotatif à chaleur indirecte volatilise l'eau et les contaminants organiques. Un gaz inerte, l'azote, est utilisé pour prévenir l'oxydation des matrices traitées et pour transporter les gaz volatilisés au système d'épuration des gaz où les vapeurs organiques et les poussières sont captées et récupérées. Les composés organiques volatils sont condensés et séparés dans le système d'épuration des gaz (filtres et systèmes au charbon activé) et l'azote est ensuite recyclé au four rotatif (USEPA, 1992f; Wastewater Technology Centre, 1992a).

4.6.8 Technologies retenues pour des projets de dépollution de sédiments. -

Bien que les incinérateurs n'aient pas encore été utilisés sur une base régulière pour traiter les sédiments contaminés, du moins aux États-Unis, ils ont été sélectionnés pour la restauration de plusieurs sites contaminés du *Superfund* impliquant une contamination des sédiments. Ces technologies ont été retenues parce qu'elles sont actuellement les plus efficaces pour détruire les contaminants organiques bien qu'elles soient les plus dispendieuses (200 à 1300 US \$/verge cube) (Averett *et al.*, 1990).

Pour les sédiments du port de New Bedford et après une analyse de plusieurs technologies, l'incinération a été retenue pour traiter les sédiments des secteurs les plus contaminés par les BPC.

Tel que mentionné précédemment, un projet de traitement de sédiments du Sydney Tar Ponds en Nouvelle-Écosse fortement contaminés par les HAP, est en cours au Canada. Deux incinérateurs à lit mobile construits sur place sont utilisés.

En 1990, la désorption thermique avait été retenue pour la restauration de deux sites aux États-Unis (American Thermostat, NY et port de Waukegan, IL).

4.6.9 Conclusions. - Les sections précédentes ont montré que les technologies thermiques à haute température telles l'incinération, la vitrification et la pyrolyse, et celles à basse température tels les procédés de désorption, présentent des efficacités démontrées pour la plupart des contaminants organiques et pour la plupart des matrices (sols, boues, sédiments).

Les technologies par incinération sont utilisées en Europe pour le traitement des sédiments, mais ne sont pas encore utilisées sur une base commerciale aux États-Unis bien qu'elles soient considérées pour le traitement de certains sites dans le cadre du Superfund, en raison de leur haute efficacité. Au Canada, les sédiments du site de Sydney Tar Ponds en Nouvelle-Écosse, font présentement l'objet d'un traitement par des incinérateurs à lit mobile.

Pour les sédiments, la performance de la plupart des procédés thermiques est généralement faible en raison du fort contenu en eau des sédiments qui nécessite une étape de déshydratation, et en raison de leur faible valeur calorifique. L'ensemble de ces facteurs contribue à augmenter les coûts du traitement et en conséquence à en limiter l'application dans des projets de dépollution des sédiments, particulièrement lorsqu'il s'agit de volumes importants.

Compte tenu que les métaux ne sont pas détruits par les technologies thermiques, ceux-ci se retrouvent généralement dans les poussières des systèmes d'épuration des gaz et dans les cendres. Par ailleurs, pour certains procédés

thermiques, le changement de l'état d'oxydation des métaux dans les sédiments traités peut augmenter la mobilité de certains métaux dans les cendres.

4.7 Traitement par immobilisation

4.7.1 Principe de traitement. - Les techniques d'immobilisation visent généralement soit à améliorer la manutention et les caractéristiques physiques des matériaux, soit à réduire la surface active par laquelle le transfert des contaminants peut se faire, et (ou) à limiter la solubilité des contaminants par un ajustement du pH ou par un phénomène d'adsorption (USEPA,1991b).

Les techniques de *solidification* impliquent un processus physique qui convertit une substance liquide ou semi-solide en une substance solide par l'ajout d'agents de solidification tels les ciments, les silicates, les pouzzolanes et d'autres minéraux. Ce procédé est considéré comme efficace pour immobiliser autant les métaux que les composés organiques à la condition que ces derniers se retrouvent en faibles concentrations.

Pour leur part, les techniques de *stabilisation* réfèrent à un processus chimique qui altère la forme chimique des contaminants par association avec divers agents chimiques tels les polymères. Généralement, la stabilisation est considérée comme efficace pour immobiliser les métaux mais pas les composés organiques. Ces derniers peuvent interférer avec les réactions de stabilisation/solidification (USEPA,1991b).

La figure 4.51 présente les intrants et les extrants des procédés d'immobilisation et les variantes des technologies possibles.

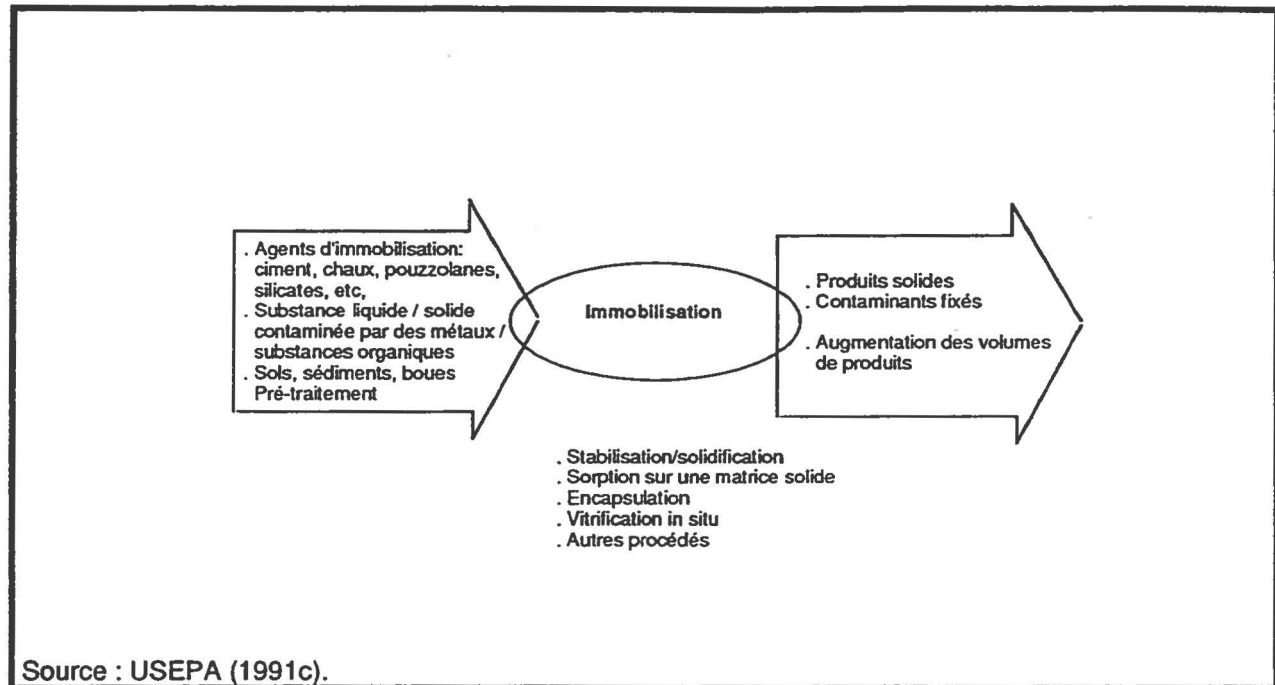


Figure 4.51 Intrants et extrants des procédés d'immobilisation

4.7.2 Technologies disponibles

4.7.2.1 Stabilisation/solidification. - Tel qu'indiqué à la figure 4.52 présentant le schéma de principe des procédés de stabilisation/solidification, ces procédés comportent généralement les étapes suivantes :

- 1 - pré-traitement des sols pour enlever les gros objets;
- 2 - lavage et enlèvement ou concassage des gros objets et ajout des sols. Si le lavage est réalisé, une unité de traitement peut être requise;
- 3 - mélange des sols contaminés avec des produits chimiques, à base de ciment, de pouzzolanes ou autres additifs et de l'eau;
- 4 - dépôt du mélange dans des moules pour solidification;
- 5 - élimination des produits résultants dans des décharges contrôlées ou des cellules de confinement approuvées (Intera Kenting, 1990).

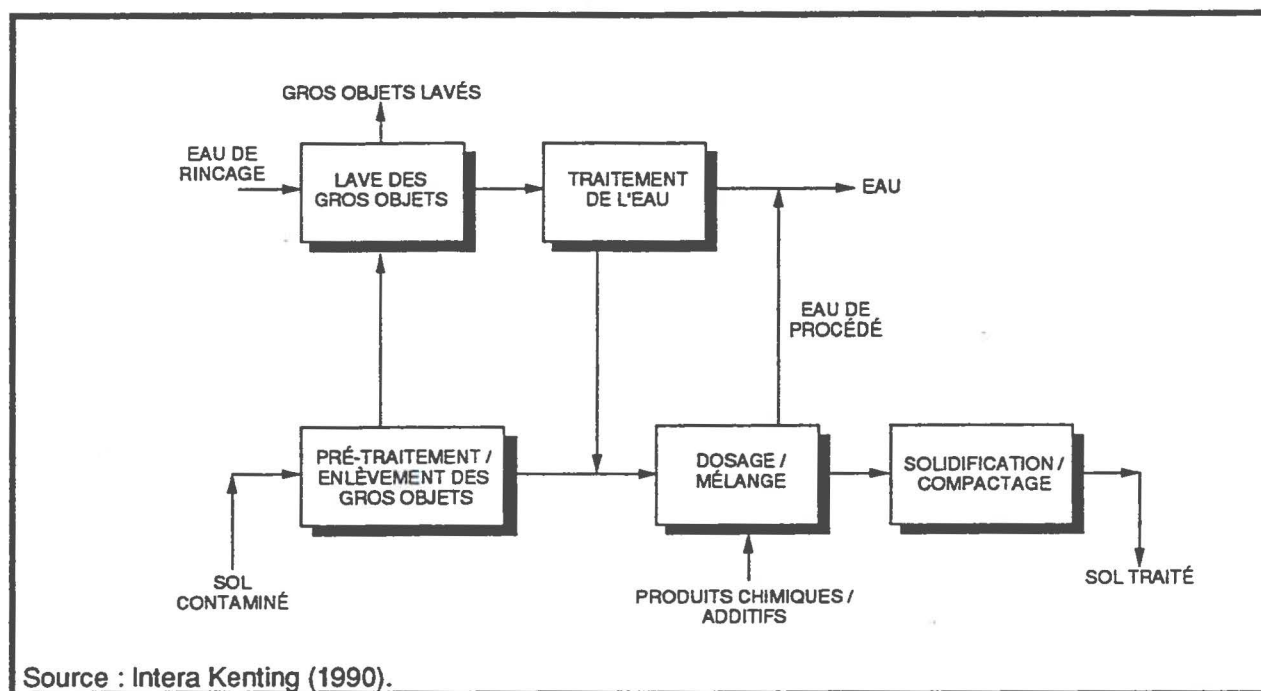


Figure 4.52 Schéma de principe des procédés de stabilisation/solidification

Dans les sections suivantes, les technologies de stabilisation/solidification utilisant du ciment Portland, de la chaux (avec ou sans pouzzolanes), des thermoplastiques, des polymères organiques, des silicates, des argiles modifiées, des chlorures, des produits brevetés ou encore des procédés de sorption, de vitrification in situ ou autres procédés innovateurs au stade de la conception pour le traitement des sols sont sommairement présentés.

Avec du ciment Portland. - Plusieurs procédés de stabilisation/solidification mélangent du ciment Portland, de l'eau et autres additifs comme agents d'immobilisation pour les sols contaminés. Des produits pouzzolaniques telles les cendres volantes ou volcaniques peuvent être ajoutés au ciment pour réagir avec de l'hydroxyde de calcium libre et ainsi améliorer la force, les caractéristiques de manutention et la résistance chimique du produit résultant.

Les procédés à base de ciment réduisent la mobilité des métaux lourds, convertissant ces derniers en hydroxydes insolubles ou en carbonates en raison du pH élevé du ciment. Des sorbants et autres additifs tels les silicates solubles, des argiles, des émulsifiants, du charbon, des zéolites, des sorbants à base de cellulose et de chaux sont souvent mélangés avec du ciment pour améliorer la performance du traitement (Averett *et al.*, 1990). L'ajout de ciment et d'autres additifs augmente de façon significative le volume (jusqu'à 50 p. 100) des sols ainsi traités (Intera Kenting, 1990).

La figure 4.53 illustre le schéma de principe du procédé.

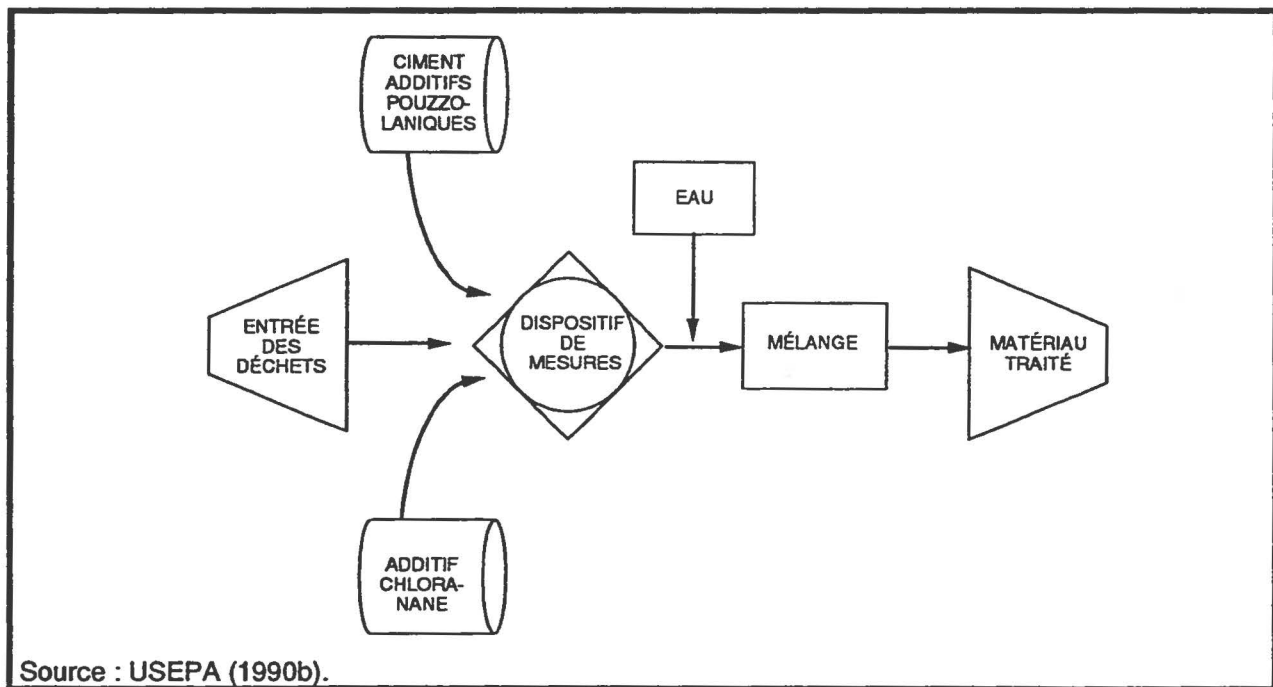


Figure 4.53 Schéma de principe simplifié des procédés de stabilisation/solidification à base de ciment Portland

Ce procédé est un des procédés de stabilisation/solidification présentant le plus de possibilités et il est facilement adaptable pour retenir très efficacement les contaminants dans un produit d'une résistance et d'une durabilité exceptionnelles (Averett *et al.*, 1990).

À la chaux (avec ou sans pouzzolanes). - Avec les procédés à base de pouzzolanes, une masse solide est produite lorsque les matrices contaminées sont mélangées avec de la chaux hydratée. Les pouzzolanes contiennent toutes de l'acide silicilique et fréquemment de l'oxyde d'aluminium. Les substances habituellement utilisées sont les cendres volantes et les cendres de charbon bitumineux ou de charbon subbitumineux. Le procédé est moins dispendieux mais produit une matrice moins durable et plus facile à lixivier, comparativement aux procédés de solidification/stabilisation à base de ciments (Averett *et al.*, 1990).

La figure 4.54 illustre le schéma de principe du procédé.

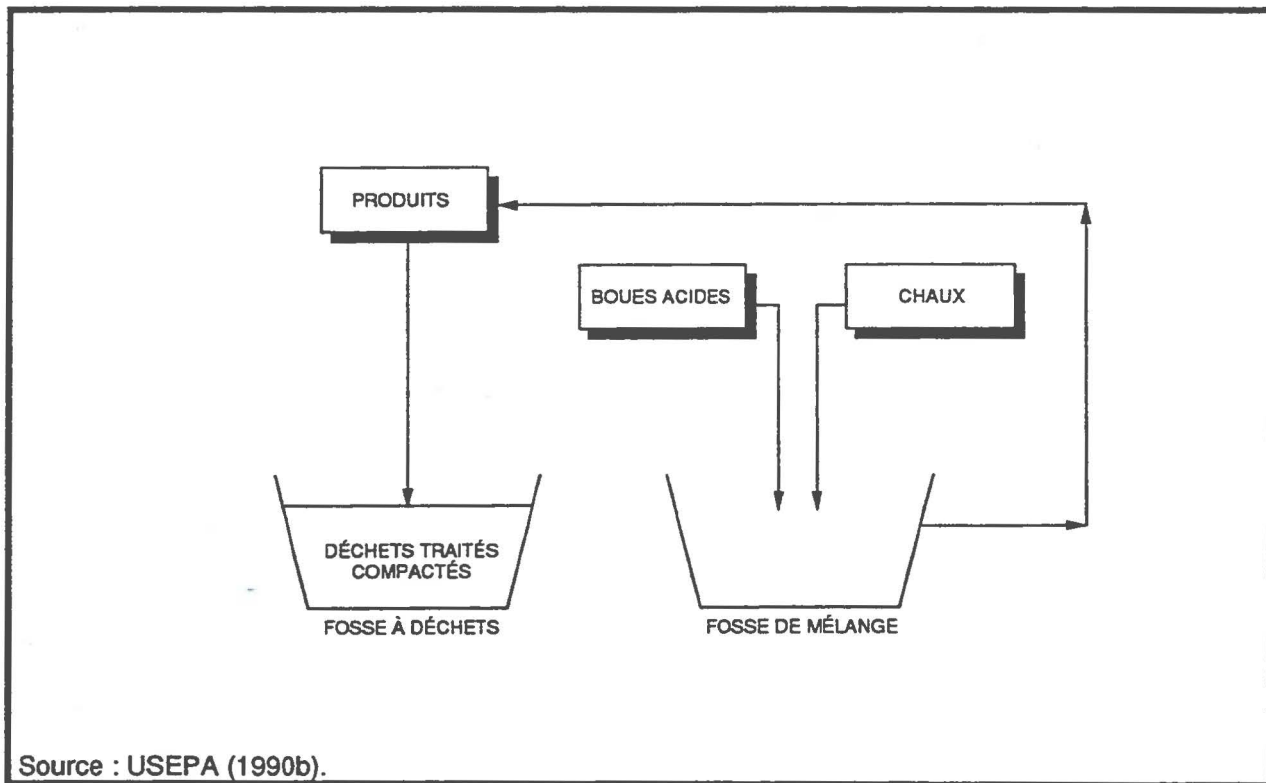


Figure 4.54 Schéma de principe simplifié des procédés de stabilisation/solidification à la chaux

La chaux peut être également utilisée seule sous forme de chaux vive (CaO). Dans ce cas, la chaux réagit avec l'eau. La chaleur générée par la réaction augmente la surface active de la chaux et les déchets comme les huiles sont adsorbés et micro-encapsulés dans un hydroxyde de calcium. Ce procédé augmente la densité du sol et donne un produit final compact mais non solidifié (Intera Kenting, 1990).

Avec des thermoplastiques. - La technologie d'encapsulation thermoplastique est un procédé de stabilisation/solidification en lots où de l'asphalte bitumineuse, de la paraffine ou du polyéthylène sont injectés dans un déchet chauffé et asséché pour former une matrice solide et stable qui devient rigide mais déformable. Dans ce procédé, les contaminants sont physiquement incorporés dans des matériaux thermoplastiques mais sans être liés chimiquement (Intera Kenting, 1990).

Les déchets suivants ne peuvent pas être traités par cette technologie : déchets à fort contenu en eau, oxydants forts, sels inorganiques anhydres, tétraborates, fer et sels d'aluminium, xylènes et toluènes, graisses, chélateurs et agents complexants tels les cyanures et l'ammonium.

Ce procédé est avantageux pour réduire les volumes à traiter, diminuer la perméabilité et éliminer le liquide des déchets pour en faciliter la manutention. Il requiert forcément des équipements spéciaux et des opérateurs qualifiés, et il est énergivore (Averett *et al.*, 1990).

Avec des polymères organiques. - Dans les technologies de stabilisation/solidification avec des polymères organiques, un monomère est ajouté et mélangé aux sols contaminés. Un produit catalyseur est ajouté pour favoriser la réaction qui entraîne la formation de polymères. Le solide formé capte les particules dans une masse spongieuse mais le polymère ne réagit pas chimiquement avec les matrices contaminées. L'eau et les liquides des sols contaminés demeurent dans le polymère après la réaction de sorte que les produits résultants doivent être déshydratés ou placés dans des conteneurs avant leur élimination finale (Intera Kenting, 1990).

L'urée formaldéhyde est le polymère le plus utilisé pour immobiliser les contaminants dans des matrices variées. Cette technologie a été utilisée surtout pour les déchets radioactifs ainsi que sur une base limitée pour immobiliser les chlorures organiques, les phénols, les cyanures et l'arsenic (Averett *et al.*, 1990). D'autres polymères organiques ont été développés pour la solidification des déchets tels que les polyesters et les résines de polyvinyle (Intera Kenting, 1990).

Avec des silicates. - Ces technologies de stabilisation/solidification qui utilisent des matériaux à base de silice et de chaux, du ciment, du gypse ou autres produits font présentement l'objet de recherches intensives et de développement. Les silicates ajoutés aux déchets peuvent être des cendres volantes, des scories noires des fournaies, des poussières de fours rotatifs ou autres pouzzolanes. Des silicates solubles comme le silicate de sodium ou le silicate de potassium peuvent être aussi ajoutés. Cette technologie encapsule aussi bien l'eau, les huiles et autres substances organiques que les substances inorganiques (Intera Kenting, 1990).

La figure 4.55 illustre le schéma de principe du procédé.

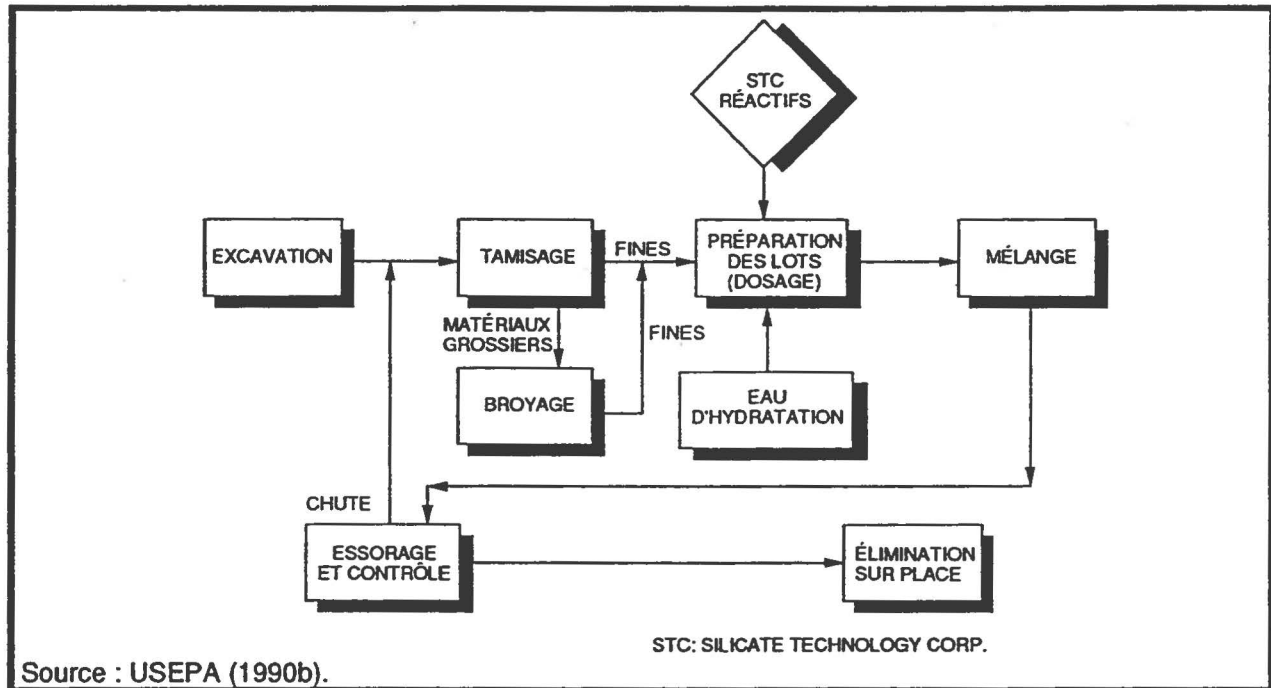


Figure 4.55 Schéma de principe simplifié des procédés de stabilisation/solidification avec des silicates

Avec des argiles modifiées. - Des argiles organophiliques peuvent être utilisées pour améliorer la stabilisation des déchets organiques dangereux. Ces argiles ajoutées à d'autres produits de solidification tels le ciment, les poussières de fours rotatifs ou les cendres volantes conduisent à la formation d'une masse stable et peu lixiviable.

Les argiles utilisées, principalement la montmorillonite (une forme de bentonite) et l'attapulgite, sont modifiées de façon organique par un échange d'ions organiques où les surfactants organiques cationiques sont remplacés par des ions sodium, calcium ou magnésium sur la surface des argiles. Suite à ce traitement, les argiles deviennent organophiliques et peuvent se gonfler et se disperser dans une gamme variée de solvants organiques (Intera Kenting, 1990).

Encapsulation aux chlorananes. - L'encapsulation aux chlorananes implique l'injection de ciment, d'eau et d'additifs appelés chlorananes, dans des solides ou des boues contaminés par des composés organiques, des métaux lourds, des huiles et des graisses. Les chlorananes encapsulent les contaminants organiques pour prévenir les interférences avec les procédés de solidification. Les contaminants sont immobilisés dans les sols formant une matrice bétonnée, résistante à la lixiviation. Ce procédé est disponible chez New Environment, Inc., Harford, OH (Averett *et al.*, 1990) et chez Emtech Environmental Services Inc. (USEPA, 1991b).

La figure 4.56 illustre le schéma de principe du procédé d'encapsulation aux chlorananes de la compagnie Emtech Environmental Services Inc. .

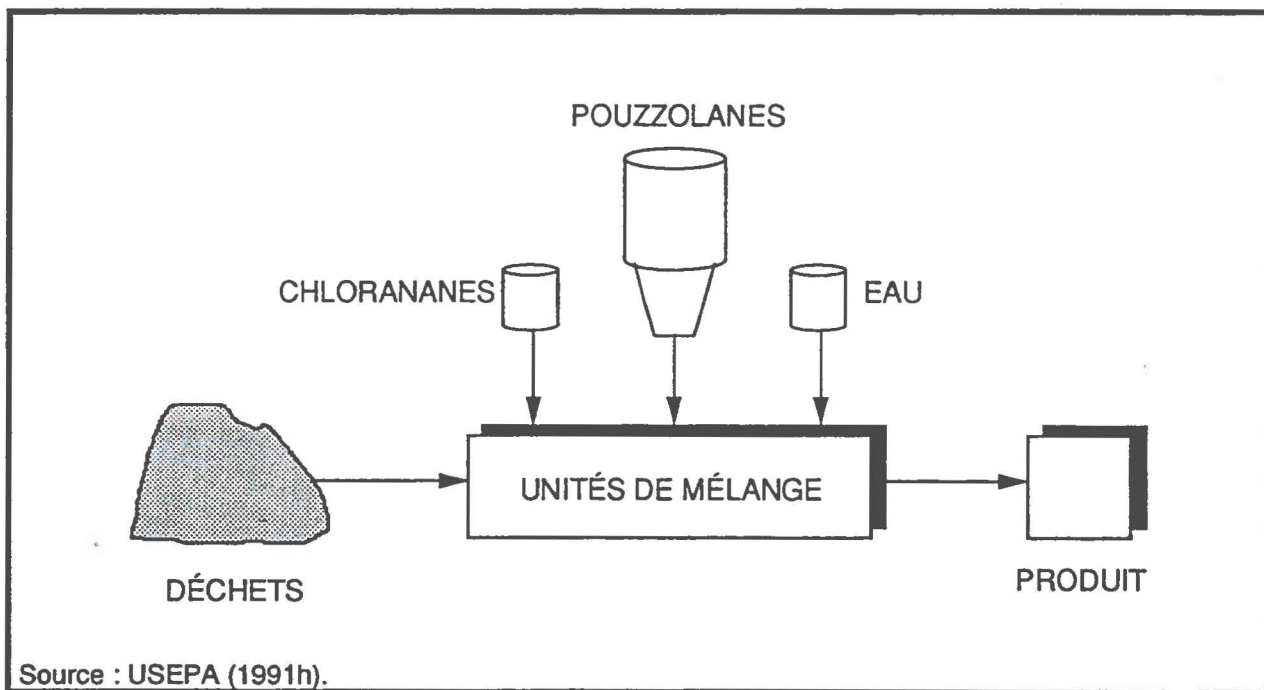


Figure 4.56 Schéma de principe des procédés de stabilisation/solidification avec des chlorananes

Procédés brevetés. - Plusieurs compagnies offrent des procédés de stabilisation/solidification avec des produits brevetés, notamment : Soliditech Inc. (injection de URRICHEM, un mélange de déchets et de cendres volantes, de

poussières des fours rotatifs et de ciment Portland); Delaware Custom Material Inc.; Silicate Technology Corporation (procédés à base de silicates); Chemfix (procédé à base de ciment ou de pouzzolanes); Envirosafe (un mélange de cendres volantes et de chaux); PQ Corporation (silicate de sodium); Silca Bonding (Sil-B) (neutralisation du silicate de sodium par ajout d'acide pour former un liquide d'acide silicique); Wastech Inc. (agents brevetés à base de ciment) (Averett *et al.*, 1990).

4.7.2.2 Sorption. - Les procédés de sorption consistent à ajouter des matériaux solides pour adsorber les parties liquides des sols ou déchets, afin d'en faciliter la manutention. Ce procédé qui peut être utilisé aussi bien pour les substances inorganiques qu'organiques utilise les produits de sorption suivants : cendres volantes, poussières de fours rotatifs, vermiculite et bentonite ainsi que des matériaux synthétiques tels le charbon activé et certaines résines particulières.

Les sorbants qui peuvent être utilisés pour réduire le contenu liquide des déchets et limiter leur solubilité sont peu dispendieux et largement disponibles. Les quantités requises sont par contre considérables et l'élimination des produits ainsi traités peut être parfois problématique.

4.7.2.3 Macro-encapsulation. - Les technologies de macro-encapsulation visent à enfermer les déchets dans des enceintes munies d'un revêtement imperméable (Intera Kenting, 1990). L'une des méthodes de macro-encapsulation consiste à placer les matériaux contaminés solidifiés/stabilisés dans des barils spéciaux (en polyéthylène ou garnis de polyéthylène) avec couvercle soudé ou fusionné avec le baril pour former un contenant qui isole complètement les déchets de l'environnement (Averett *et al.*, 1990; Intera Kenting, 1990).

Bien que la macro-encapsulation soit certainement l'un des procédés des plus efficaces de solidification, cette solution est forcément peu pratique pour de grands volumes de déchets ou de matrices à traiter, ce qui est souvent le cas avec les sédiments contaminés (Averett *et al.*, 1990).

4.7.2.4 Vitrification in situ. - Comme pour les technologies de vitrification des déchets hors site, les technologies de vitrification in situ utilisent la chaleur obtenue généralement par l'énergie électrique pour fondre les sols et les boues contaminés dans une forme stable vitrifiée et de structure cristalline qui n'est pas facilement lixiviable (USEPA, 1991c; USEPA,1992b).

La figure 4.57 présente les intrants et les extrants des technologies de vitrification in situ.

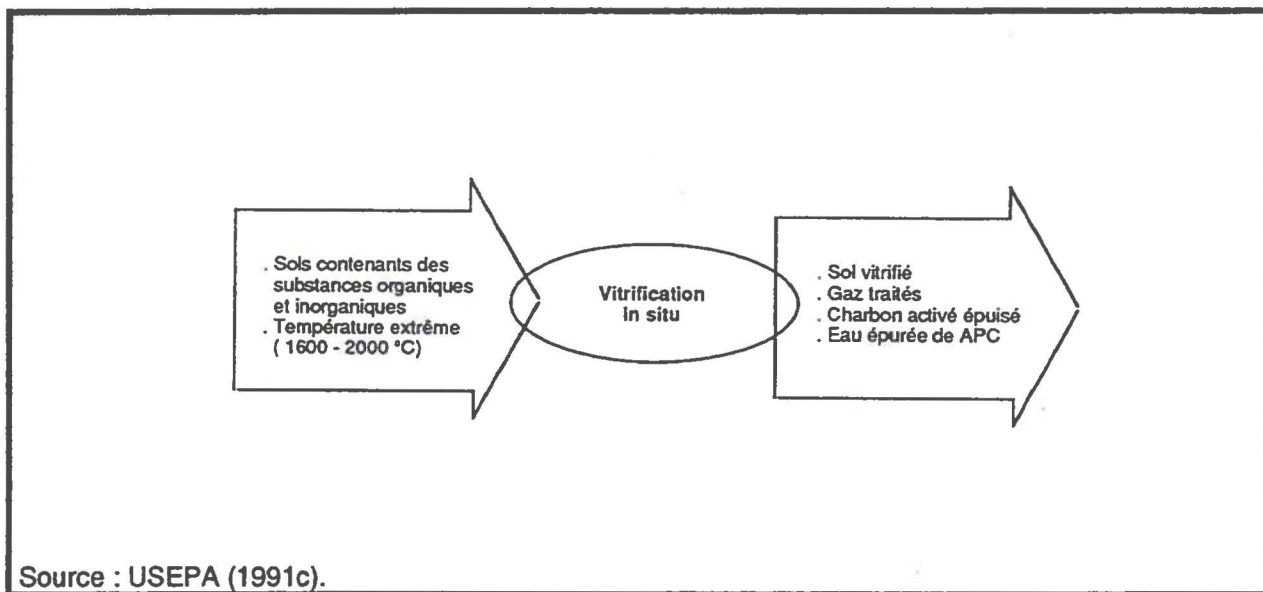


Figure 4.57 Intrants et extrants des technologies de vitrification in situ

La figure 4.58 présente une vue en coupe du procédé de vitrification in situ.

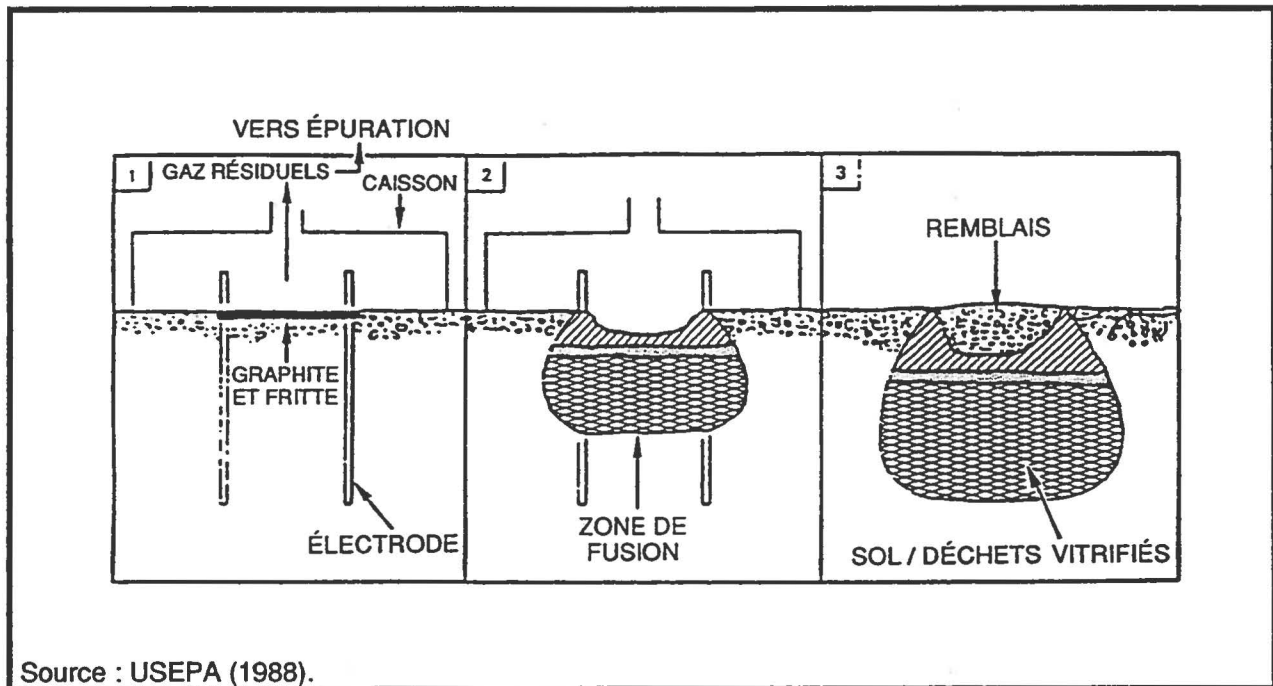


Figure 4.58 Vue en coupe d'un procédé de vitrification in situ

Dans la vitrification in situ, quatre électrodes disposées en carré sont introduites dans le sol jusqu'à des profondeurs de 5,40 m à 6 m. Pour démarrer le processus de vitrification, du graphite et du verre finement divisés (fritte) sont disposés entre les électrodes pour permettre au courant de circuler. Par la suite, le courant est conduit par le sol en fusion. La fusion se produit à des températures de l'ordre de 1600 à 2000 °C, ce qui permet de détruire les contaminants organiques par pyrolyse. Les sous-produits de la pyrolyse migrent vers la surface de la zone vitrifiée où ils sont détruits par oxydation. Les composés inorganiques se retrouvent dans la masse vitrifiée (Petitpas, 1990; USEPA, 1991c).

Un système fermé placé au-dessus de la zone de traitement permet de capturer les émissions gazeuses produites lors de la vitrification et de les diriger dans un système d'épuration avant rejet à l'atmosphère.

La figure 4.59 présente le schéma de principe du procédé de vitrification *in situ*.

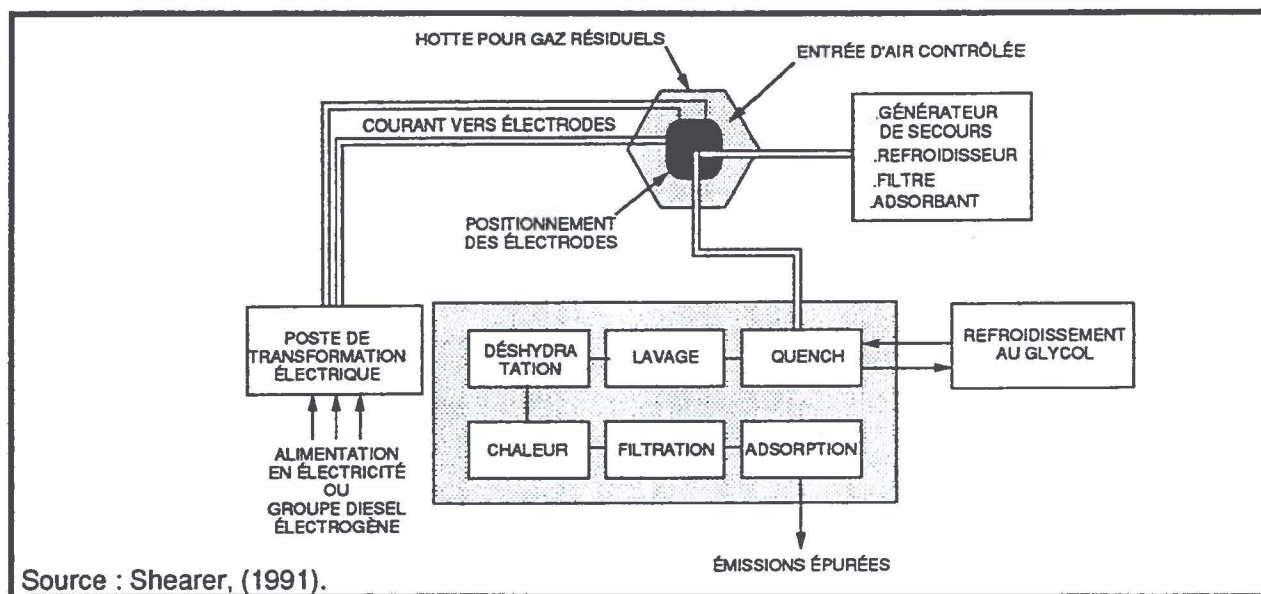


Figure 4.59 Schéma de principe du procédé de vitrification *in situ*

Tel qu'illustré sur cette figure, les composantes majeures du procédé sont :

- 1) un arrangement de quatre électrodes en molybdène;
- 2) une source d'énergie électrique (trois phases à 12 500 ou 13 800 V);
- 3) un système d'épuration des gaz comportant un laveur, un épurateur, un déséviculeur de brouillards acides, un déshumidificateur, des filtres et lits de charbon activé et
- 4) un système de refroidissement au glycol des eaux de trempe "quench" (Shearer, 1991).

4.7.2.5 Autres procédés. - Le *refroidissement du sol* est un procédé de stabilisation/solidification qui utilise des circuits de liquides réfrigérants installés dans le sol. Un système de réfrigération pompe le liquide réfrigérant dans le circuit. Ce procédé est destiné à réduire la perméabilité des sols contenant des déchets et ne traite pas les déchets. Les effets d'immobilisation sont nécessairement temporaires (Averett *et al.*, 1990).

Pour leur part, les technologies de *gel des sols* impliquent un abaissement des températures du sol par des agents réfrigérants (par exemple, glace sèche, c'est-à-dire du dioxyde de carbone solide) pour réduire la phase vapeur et la vitesse de volatilisation des composés volatils. Pour assurer la fiabilité à long terme du procédé, les matrices doivent nécessairement faire l'objet de traitements répétés.

Pour réduire les pertes de contaminants volatils présents dans les sols, la suppression de la volatilisation peut être efficace et nécessaire avant un traitement in situ. La réduction du volume de la phase vapeur peut être réalisée par modification de la structure des sols par compactage et ajout d'eau pour réduire les volumes d'air des pores du sol (Averett *et al.*, 1990).

4.7.3 Domaines d'application. - Les techniques de solidification/stabilisation utilisées séparément ou conjointement sont souvent retenues pour des travaux de dépollution des sols du fait que les métaux lourds ne peuvent être détruits et que leur extraction est un processus complexe. Les techniques de solidification/stabilisation peuvent être également efficaces pour certaines substances organiques (Averett *et al.*, 1990).

Tel que rapporté au tableau 4.25, les technologies de stabilisation/solidification présentent des efficacités démontrées ou potentielles jugées de bonnes à excellentes pour l'ensemble des contaminants inorganiques présents dans les sols ou les boues. En revanche, les experts considèrent qu'elles ont une efficacité allant de marginale à moyenne pour l'ensemble des composés organiques et réactifs.

Tableau 4.25 : Efficacité des technologies d'immobilisation par groupe de contaminants et par type de déchets

GROUPE DE CONTAMINANTS	STABILISATION/ SOLIDIFICATION	VITRIFICATION <i>IN SITU</i>
	Sols/Boues	Sols/Boues
ORGANIQUES		
Volatils halogénés	1	1
Semi-volatils halogénés	1	1
Volatils non halogénés	1	1
Semi-volatils non halogénés	1	1
BPC	1	1
Pesticides (halogénés)	1	1
Dioxines/Furannes	1	1
Cyanures organiques	1	1
Substances organiques corrosives	1	1
INORGANIQUES		
Métaux volatils	2	1
Métaux non volatils	2	1
Amiante	2	1
Matériaux radioactifs	2	2
Substances inorganiques corrosives	2	1
Cyanures inorganiques	2	1
RÉACTIFS		
Oxydants	1	1
Réducteurs	1	1

Légende

2: Efficacité de bonne à excellente; forte probabilité que la technologie soit efficace.

1: Efficacité de marginale à moyenne ou potentielle; des précautions doivent être prises dans le choix des technologies et les experts sont d'avis que cette technologie fonctionnera.

0: Efficacité nulle: les experts sont d'avis que la technologie ne pourra traiter ce type de déchets et de contaminants.

X: Effets néfastes potentiels.

Source : USEPA (1990; 1991c)

4.7.4 Avantages, limites et applications démontrées de chaque technologie.

- Le tableau 4.26 présente les principaux avantages, désavantages et applications/démonstrations de huit procédés de stabilisation/solidification soit :

- 1) procédé à base de ciment/pouzzolanes;
- 2) procédé à base de chaux;
- 3) procédé à l'argile modifiée organiquement;
- 4) procédé thermoplastique;
- 5) macro-encapsulation;
- 6) polymérisation;
- 7) procédé à base de silicates;
- 8) gel du sol.

Les deux premiers procédés à base de ciment/pouzzolanes et à base de chaux, sont très bien compris et démontrés depuis plusieurs années pour le traitement des sols et des liquides contaminés. Toutefois, l'ajout de produits de solidification augmente souvent les volumes impliqués. Ces procédés peuvent être toutefois affectés par de fortes concentrations de composés organiques et de matériaux à grains fins, telle l'argile (Intera Kenting, 1990).

Les techniques de stabilisation/solidification par des argiles modifiées organiquement, par macro-encapsulation, par des silicates et par le gel du sol visant à immobiliser les contaminants dans une matrice stable, sont encore au stade du laboratoire ou de banc d'essai pour les sols.

Les technologies utilisant des thermoplastiques, la macro-encapsulation ou la polymérisation ont été souvent utilisées jusqu'à présent pour les déchets de l'industrie nucléaire (CH2M Hill Engineering Ltd.,1992).

Tableau 4.26 Avantages, désavantages et applications des technologies d'immobilisation pour le traitement des déchets et des sols contaminés

TECHNOLOGIES	AVANTAGES	DÉSAVANTAGES	APPLICATIONS / DÉMONSTRATIONS
Solidification/Stabilisation · Ciment/pouzzolanes	<ul style="list-style-type: none"> Produit est structurellement sécuritaire. Réduction de la perméabilité du produit. Tests réussis pour le gel/dégel. 	<ul style="list-style-type: none"> Faible efficacité pour les substances organiques et la stabilité à long terme est inconnue. Augmentation du volume des déchets au-delà de 100 %. Produits peuvent empêcher la solidification; sulfate de calcium, borate et carbohydrates. Acides réagissent avec les carbonates et les hydroxydes pour affaiblir le béton. Nécessite un pré-traitement des déchets. 	<ul style="list-style-type: none"> Procédé au stade expérimental pour le traitement sur place. Procédé démontré pour le traitement de matériel excavé (sols) et liquides contaminés par des substances inorganiques.
Solidification/Stabilisation · Chaux	<ul style="list-style-type: none"> Produit non dommageable pour l'environnement. Seils formés à un pH neutre sont insolubles après précipitation. Produit peu dispendieux. 	<ul style="list-style-type: none"> Borate de sodium, sulfate de calcium, chromate et carbonate de potassium interfèrent avec la réaction. Huiles et graisses à haute concentration interfèrent avec la réaction. Déchets doivent être triés ou broyés pour uniformiser la taille des particules. Chaux vive est corrosive pour la peau. Problèmes de manutention de la chaux hydratée, une poudre fine. 	<ul style="list-style-type: none"> Utilisée en Allemagne depuis 1975. Technologie démontrée pour les métaux.
Solidification/Stabilisation · Argiles modifiées	<ul style="list-style-type: none"> Argiles modifiées doivent être homogénéisées pour une interaction optimale avec des déchets particuliers. 	<ul style="list-style-type: none"> Testée à l'échelle laboratoire seulement. 	<ul style="list-style-type: none"> Testée en laboratoire seulement.
Solidification/Stabilisation · Thermoplastiques	<ul style="list-style-type: none"> Produits solidifiés présentent de bonnes propriétés structurales et une faible perméabilité. Potentiel d'utilisation du produit dans la construction. 	<ul style="list-style-type: none"> Nécessite des mélangeurs spéciaux. Déchets doivent être compatibles avec la matrice. 	<ul style="list-style-type: none"> Technologie largement utilisée dans l'industrie nucléaire et utilisée pour traiter des sols contaminés par des HAP.
Solidification/Stabilisation · Macro-encapsulation	<ul style="list-style-type: none"> Contaminants isolés de l'environnement. Produits structurellement sécuritaires et imperméables. 	<ul style="list-style-type: none"> Produits traités doivent être enfouis. Mélangeurs sont très dispendieux. Revêtements nécessitent une protection contre la photodégradation. Émissions des COV doivent être suivies durant la chauffage initial. 	<ul style="list-style-type: none"> Technologie testée en banc d'essai pour les déchets organiques et inorganiques et déchets hautement toxiques.
Solidification/Stabilisation · Polymérisation	<ul style="list-style-type: none"> Produits solidifiés sont très stables. 	<ul style="list-style-type: none"> Produits traités doivent être enfouis. Possibilités de lixiviation si les déchets sont encapsulés dans le polymère. 	<ul style="list-style-type: none"> Technologies utilisées dans les déversements, dans l'industrie nucléaire et pour les déchets inorganiques.
Solidification/Stabilisation · Silicates	<ul style="list-style-type: none"> Produits rencontrent les tests de lixiviation standard. Variété de déchets peuvent être traités. 	<ul style="list-style-type: none"> Vitesse de solidification très lente. Pré-traitement des déchets par des émulsifiants ou des surfactants peut être requis. 	<ul style="list-style-type: none"> Application démontrée à l'échelle laboratoire pour plusieurs types de sol.
Solidification/Stabilisation · Gel du sol	<ul style="list-style-type: none"> Pas besoin de produits chimiques. Réduction des volumes de sol à traiter et réduction des coûts de traitement. Perméabilité du sol augmentée. Séparation possible des contaminants des sols. 	<ul style="list-style-type: none"> Émissions organiques volatiles dans l'atmosphère. Coûts de capitalisation et d'exploitation dispendieux comparativement aux autres solutions. Pas une solution de traitement à long terme. 	<ul style="list-style-type: none"> Technologie au stade du banc d'essai pour les métaux (Cd, Zn, Cu, Ni) et substances organiques volatiles (chloroforme, benzène, toluène, tétrachloroéthylène).

Source : Adapté de CH2M Hill Engineering Ltd (1991).

4.7.5 Avantages et limites pour le traitement des sédiments. - Les technologies de stabilisation/solidification appliquées aux sols contaminés conviennent aussi pour le traitement des sédiments ou des résidus solides des technologies de dépollution des sédiments. Le traitement des sédiments peut être réalisé in situ ou immédiatement après le dragage ou après consolidation et déshydratation des sédiments dans des bassins ou dans des cellules de confinement sécuritaire. Dans les bassins ou cellules, des additifs peuvent être ajoutés et mélangés avec les sédiments partiellement déshydratés en utilisant des épandeurs et aérateurs agricoles (Averett *et al.*, 1990).

Des analyses physiques et chimiques des sédiments à traiter doivent être faites avant de décider de l'utilisation des procédés de stabilisation/solidification. Selon l'USEPA (1991b), plusieurs tests sont disponibles : Toxicity Characteristics Leaching Procedure (TCLP), essais de lixiviation de l'American Standards Institute (ANSI), Standard Batch Leachate Test (SBLT) et tests physiques usuels pour déterminer la densité, la capacité portante, la perméabilité, la compressibilité, le degré d'humidité, etc. des produits une fois traités.

Les recherches faites depuis 1989 aux Pays-Bas dans le cadre du programme DTPP (Development Program Treatment Processes for Polluted Aquatic Sediments) ont démontré que les techniques d'immobilisation chimique ne sont pas toujours efficaces pour le traitement des sédiments. Les tests de lixiviation sur les produits résultants ont démontré que la lixiviation des contaminants n'est pas toujours réduite et qu'il arrive même qu'elle soit augmentée. Les recherches sont maintenant orientées sur les technologies d'immobilisation par voie thermique (vitrification) pour l'immobilisation des métaux lourds et des contaminants organiques présents dans les sédiments (Dillen et Bruggeman, 1992).

Tableau 4.27 Évaluation de la performance anticipée des technologies d'immobilisation pour le traitement des sédiments

TECHNOLOGIE	STADE DE DÉVELOPPEMENT	APPLICATION AUX SÉDIMENTS	DISPONIBILITÉ	COTE DE PERFORMANCE(**)		
				Efficacité	Application	Coûts
Ciment Portland (*)	Démontré	Banc d'essai	Oui	3	3	3
Encapsulation par chlorananes	Démontré	Non	Breveté	3	2	2
Gel du sous-sol	Conceptuel	Non	Développement	2	1	2
Stabilisation sur place	Démontré	Non	Oui	2	3	2
Macro-encapsulation	Pilote	Non	Breveté	3	1	2
Micro-encapsulation	Pilote	Non	Breveté	3	1	1
Polymérisation organique	Démontré	Non	Oui	3	1	2
Procédés brevetés	Démontré	Banc d'essai	Breveté	3	3	3
Réduction par vapeur de la porosité du sol	Démontré	Non	Développement	1	2	2
Refroidissement des sols	Démontré	Non	Développement	1	1	2
Sorption	Démontré	Non	Développement	3	2	3
Traitement pouzzolane/chaux	Démontré	Banc d'essai	Oui	3	3	3

Remarques :

* Les technologies en caractère gras ont été retenues par l'USACE et l'USEPA pour des projets de démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs.

** Voir tableau 3.3. pour la signification des cotes de performance.

Pour le moment, tel que montré au tableau 4.27, le procédé de stabilisation/solidification à base de *thermoplastiques* n'a pas encore fait l'objet de projets de démonstration pour les sédiments contaminés. Les coûts énergétiques et le fort contenu en eau des sédiments limitent sérieusement l'application d'un tel procédé pour le traitement des sédiments contaminés à moins que ceux-ci soient préalablement très bien déshydratés.

L'ajout de produits organiques rend l'utilisation de la technologie de stabilisation/solidification par des *polymères organiques* peu pratique pour les sédiments contaminés.

Les procédés de *sorption* peuvent être appliqués aux sédiments de la même façon que dans les procédés de stabilisation/solidification (Averett *et al.*, 1990).

Bien que les technologies de *vitrification* in situ peuvent s'appliquer à tous les types de sols, il existe cependant deux facteurs limitants à savoir le contenu en humidité (les matrices à traiter doivent être déshydratées, ce qui peut augmenter considérablement les coûts de traitement) et l'absence de matériaux susceptibles de se vitrifier (silices et oxydes d'aluminium). Dans le dernier cas, des matériaux fondants doivent être ajoutés aux sols (USEPA, 1991c).

Les procédés de stabilisation/solidification par *gel ou refroidissement* des sols sont inappropriés pour les sédiments contaminés; la technologie de *réduction des pores du sol* est actuellement encore au stade de conception en laboratoire et présente des applications limitées pour les sédiments (Averett *et al.*, 1990).

Tableau 4.28 Technologies d'immobilisation démontrées pour le traitement des sédiments contaminés

TECHNOLOGIE	PROMOTEUR (*)	LIEU DE DÉMONSTRATION		ÉCHELLE DE DÉMONSTRATION	TYPE DE CONTAMINANTS	RÉFÉRENCE
		PAYS	SITE			
.Non définie	Ebasco Services Inc.	É.-U.	Cold Spring, N.Y.	Banc d'essai Pilote	Métaux lourds Cd, Ni, Co	USEPA (1991b)
.Ciment Portland	Non défini	É.-U.	Port d'Indiana, IND.	Banc d'essai	BPC et autres contaminants organiques et métaux BPC	USEPA (1991b)
		É.-U.	Baie Everett, WA	Laboratoire		Averett et al. (1990)
.Ciment Portland/ cendres volantes/ chaux, poussières de fours d'asphalte	Non défini	É.-U.	Rivière Buffalo New York	Banc d'essai	Organiques	USEPA (1991b)
	Non défini	É.-U.	Wilmington, Delaware	Banc d'essai	Métaux lourds	USEPA (1991b)
	Atomic Energy Council of Canada Research	Canada	Port Hope, Ontario	Banc d'essai	Métaux lourds, inorganiques, radioactifs	WTC (1992a)
.Ciment Portland/ hydrates, glycols, cendres volantes	Non défini	Canada	Canal de Lachine, Québec	Laboratoire	Métaux et organiques (HAP, HCB, BPC)	CSL (1992b)
.Ciment/pouzzolane	Non défini	Canada	Canal de Lachine, Québec	Laboratoire	Métaux et organiques (HAP, HCB, BPC)	CSL (1992b)
.Chaux/pouzzolane	Non défini	É.-U.	Baie Everett, WA Port Indiana, IND	Laboratoire	BPC	Averett et al. (1990)
.Silicates et autres adjuvants .Silicates	Silicate Technology Corporation	É.-U.	Port New Bedford, Mass.	Banc d'essai	BPC et métaux lourds	Averett et al. (1990)
	Non défini	Canada	Canal de Lachine, Québec	Laboratoire	Métaux et organiques (HAP, HCB, BPC)	CSL (1992b)
	Non défini	Canada	Canal de Lachine, Québec	Laboratoire	Métaux et organiques (HAP, HCB, BPC)	CSL (1992b)
.Procédés brevetés	Chemfix Technology	É.-U.	Marathon Bathery Site	Banc d'essai	Métaux lourds	Averett et al. (1990)
.Fujibéton	c/o Poi-ConSystems Ltd	Japon	Rivière Walker, Lac BIWA, Port West Takasago	Pleine échelle	Métaux lourds et organiques	WTC (1992a)
.Krofachak	National solidification Inc.	Canada	Port de Hamilton, Ontario	Pleine échelle	Métaux lourds	WTC (1992a)
.Beak Aluminium	Beak Consultants Ltd.	Canada	Port de Hamilton, Ontario	Banc d'essai	Métaux lourds	Environnement Canada (1993)
.Dufferin	Dufferin Construction Company Inc.	Canada	Port de Hamilton, Ontario	Banc d'essai	Métaux lourds	WTC (1992a)
.Siallon	Siallon Technologies Inc.	Canada	Port de Hamilton, Ontario	Banc d'essai	Hydrocarbures, métaux	WTC (1992a)
.SILT	Silt N.V.	Europe	Anvers, Belgique	Pleine échelle	Métaux	WTC (1992a)
.TRIFIRMEX	Trident Engineering Associates Inc.	É.-U.	Port d'Indiana, IND	Banc d'essai	Métaux	WTC (1992a)
.Vitrification in situ	Geosafe Corporation	É.-U.	Port de New Bedford Mass.	Banc d'essai	BPC	USEPA (1991b) Averett et al. (199)

* Pour les adresses et numéros de téléphone des promoteurs, consulter l'Annexe C .

4.7.6 Technologies démontrées pour le traitement des sédiments. - Comme le tableau 4.28 l'indique, les procédés de stabilisation/solidification avaient en date de 1991 été testés aux États-Unis en banc d'essai, à échelle pilote ou à échelle réelle pour traiter les sédiments contaminés de cinq sites soit : site de la compagnie Marathon dans le village de Cold Spring, New York; estuaire de la rivière Acushnet à New Bedford, Massachusetts; canal de navigation et port d'Indiana, Indiana; rivière Buffalo, État de New York; site de la compagnie Hayby Chemical, Delaware.

Les contaminants traités à ces sites allaient des substances organiques, incluant les BPC, aux métaux tels le cadmium, le cobalt, le nickel, le plomb, le cuivre, le chrome et l'arsenic (USEPA, 1991a; USEPA, 1991b).

Les essais de *stabilisation/solidification* à l'échelle du laboratoire, réalisés avec des sédiments de la Baie Everett (Washington), du port Indiana (Indiana) et du port de New Bedford (Massachusetts) démontrèrent que plusieurs métaux étaient davantage immobilisés, mais que ce n'était pas nécessairement le cas pour tous les métaux lourds. La lixiviation des carbones organiques des sédiments de la baie Everett et du port d'Indiana n'était pas affectée par le procédé. Cependant, la lixiviation des BPC des sédiments du port de New Bedford fut réduite par des facteurs de 10 à 100. Les coûts pour la restauration des sédiments du port d'Indiana étaient estimés à 55 US \$/verge cube (Averett *et al.*, 1990).

Un procédé de stabilisation/solidification avec des pouzzolanes (cendres volantes) et de la chaux a été évalué à l'échelle du laboratoire pour traiter les sédiments de la baie Everett et du port d'Indiana. Pour plusieurs métaux, les résultats des essais de lixiviation furent cependant plus ou moins concluants (Averett *et al.*, 1990).

Sur une base de démonstration pleine échelle, les procédés de stabilisation/solidification ont surtout été utilisés au Japon (procédés brevetés) et aux États-Unis pour la baie Chesapeake (Trident/Firmfix).

Le procédé de la compagnie Silicate Technology Corporation a été testé sur les sédiments du port de New Bedford, tandis que le procédé Chemfix a fait l'objet de

banc d'essai pour traiter les sédiments du site de Marathon Battery. Pour sa part, la technologie Sil-B a fait l'objet de plusieurs essais à petite échelle sur les sédiments de la rivière Waka, au Japon.

Les techniques de solidification sont utilisées couramment au Japon pour consolider physiquement les sédiments avant les projets de construction en milieu aquatique (Averett et al., 1990).

Au Canada, les procédés de solidification/stabilisation ont fait l'objet de projets de démonstration avec les sédiments des ports Hope et de Hamilton, en Ontario et pour les sédiments du canal de Lachine, au Québec.

Dans le cadre du projet de dépollution et de réaménagement du canal de Lachine, la Division des technologies de restauration du Centre Saint-Laurent a procédé à la sélection et à la validation en laboratoire de procédés de traitement de sédiments contaminés applicables à la problématique du canal de Lachine. Six promoteurs utilisant des procédés de fixation physique et (ou) chimique et un promoteur utilisant une technologie de biodégradation/biofixation, ont participé à la phase validation en laboratoire et soumis une proposition pour la réalisation d'un essai pilote et du projet global de dépollution (Centre Saint-Laurent, 1992b).

Les essais en laboratoire ont démontré que le procédé de stabilisation/solidification à base de réactifs liquides composés d'hydrates réactifs, de glycols, de cendres volantes, de copolymères et de ciment Portland semblait le plus apte à traiter les sédiments du canal de Lachine, sur la base des performances physico-chimiques (tests de lixiviation) et géotechnique obtenues (tests de compressibilité, de conductivité hydraulique et de résistance au gel/dégel). Les résultats des essais en laboratoire démontrent que les sédiments traités présentent une très faible conductivité hydraulique, une grande résistance à l'effritement, une grande compressibilité, une forte alcalinité et une faible propension à lixivier.

Les essais en laboratoire démontrent que quatre autres technologies d'immobilisation testées (technique utilisant des agents de solidification, de l'eau d'hydratation, des plaques d'alumino-sulfates et silicates; technique utilisant un mélange

d'agents solides et liquides à base de silicates et autres adjuvants; technique utilisant des agents de solidification et d'imperméabilisation à base de ciment et de pouzzolanes; et technique utilisant des ciments et agents de solidification brevetés) ont également démontré une efficacité physico-chimique et géotechnique satisfaisante pour le traitement des sédiments du canal de Lachine. Les sédiments traités par le procédé à l'aide d'agents de solidification et d'imperméabilisation à base de ciment et de pouzzolanes présentent toutefois des propriétés géotechniques qui pourraient plus facilement favoriser le relargage et le biotransfert des contaminants.

L'autre procédé d'immobilisation par des agents à base de matières recyclées telles la calcite, du phosphogypse, de la chaux, du ciment et des cendres fines a été testé en laboratoire et les résultats ont démontré que les matériaux résultant du traitement étaient inaptes à une mise en dépôt dans le canal ainsi que dans une décharge contrôlée, compte tenu que les teneurs en contaminants retrouvées étaient supérieures aux critères de dépollution des sédiments et que les teneurs en contaminants retrouvées dans les lixiviats excédaient les normes de lixiviation du *Règlement sur les déchets solides* du gouvernement du Québec.

La technologie de vitrification in situ a été testée en banc d'essai pour immobiliser les BPC des sédiments du Port de New Bedford (Mass). Les concentrations de BPC dans les émissions étaient inférieures aux limites de détection, et les concentrations mesurées dans les lixiviats étaient inférieures aux normes de lixiviation prévues dans les règlements américains. Les bilans de masse indiquaient une destruction globale des BPC supérieure à 99,94 p. 100. Les coûts d'utilisation de cette technologie ont été estimés entre 290 et 330 US \$/tonne de sédiments (Averett *et al.*, 1990).

4.7.7 Technologies en démonstration pour le traitement des sédiments. -

Des 12 technologies de stabilisation/solidification considérées et évaluées, l'USEPA et l'USACE ont retenu six procédés pouvant être intéressants pour des projets de démonstration en vue de dépolluer les sédiments contaminés des secteurs prioritaires des Grands Lacs. Ces technologies sont l'encapsulation aux chlorananes; les procédés

de stabilisation in situ; les procédés à base de pouzzolanes; les procédés à base de chaux; les procédés brevetés; les procédés de sorption.

Le tableau 4.29 présente pour chaque technologie, le site et l'échelle de la démonstration ainsi que les contaminants visés.

La faisabilité de ces technologies a été considérée meilleure que les technologies chimiques ou d'extraction du fait qu'elles étaient plus faciles à contrôler. L'opportunité d'utiliser ces technologies dans des bassins de sédimentation ou de confinement des sédiments est également avantageuse. Les coûts de ces procédés sont généralement inférieurs à 100 US \$/verge cube (Averett *et al.*, 1990).

Les technologies de gel des sols, de macro-encapsulation et la micro-encapsulation thermoplastique n'ont pas été jugées intéressantes pour le traitement des sédiments pour les raisons mentionnées précédemment.

4.7.8 Technologies retenues pour des projets de dépollution des sédiments.

- Mis à part le Japon qui utilise les technologies de stabilisation/solidification surtout à des fins de construction, la présente revue documentaire n'a pas permis d'identifier des sites où ces technologies avaient été retenues pour la dépollution complète des sédiments, à l'exception de la vitrification in situ.

En effet, suite aux projets de démonstration concluants pour le traitement des sédiments, la technologie de vitrification in situ développée par Batelle, est présentement considérée pour restaurer deux sites (Sangamo/Crab Orchard National Wildlife Refuge (IL) et Crystal Chemical (TX) aux États-Unis dont les sols et les sédiments sont contaminés par les BPC et des métaux lourds tels le plomb, le cadmium et l'arsenic. Les projets de démonstration à ces deux sites étaient en 1992 encore au stade de la conception (USEPA, 1991c).

Tableau 4.29 Technologies d'immobilisation en démonstration pour le traitement des sédiments contaminés des Grands Lacs

TECHNOLOGIE	PROMOTEUR (*)	LIEU DE DÉMONSTRATION		ÉCHELLE DE DÉMONSTRATION	TYPE DE CONTAMINANTS	RÉFÉRENCE
		PAYS	SITE			
Stabilisation/ solidification . Non définie	Siallon Technologies Inc.	Canada	Port de Hamilton, Thunder Bay, Ontario	Banc d'essai	Chlorophénols HAP	WTC (1992) Environnement Canada (1993)
Stabilisation/ solidification . Sur place	Non défini	É.-U.	Port de Sheboygan	Banc d'essai/pilote	BPC	USEPA (1992a)
Stabilisation/ solidification . Non définie	Non défini	É.-U.	Rivière Buffalo Rivière Grand Calumet	Banc d'essai/pilote	HAP, H & G BPC, HAP, H & G	USEPA (1992a)
. Non définie	Ensotech	Canada	Canal Welland	Banc d'essai	HAP	Environnement Canada (1993)

* Pour les adresses et les numéros de téléphone des promoteurs identifiés, consulter l'Annexe C

4.7.9 Conclusions. - Les sections précédentes ont montré que les technologies de stabilisation/solidification appliquées aux sols contaminés conviennent aussi pour le traitement des sédiments ou des résidus solides résultant des technologies de dépollution des sédiments. Le traitement des sédiments peut être réalisé in situ ou immédiatement après le dragage ou après consolidation et déshydratation des sédiments dans des bassins ou dans des cellules de confinement sécuritaire.

Les technologies de stabilisation/solidification présentent des efficacités démontrées ou potentielles jugées de bonnes à excellentes pour l'ensemble des contaminants inorganiques présents dans les sols ou les boues. En revanche, les experts considèrent qu'elles ont une efficacité allant de marginale à moyenne pour l'ensemble des composés organiques et réactifs.

Pour les sédiments, les résultats des essais réalisés jusqu'à présent semblent contradictoires. En effet, les projets de démonstration réalisés en Hollande ont démontré que les techniques d'immobilisation chimique ne sont pas toujours efficaces pour le traitement des sédiments. Les tests de lixiviation sur les produits résultants ont démontré que la lixiviation des contaminants n'est pas toujours réduite et qu'il arrive même qu'elle soit augmentée.

De même, les essais réalisés aux États-Unis sur des sédiments ont montré que plusieurs métaux lourds étaient immobilisés, mais que ce n'était pas nécessairement le cas pour tous les métaux. Six procédés font quand même présentement l'objet de projets de démonstration en vue de la dépollution des sédiments des Grands Lacs, en raison surtout de leur intérêt pour le traitement des sédiments dans les bassins de sédimentation ou de confinement en milieu terrestre.

D'autre part, les essais réalisés en laboratoire pour les sédiments du canal de Lachine ont démontré que plusieurs des procédés de stabilisation/solidification testés semblaient convenir pour les sédiments du canal sur la base des performances physico-chimiques (tests de lixiviation) et géotechniques observées (tests de compressibilité, de conductivité hydraulique et de résistance au gel/dégel).

Comme en Hollande, les projets de démonstration réalisés aux États-Unis ont démontré que la technologie d'immobilisation par vitrification in situ semblait efficace et très prometteuse pour le traitement des sédiments contaminés.

4.8 Chaînes de traitement

En raison des limites des diverses technologies pour traiter des sédiments contaminés à la fois par des métaux lourds et des composés organiques, les recherches et les projets de démonstration de traitement de sédiments et de sols contaminés sont de plus en plus orientés vers le développement de chaînes de traitement intégrées pouvant répondre à l'ensemble de la problématique d'un site, compte tenu que la contamination retrouvée est souvent de nature organique et inorganique. De plus, la plupart de ces technologies requièrent un ou plusieurs des types de pré-traitement et doivent être couplées avec des technologies de traitement des effluents qui seront sommairement présentées à la section 5.

Les chaînes de traitement doivent non seulement être considérées pour traiter des contaminations spécifiques mais également en termes de complémentarité. Par exemple, dans les cas d'une contamination des sédiments par des métaux lourds et des substances organiques (BPC, par exemple), il pourrait être intéressant de déshydrater les sédiments pour les conditionner pour un traitement d'extraction des métaux. Les sédiments traités pourraient alors être incinérés pour détruire les BPC. Ainsi, dans cet exemple de chaîne de traitement hypothétique, la déshydratation des sédiments réduirait les coûts d'incinération tandis que l'enlèvement des métaux des sédiments simplifierait le traitement des gaz d'incinération (USEPA, 1991b).

De telles chaînes de traitement pour les sédiments ont déjà été testées aux Pays-Bas pour traiter des sédiments contaminés par les HAP. Les résultats de ces essais démontrent que la surverse de l'hydrocyclone peut être traitée biologiquement dans un bassin d'aération tandis que la sousverse peut être traitée soit par extraction par solvant (triéthylamine), soit par biodégradation si les contaminants ne sont pas trop fortement adsorbés sur les particules. Les sédiments peuvent aussi être réutilisés sans autre traitement s'ils ne sont pas fortement pollués (USEPA, 1991b).

La figure 4.60 illustre le schéma de principe d'une chaîne de traitement utilisée en Hollande pour les sédiments contaminés.

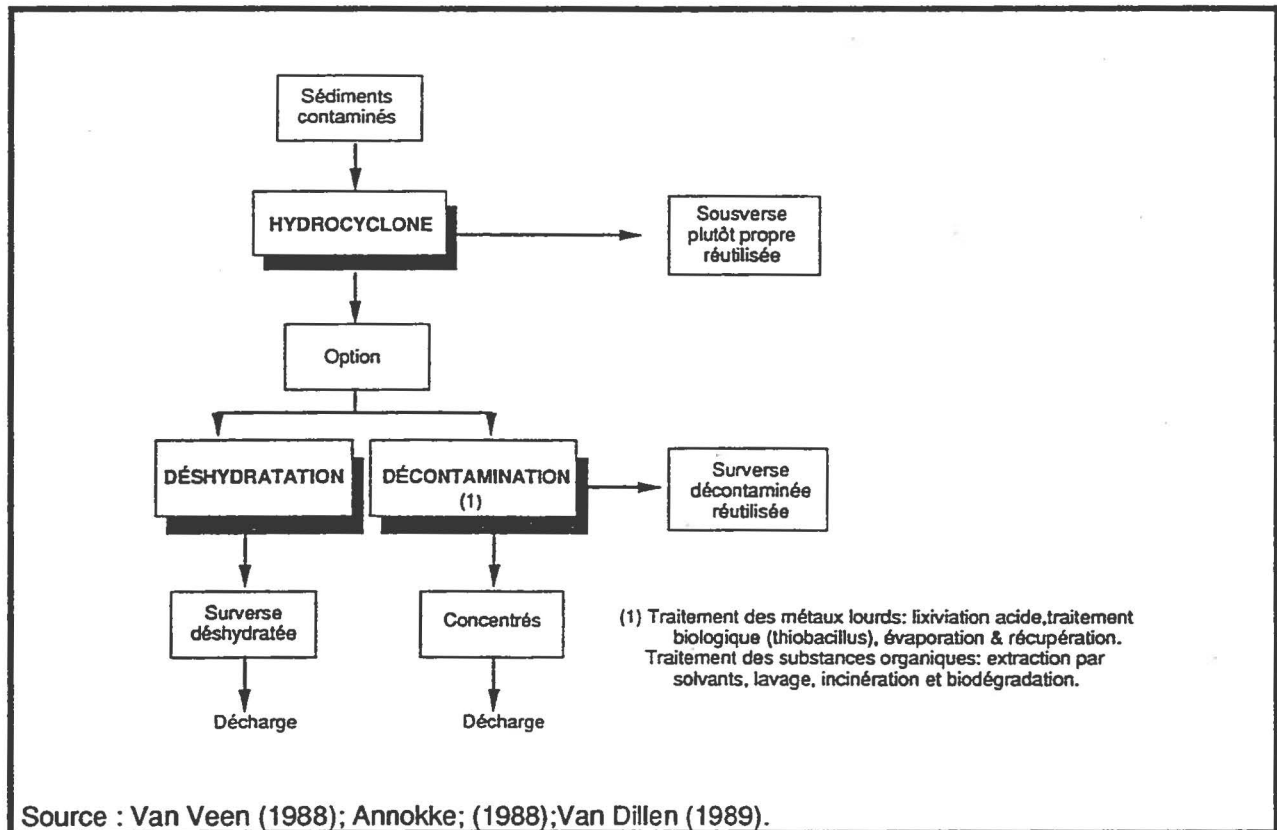


Figure 4.60 Schéma de principe d'une chaîne de traitement utilisée en Hollande

Pour compléter la figure 4.60, le tableau 4.30 présente les technologies de traitement qui font actuellement l'objet de projets de recherche et de démonstration aux Pays-Bas pour le traitement des sédiments après que ces derniers aient préalablement subi une phase de séparation par hydrocyclonage et une déshydratation. Le tableau précise la fraction (totale, légère ou lourde) des sédiments qui est traitée par chaque technologie et la nature des contaminants traités. D'autres technologies non listées dans ce tableau (extraction aux solvants, flottation des parties légères, séparation par électromagnétisme et incinération) sont aussi utilisées en Hollande pour le traitement des sédiments (Dillen et Bruggeman, 1992).

Tableau 4.30 Technologies de dépollution des sédiments en démonstration en Hollande

TECHNOLOGIE	FRACTION DES MATÉRIAUX			CONTAMINANT
	Totale	Légère	Lourde	
Biologique				
Épandage	X			HAP, huiles
Bassin d'aération		X		HAP, huiles
Bioréacteur	X		X	HAP, huiles
Chimique				
Extraction avec de l'acide	X	X	X	Métaux lourds
Extraction avec des agents complexants		X	X	Métaux lourds
Oxydation avec du peroxyde d'hydrogène	X			HAP, huiles
Extraction physico-chimique				
Flottation			X	Micro-contaminants organiques, métaux lourds
Séparation par gravité			X	Micro-contaminants organiques, métaux lourds

Source: Dillen et Bruggeman (1992).

Tel que mentionné précédemment, une chaîne de traitement a été également testée au Canada durant l'été 1992 sur les sédiments du Port de Toronto. Cette unité de traitement a été conçue et construite par SNC-Lavalin pour le traitement des sols portuaires de granulométrie variée caractérisés par une contamination en métaux lourds et en substances organiques. Cette unité de traitement, qui est maintenant opérée par THC (Toronto Harbour Commission) comprend trois technologies en série assemblées dans un bâtiment temporaire avec également des unités de traitement physico-chimique des eaux et d'épuration des gaz (laveur, filtre au charbon activé et biofiltre).

La figure 4.61 illustre le schéma simplifié de cette chaîne de traitement.

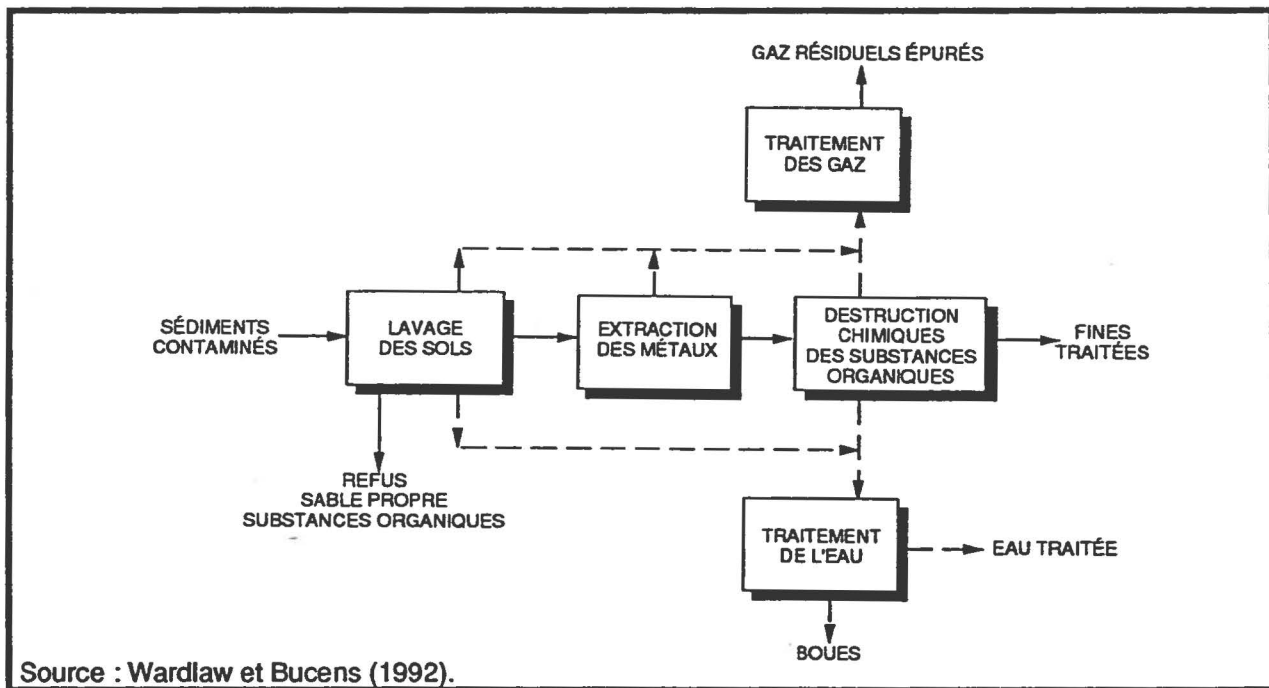


Figure 4.61 Schéma de principe de la chaîne de traitement de l'unité du Toronto Harbour Commission (THC)

Tel qu'illustré sur cette figure, cette chaîne de traitement comporte les trois technologies suivantes en série : lavage des sols (procédé Bergmann), extraction des métaux (procédé Méthanétic) et biotraitement (bioréacteur de SNC-Lavalin). Ces trois procédés ont déjà été décrits précédemment. Au moment de l'édition du présent document, les résultats de ces essais n'avaient pas encore été publiés (Wardlaw et Bucens,1992).

4.9 Confinement sécuritaire

Les technologies de confinement sécuritaire visent à prévenir que les composés dangereux présents dans les matrices contaminées soient libérés dans le milieu et menacent les organismes vivants, incluant les humains. Cette contamination peut se faire par contact direct avec les déchets contaminés, par volatilisation dans l'air ou par lixiviation dans les eaux de surface et souterraines.

Dans le cas des sédiments contaminés présents au fond des plans d'eau, les risques de remise en suspension et en solution des contaminants peuvent survenir par des phénomènes naturels (p. ex., vents, vagues, marées, crues) et artificiels (p. ex., dragage, circulation des navires). Lorsque ces sédiments sont dragués et déposés en milieu terrestre, les risques de contamination du milieu environnant sont similaires à ceux posés par les sols contaminés.

Dans les sections suivantes, les technologies de confinement sécuritaire de sédiments contaminés en milieu littoral et terrestre sont succinctement présentées.

4.9.1 Principe de traitement. - Les technologies de confinement des sédiments en milieu littoral ou en milieu terrestre visent essentiellement leur encapsulation dans des enceintes étanches pour éviter la volatilisation des contaminants dans l'atmosphère et la contamination des eaux de surface et souterraines environnantes par les précipitations et les eaux de lixiviation en contact avec les sédiments. Elles permettent également d'empêcher le contact entre la végétation, la faune, les humains et les contaminants.

4.9.2 Technologies disponibles

4.9.2.1 Cellules de confinement en milieu terrestre. - Les cellules de confinement en milieu terrestre sont simplement des bassins de sédimentation endigués sur la terre ferme et habituellement érigés à proximité du site des travaux.

La figure 4.62 illustre schématiquement le concept.

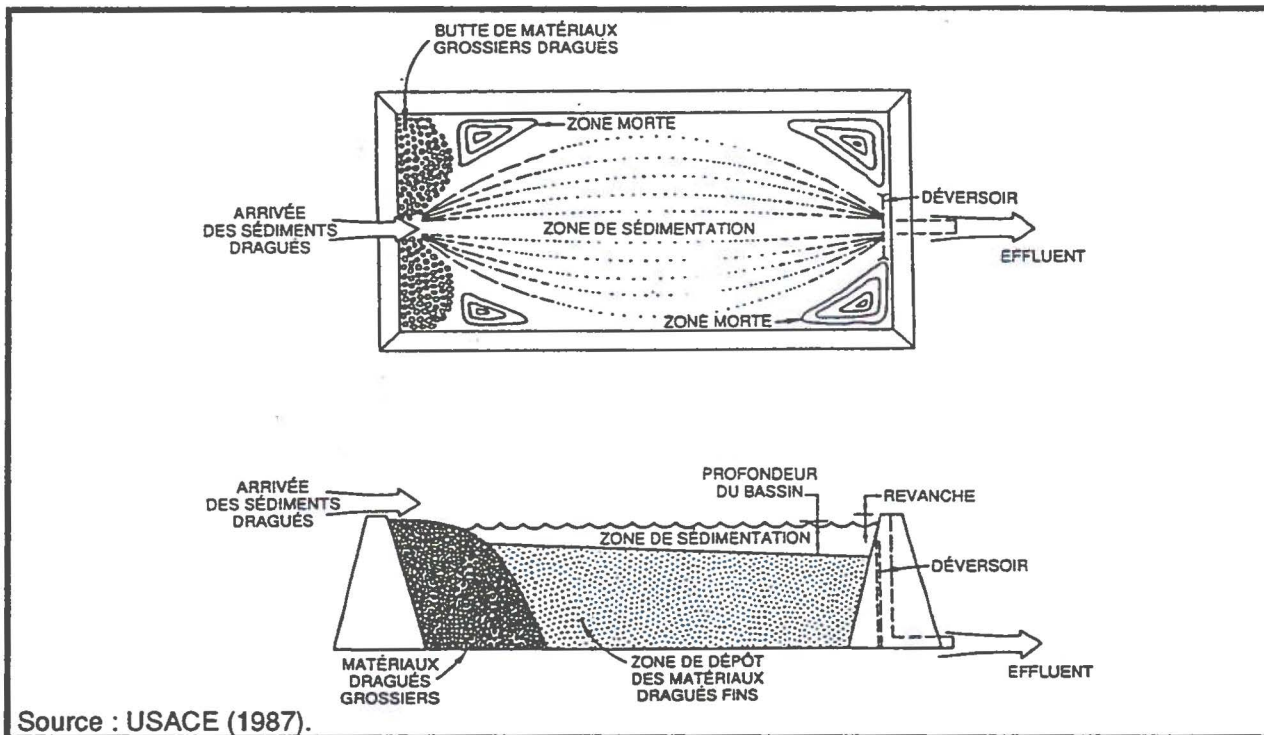


Figure 4.62 Diagramme conceptuel d'un cellule de confinement en milieu terrestre

La mise en dépôt des sédiments contaminés dans des bassins ou dans des cellules sécuritaires demeure actuellement la technologie la plus utilisée en Amérique du Nord et en Europe. En effet, ces bassins initialement conçus pour retenir les solides en suspension des matériaux dragués avec des dragues hydrauliques, de façon à obtenir des concentrations acceptables de solides en suspension avant leur évacuation des bassins de sédimentation, sont encore utilisés pour la mise en dépôt de la moitié des sédiments dragués dans les Grands Lacs. Comme ces bassins sont conçus pour

retenir le maximum de particules fines contenues dans les sédiments et que la plupart des contaminants présents dans les sédiments sont associés aux particules fines et solides, elles demeurent encore relativement efficaces pour le confinement de sédiments contaminés (Averett *et al.*, 1990).

De plus, comme ces aménagements existent depuis plusieurs années déjà, des mesures de contrôle environnemental variées existent pour minimiser les pertes de contaminants (technologies de traitement des effluents et des eaux de lixiviation, utilisation de membranes imperméables sur le fond et les parois des digues, pompage des eaux souterraines, drainage de surface, recouvrement des sédiments par un mélange de ciment, de bentonite, de membranes de polyéthylène à haute densité et (ou) de couches d'argile et de terre végétale, etc. .

La figure 4.63 présente une vue en coupe d'une cellule de confinement de sédiments contaminés isolés par des membranes imperméables, des matériaux de recouvrement, et dotée de systèmes de collecte et de traitement des eaux de lixiviation et de ruissellement.

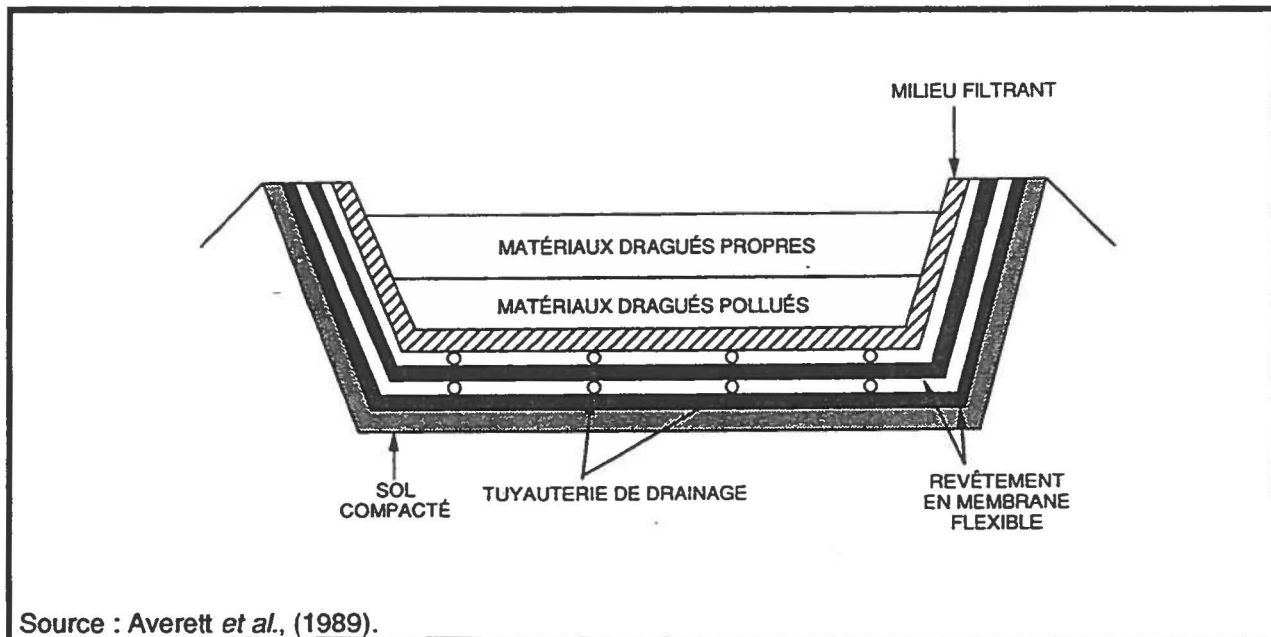


Figure 4.63 Vue en coupe d'une cellule de confinement sécuritaire en milieu terrestre

La capacité de stockage de ces cellules de confinement peut aller d'une centaine de milliers de mètres cubes à plus d'un million. Pour la mise en dépôt des sédiments fortement contaminés du port de Rotterdam, le gouvernement néerlandais a autorisé la construction d'une cellule sécuritaire de confinement imperméabilisée avec une membrane à haute densité de 2 mm d'épaisseur, d'une capacité de 1,2 million de mètres cubes. Le site s'étend sur une superficie de 29 hectares et est entouré d'une digue de 3,3 m de hauteur. La qualité des eaux souterraines et des eaux de lixiviation est continuellement surveillée. Selon le certificat d'autorisation émis en 1985, un plan de traitement des sédiments contaminés qui y sont temporairement entreposés doit être soumis, après 10 ans d'exploitation.

4.9.2.2 Décharges contrôlées. - Les sédiments faiblement contaminés ou les résidus des technologies de traitement peuvent être éliminés dans des décharges contrôlées où ils peuvent être enfouis ou utilisés comme matériau de recouvrement dépendant du niveau de contamination résiduelle. En raison de leur fort contenu en eau, les sédiments doivent être au préalable déshydratés et ils doivent faire l'objet de tests de lixiviation pour démontrer que les normes du *Règlement sur les déchets solides* du gouvernement du Québec sont rencontrées.

4.9.2.3 Sites d'enfouissement à sécurité accrue ou maximale - Les sédiments contaminés peuvent être éliminés dans des sites d'enfouissement à sécurité maximale ou accrue déjà autorisés pour l'enfouissement des sols contaminés. Au Québec, un seul site de type à sécurité maximale, opéré par Cintec Environnement Inc., à Ville LaSalle, est autorisé à recevoir des sols contaminés.

A cet endroit, les sols contaminés sont déposés dans une cellule construite avec deux couches de membrane géosynthétique séparées par une couche de drainage constituée de sable. Cette cellule peut contenir jusqu'à 300 000 m³ de sols contaminés par des substances organiques et inorganiques. Les eaux de lixiviation font l'objet d'un traitement physico-chimique avant leur rejet à l'égout. Comme l'humidité des

sols ne doit pas excéder 40 p. 100 pour qu'ils soient acceptés, les sédiments doivent être déshydratés au préalable.

4.9.3 Avantages et limites des technologies de mise en dépôt sécuritaire. -

Les avantages et les limites des différentes technologies de mise en dépôt sécuritaire comparativement aux technologies de traitement des sédiments ont été sommairement présentés au chapitre 2 traitant des scénarios de dépollution.

4.9.4 Conclusions. -

En attendant que des technologies efficaces et économiques soient clairement démontrées pour le traitement de grands volumes de sédiments contaminés, les technologies de confinement sécuritaire en milieux aquatique, riverain et terrestre devraient continuer d'être privilégiées dans les scénarios de dépollution de sédiments contaminés. L'exemple le plus frappant est celui de la Hollande. Bien que les technologies par voie biologique, par extraction physico-chimique et par voie chimique, thermique et d'immobilisation aient connu des progrès remarquables ces dernières années pour le traitement des sédiments, les technologies de confinement sécuritaire continuent d'être les solutions privilégiées dans ce pays en raison des grands volumes de sédiments à traiter annuellement et des coûts exorbitants liés aux technologies de traitement.

4.10 Ensemble des technologies en cours de démonstration pour l'assainissement des Grands Lacs

La figure 4.64 présente l'ensemble des technologies biologiques, d'extraction, chimiques, thermiques, d'immobilisation et de confinement sécuritaire qui ont fait l'objet d'une évaluation de performance anticipée sur le plan de l'efficacité, des coûts d'utilisation et du potentiel d'application par le gouvernement *américain* pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs. Les critères d'évaluation et de sélection de ces technologies qui furent considérés par l'USEPA et l'USACE ont été présentés au chapitre 3.

Comme pour les technologies de pré-traitement, les technologies de traitement sont classées en abscisse selon leur niveau de coûts anticipés et en ordonnée, selon leur stade actuel de développement. L'efficacité anticipée est également notée. Les technologies retenues pour des projets de démonstration avec les sédiments des Grands Lacs sont précisées en caractère gras.

Du côté *canadien*, les technologies qui ont fait ou font l'objet de projets de démonstration telles qu'elles ont été citées précédemment sont par groupe de technologie :

- biotechnologie : - procédé Dearborn
 - procédé de l'Institute of Gas Technology
 - bioréacteur de SNC-Lavalin
- extraction : - unité de lavage Altech
 - unité d'extraction Beak
 - unité de lavage Bergmann
 - unité d'extraction Tallon
 - unité de lavage BioGenesis
 - unité d'extraction Cognis

- unité Méthanétic
- chimique : - procédé EcoLogic
- thermique : - procédé AOSTRA-Taciuk
- procédé X*TRAX
- immobilisation: - procédé Ensotech
- procédé Siallon

COÛTS	APPLICATION (*)			
	1 - EN DÉVELOPPEMENT	2 - BANC D'ESSAI	3 - PILOTE	4 - COMMERCIALE
US \$/v.c. 1 200 \$ ET PLUS	Incinérateur à arc plasma (3) ** Incinérateur PYRETRON (3) Incinérateur par sels fondus (4) Incinérateur à injection liquide (3) Procédé de bouletage LURG (3) Vitrification par verre fondu (3) Micro-encapsulation thermo-plastique (3) Chauffage à fréquence radio (3) Grillage (3) Séparation intégrée vapeur / steam (2)	Oxydation au point critique de l'eau (4) *** Pyrolyse par pyroplasma (3) Réacteur pyrolytique de pointe (4) Vitrification sur place (4) Incinérateur à infrarouge (4) Pyrométallurgie (2) Incinérateur à lit fluidisé (4) Incinérateur à plateaux (4) Incinérateur de scorfication à haute température (4) Pyrolyse Haut fourneau (3) Réacteur à flammes (3) Fours industriels (3) Sollex (kérosène) (3) Electro-acoustique (2)	Vitrification (4)	
100 \$ À 200 \$	Polymérisation organique (3) Système Ozonics (2) O.H. MATERIALS (3) Hydrolyse chimique (2) Système C.F. (CO2) (3) Photolyse (2) Lavage HARBAUER (3) Réduction des métaux (2) Thionation (1) Procédé CROW (2) Oxydation des substances inorganiques (2) Lavage ACUREX (3) Extraction LARC (3) Réduction des substances organiques (1) Extraction par la vapeur (2) Traitement HEIDEMIJ (2) Macro-encapsulation (3) Lavage des sols CREP (2) Lavage des sols HARMON (3) Gel du sous-sol (2) Extraction sous vide à la vapeur sur place (2)	Surfactants (3) Lavage thermique à basse température (3) Unité de lavage des sols EPA (2) Incinérateur à four rotatif (4) Lavage acide (3) Système CF (propane) (3) Lavage des sols BIOTROL (2) Lavage des métaux MTA REMEDIAL RES. INC. (2) Aération / extraction mécanique (2) Oxydation des substances organiques (3) Extraction à basse énergie (3) Compostage (2) Substitution nucléophile (4) Encapsulation par chlorures (3) Digesteur anaérobie (2) Chélation (3) Réduction de la porosité du sol (1)	Incinérateur à lit mobile (4) Stabilisation sur place (2) EcoLogic (4) Extraction BEST (4) Procédé AOSTRA-Taciuk (3)	
20 \$ À 100 \$	Procédé enzymatique (2) Bio-réacteurs (3)	Sorption (3)	Traitement biologique / aérobie (3) Oxydation par air humide (2) Ciment Portland (3) Pouzzolanes à base de chaux (3) Procédés brevetés (3) Traitement biologique / anaérobie (3)	
20 \$ ET MOINS				

Remarque: * Cote de performance, voir tableau 3.3 pour la légende.
 ** Efficacité (3), voir tableau 3.3 pour la légende.
 *** Les procédés en caractère gras ont été retenus pour des projets de démonstration pour l'assainissement des sédiments des Grands Lacs.

Source : Adapté de Averett et al. (1990).

Figure 4.64 Classification des 79 technologies de traitement des sédiments évaluées et retenues par l'USEPA et l'USACE pour des essais de traitement

5 TRAITEMENT DES EFFLUENTS OU DES LIXIVIATS

5.1 Objectifs

Si la plupart des projets de dépollution des sols requièrent la présence des unités de traitement des eaux usées pour dépolluer les effluents du traitement ou les eaux de ruissellement, la présence de ces unités est encore plus justifiée dans des projets de dépollution de sédiments contaminés. En effet, la forte teneur en eau des sédiments et l'eau prélevée par les équipements de dragage lors de l'extraction, en particulier par les dragues hydrauliques, nécessitent le traitement des effluents ou lixiviats. En conséquence, il est important de s'assurer que les technologies de traitement des effluents ou lixiviats rencontrent les objectifs suivants :

- a) assurer une qualité des effluents qui soit conforme aux normes et aux critères de qualité de l'eau applicables suivant les diverses réglementations;
- b) éviter que la contamination ne se propage à d'autres milieux;
- c) être compatibles avec les options retenues pour l'excavation, le traitement et (ou) la mise en dépôt des sédiments;
- d) présenter des coûts de capitalisation et d'exploitation acceptables (Averett *et al.*, 1990) .

Pour rencontrer ces objectifs dans les projets de dragage, il est habituellement nécessaire de faire appel à une chaîne de traitement en raison de la composition variable tant au plan qualitatif (teneurs variables en contaminants à la fois conventionnels, inorganiques et organiques) qu'au plan quantitatif (volumes et degrés de contamination) des effluents générés par le pré-traitement des sédiments, leur traitement et (ou) la mise en dépôt. Les procédés usuels de traitement des eaux usées utilisés dans l'industrie conviennent généralement pour les effluents des projets de dragage (Averett *et al.*, 1990).

5.2 Procédés de traitement des effluents ou lixiviats

Pour les projets d'assainissement des sédiments des Grands Lacs, les technologies de traitement des effluents ou lixiviats qui ont été considérées par

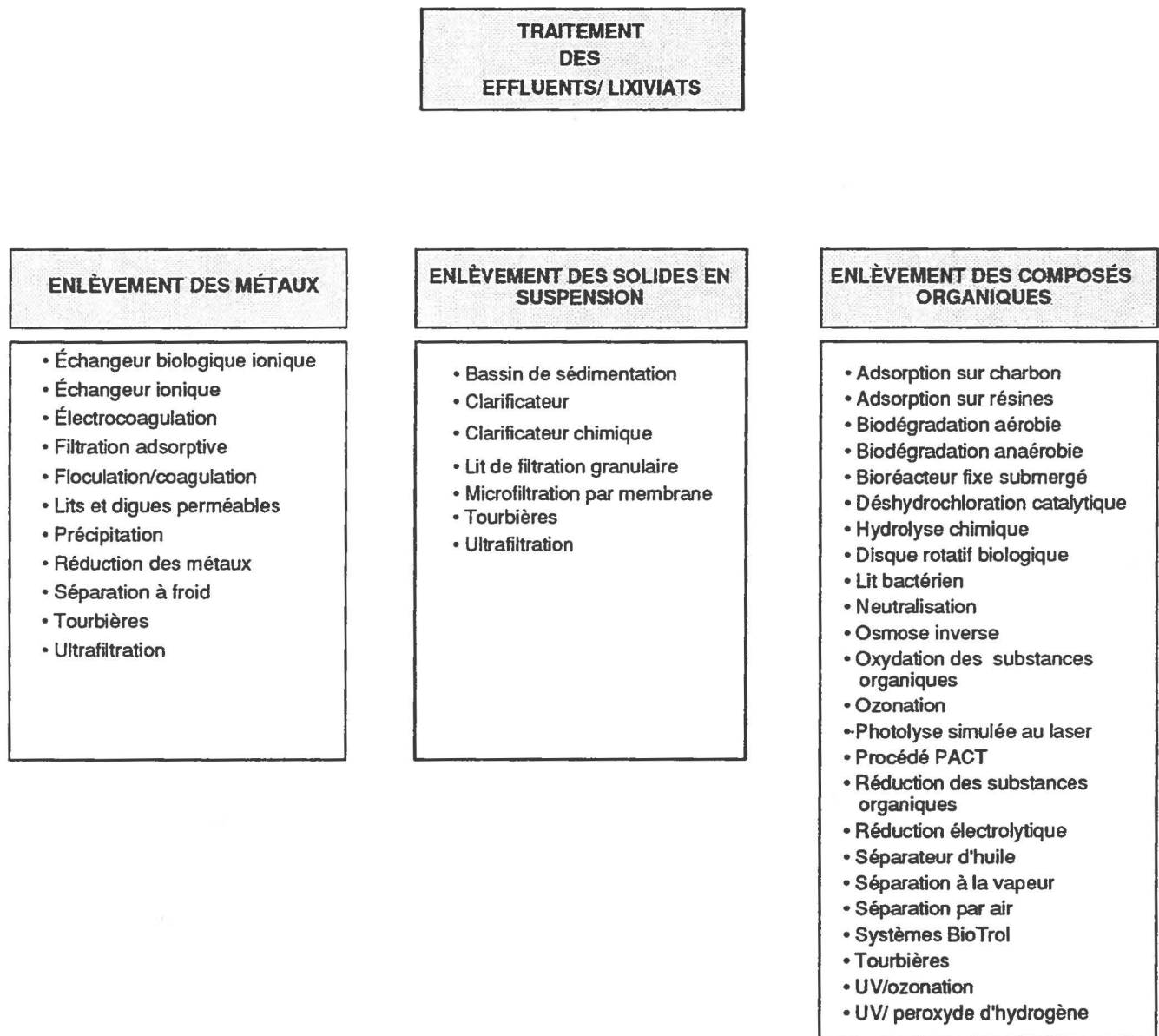
l'USACE et l'USEPA, ont été regroupées en trois catégories, à savoir : enlèvement des métaux, enlèvement des solides en suspension et enlèvement des substances organiques, tel qu'illustré à la figure 5.1.

La plupart de ces technologies concentrent les contaminants tels les métaux lourds et les composés organiques dans un autre milieu ou matrice, généralement dans les boues, matrice qui doit être ensuite traitée ou éliminée de façon sécuritaire. Les contaminants conventionnels (éléments nutritifs, ammoniac, huiles et graisses et DBO) potentiellement problématiques dans les projets de dragage, peuvent être enlevés en utilisant la plupart des technologies de traitement des substances organiques dissoutes et, de ce fait, ces technologies ne seront pas discutées dans le présent document.

5.2.1 Enlèvement des métaux. - Comme pour les technologies d'enlèvement des particules, la majorité des technologies qui pourraient être utilisées pour enlever les métaux dans les sédiments dragués sont utilisées couramment pour le traitement des eaux usées industrielles. Parmi les technologies énumérées à la figure 5.1, seules quelques technologies (échangeur biologique ionique, électrocoagulation, filtration adsorptive, ultrafiltration et tourbières naturelles ou artificielles) sont des concepts relativement nouveaux en voie de démonstration pour l'enlèvement des métaux.

5.2.2 Enlèvement des solides en suspension.- Compte tenu que la plupart des contaminants libérés pendant les opérations de dragage et le traitement des sédiments sont associés aux solides en suspension, les technologies d'enlèvement des solides en suspension s'avèrent non seulement importantes pour réduire la turbidité des eaux mais aussi pour retirer de l'eau les particules auxquelles sont associés la majorité des contaminants. Quant aux contaminants métalliques et organiques pouvant être dissous dans l'eau, ils doivent être enlevés par un autre traitement plus approprié.

5.2.3 Enlèvement des substances organiques.- Les contaminants organiques dans les effluents ou lixiviats de sédiments contaminés peuvent être traités de façon biologique, chimique ou physique. L'efficacité et l'utilisation des technologies présentées à la figure 5.1 dépendent des teneurs en contaminants et des volumes d'effluents à traiter.



Source : Averett *et al.* (1990).

Figure 5.1 Options de traitement des effluents et lixiviats considérées pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs

5.3 Applications et limites des procédés de traitement des effluents ou des lixiviats

Les techniques de floculation à l'aide de substances inorganiques et de polymères se sont avérées efficaces pour *enlever les métaux* associés aux solides en suspension dans les effluents de dragage. Toutefois, ces techniques n'ont pas encore été démontrées sur le terrain pour enlever les métaux dissous. L'échangeur d'ions et la précipitation sont probablement les deux technologies les plus efficaces pour l'enlèvement des métaux. Elles doivent toutefois être adaptées pour des métaux spécifiques et nécessitent généralement des investissements importants dans les équipements de contrôle pour être pleinement efficaces.

Plusieurs des technologies présentées à la figure 5.1 pour *l'enlèvement des solides en suspension* ont déjà été expérimentées dans les projets de dragage réalisés par l'U.S. Army Corps of Engineers (USACE) : bassin de sédimentation, clarificateur avec ajout préalable de flocculants, clarificateur chimique utilisant des polyélectrolytes, digue et lit de filtration granulaire, déversoir rempli de sable. Les bassins de sédimentation sont utilisés depuis plusieurs années dans les projets de dragage aussi bien pour la déshydratation des sédiments dragués que pour contrôler les solides en suspension des surnageants.

Quant aux autres technologies d'enlèvement des solides en suspension, à savoir la microfiltration par membrane, les tourbières et l'ultrafiltration, elles ont déjà fait leur preuve dans le traitement des eaux usées municipales et industrielles.

Selon Averett *et al.*, (1990), les procédés mécaniques de traitement biologique pour *l'enlèvement des substances organiques* doivent être éliminés pour les projets de dragage en raison de la faible teneur des sédiments en substances organiques et en raison des variations extrêmes de température et de débits pouvant être associées aux effluents des technologies de pré-traitement et de traitement des sédiments. Toutefois, les technologies biologiques telles que la nitrification, le catabolisme des éléments nutritifs et la photosynthèse, peuvent être utilisées pour la dégradation des éléments nutritifs ou biodégradables et des autres substances organiques dans les bassins ou les cellules sécuritaires de confinement des matériaux dragués.

Selon les mêmes auteurs, les techniques d'extraction ou de séparation à la vapeur et à l'air pourraient être utilisées pour les contaminants organiques volatils, lesquels ne sont généralement pas problématiques dans les sédiments contaminés.

5.4 Procédés retenus pour l'assainissement des Grand Lacs

5.4.1 Rappel des critères d'évaluation et de sélection des procédés. - Les critères d'évaluation et de sélection des technologies de traitement des effluents retenus par l'USACE et l'USEPA pour des projets de dépollution de sédiments des Grands Lacs sont les mêmes que ceux utilisés pour le choix des technologies et procédés de pré-traitement des sédiments présentés précédemment (tableaux 3.3 et 3.4).

Tel qu'indiqué au tableau 5.1, en plus de présenter des informations d'ordre général (stade de développement, application antérieure pour les sédiments et disponibilité de l'équipement aux États-Unis), chaque procédé considéré d'un groupe de technologies a fait l'objet d'une évaluation de performance par une cote de 1 à 4, en regard de trois facteurs : efficacité en fonction des contaminants et des objectifs de dépollution fixés, application démontrée pour les sols et (ou) les sédiments contaminés et coûts unitaires anticipés de traitement .

5.4.2 Procédés retenus. - Basée sur l'évaluation présentée au tableau 5.1, la figure 5.2 fait ressortir en caractères gras, pour les trois catégories de type de traitement présentées, les procédés de traitement des effluents qui ont été retenus pour les projets de démonstration dans les cinq secteurs préoccupants des Grands Lacs.

Tableau 5.1 Évaluation de la performance anticipée des technologies de traitement des effluents

PROCÉDÉ	STADE DE DÉVELOPPEMENT	APPLICATION AUX SÉDIMENTS	DISPONIBILITÉ	COTE DE PERFORMANCE (**)		
				Efficacité	Application	Coûts
Enlèvement des solides en suspension						
Clarification chimique (*)	Démontré	Oui	Oui	3	4	4
Clarificateurs	Démontré	Non	Oui	3	2	3
Filtration sur un milieu granulaire	Démontré	Oui	Oui	3	3	3
Microfiltration à membrane	Démontré	Non	Oui	4	3	2
Bassin de sédimentation	Démontré	Oui	Oui	3	4	4
Ultrafiltration	Démontré	Non	Oui	4	2	2
Tourbières	Démontré	Oui	Oui	4	3	3
Enlèvement des métaux						
Filtration adsorptive	Conceptuel	Non	Développement	3	2	3
Échangeur biologique ionique	Conceptuel	Non	Développement	3	2	3
Électrocoagulation	Conceptuel	Non	Développement	3	2	3
Floculation / coagulation	Démontré	Oui	Oui	3	4	4
Séparation à froid	Conceptuel	Non	Développement	2	2	2
Échangeur ionique	Démontré	Non	Oui	4	3	3
Digues / lits perméables	Démontré	Non	Oui	3	3	3
Précipitation	Démontré	Non	Oui	4	3	3
Réduction des métaux	Démontré	Non	Oui	3	2	3
Ultrafiltration	Conceptuel	Non	Développement	3	2	2
Tourbières	Démontré	Oui	Oui	3	3	3
Traitement des substances organiques						
Dégradation aérobie	Démontré	Non	Oui	2	2	3
Stripping à l'air	Démontré	Non	Oui	2	2	3
Dégradation anaérobie	Démontré	Non	Oui	2	2	3
Système de traitement BioTrol	Pilote	Non	Brevetée	2	2	3
Adsorption sur charbon	Démontré	Oui	Oui	4	3	3
Déshydrochloration catalytique	Démontré	Non	Oui	2	2	2
Hydrolyse chimique	Démontré	Non	Oui	2	2	2
Réduction électrolytique	Conceptuel	Non	Développement	2	2	2
Photolyse simulée au laser	Conceptuel	Non	Développement	2	2	2
Neutralisation	Démontré	Non	Oui	2	2	3
Séparation d'huiles	Démontré	Non	Oui	2	4	4
Oxydation des substances organiques	Démontré	Oui	Oui	3	2	3
Ozonation	Démontré	Non	Oui	3	2	3
Procédé PACT	Démontré	Non	Oui	3	2	2
Réduction des substances organiques	Conceptuel	Non	Développement	2	1	2
Adsorption sur des résines	Démontré	Non	Oui	3	2	3
Osiose inverse	Démontré	Non	Oui	1	2	4
Disque biologique rotatif	Démontré	Non	Oui	2	2	3
Stripage à la vapeur	Démontré	Non	Oui	3	2	2
Bioréacteur fixe submergé	Conceptuel	Non	Développement	2	2	3
Lit bactérien	Démontré	Non	Oui	2	2	3
Peroxyde d'hydrogène / UV	Démontré	Oui	Oui	3	2	3
Ozonation / UV	Démontré	Non	Oui	3	2	3
Tourbières	Démontré	Non	Oui	3	3	3

Remarques :

* Les technologies en caractère gras ont été retenues par l'USACE et l'USEPA pour des projets de démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs.

** Voir tableau 3.3. pour la signification des cotes de performance.

Source: Averett et al. (1990).

Sur cette figure, les procédés retenus sont classés en abscisse en fonction de leur niveau de développement (application encore à démontrer, démonstration en banc d'essai, à l'échelle pilote ou dans une unité commerciale) et en ordonnée, en fonction de leur coût d'utilisation pour la dépollution, selon les quatre classes de coûts retenus pour les projets des Grands Lacs. De plus, l'efficacité anticipée ou reconnue de chacun des procédés considérés, telle qu'évaluée par Averett *et al.* (1990), est également précisée par une cote entre parenthèses (voir tableau 3.3 pour la définition de cette cote).

Pour l'*enlèvement des métaux*, les procédés de floculation/coagulation, d'échange ionique, de digues et lits perméables, de précipitation et les tourbières présentent tous des efficacités, des potentiels d'application et des coûts acceptables pour des projets de démonstration de traitement des eaux des sédiments contaminés (Averett *et al.*, 1990). Des 11 technologies considérées pour l'enlèvement des métaux, les cinq retenues en considérant leur efficacité, leur potentiel d'application pour les sédiments et leurs coûts d'utilisation sont: l'échangeur ionique, la floculation/coagulation, les lits et digues perméables, la précipitation et les tourbières.

Pour l'*enlèvement des solides en suspension*, à l'exception des clarificateurs et de l'ultrafiltration, tous les procédés considérés présentent une efficacité, une application et des coûts acceptables pour des projets de dépollution de sédiments contaminés. Des sept technologies considérées pour l'enlèvement des solides en suspension, seuls les procédés de clarification et d'ultrafiltration ne sont pas retenus en raison de leur faible potentiel d'application (voir tableau 5.1).

Enfin, pour l'*enlèvement des substances organiques*, les procédés d'oxydation par ultraviolet et d'ozonation ont été très bien démontrés et ce, pour une gamme variée de contaminants organiques, comme indiqué au tableau 5.1. Selon Averett *et al.*, (1990), les procédés les plus prometteurs pour le traitement des substances organiques présentes dans les effluents sont : l'adsorption sur charbon activé, l'oxydation, la séparation d'huiles, le procédé PACT (charbon activé), l'adsorption sur des résines, le stripage à la vapeur et les tourbières. Des 24 technologies considérées pour le traitement de ces substances, les huit technologies retenues pour des raisons d'efficacité, de leur potentiel d'application pour les sédiments

et de leurs coûts d'utilisation sont : l'adsorption sur charbon et sur résines, l'ozonation et l'oxydation, les séparateurs d'huiles, les tourbières, le traitement par UV/ozonation et par UV/péroxyde d'hydrogène. Pour leur part, les procédés d'osmose inverse, de séparation à la vapeur et le procédé PACT n'ont pas été retenus pour des considérations économiques.

COÛTS	APPLICATION			
	1° À DÉMONTRER	2 BANC D'ESSAI	3 PILOTE	4 COMMERCIALE
US \$/V3 1 200 \$ ET PLUS		<ul style="list-style-type: none"> osmose inverse (4) (**) 		
2 100 \$ À 200 \$	<ul style="list-style-type: none"> réduction des organiques (2) 	<ul style="list-style-type: none"> déchloration catalytique (2) hydrolyse chimique (2) procédé PACT (3) photolyse par laser (2) réduction électrolytique (2) séparation à froid (2) séparation à la vapeur (3) ultrafiltration (4) 	<ul style="list-style-type: none"> microfiltration par membranes(4) (***) 	
3 20 \$ À 100 \$		<ul style="list-style-type: none"> adsorption sur résines (3) biodégradation aérobie (2) biodégradation anaérobie (2) bioréacteur fixe submergé (2) clarificateur (3) disque rotatif biologique (2) échangeur ionique biologique (3) électrocoagulation (3) filtration adsorptive (3) lit bactérien (2) neutralisation (2) oxydation des substances organiques (3) ozonation (3) réduction des métaux (3) séparation par air (2) traitement BioTrot (2) UV/ozonation (3) UV/péroxyde d'hydrogène (3) 	<ul style="list-style-type: none"> adsorption sur charbon (4) échangeur ionique (4) lit de filtration granulaire (3) lit et digues perméables (3) précipitation (4) tourbières (3) 	
4 20 \$ ET MOINS				<ul style="list-style-type: none"> basin de sédimentation (3) clarification chimique (3) floculation/coagulation (3) séparateur d'huile (2)

Remarques: * : Cote de performance, voir tableau 3.3 pour la légende.

** : Efficacité (3), voir tableau 3.3 pour la légende.

*** : Les procédés en caractère gras ont été retenus pour des projets de démonstration pour la dépollution des sédiments des Grands Lacs.

Source : Adapté de Averett et al. (1990).

Figure 5.2 Classement des 41 technologies de traitement des effluents considérées et retenues pour des projets de démonstration de dépollution des sédiments des Grand Lacs

CONSIDÉRATIONS GLOBALES DANS LE CHOIX DES TECHNOLOGIES DE TRAITEMENT

Les sections précédentes sur les technologies de pré-traitement et de traitement des sédiments de même que sur les technologies de traitement des effluents démontrent qu'il n'existe pas pour le moment de technologies universelles aptes à traiter une gamme variée de matrices et de contaminants organiques et inorganiques, quelles que soient les caractéristiques physiques et environnementales du site et des matrices à traiter. La plupart des technologies thermiques, biologiques, d'extraction, chimiques et d'immobilisation présentent des limites et des avantages particuliers aux plans technique, environnemental et économique dépendant des matrices et des contaminants à traiter.

L'évaluation et la sélection des technologies de traitement doivent donc être réalisées de façon à couvrir ces trois aspects et ce en permettant que la plupart des intervenants (promoteurs, contracteurs, gouvernements, groupes de protection de l'environnement, public) soient en mesure de mieux identifier et évaluer les enjeux liés à l'une ou l'autre des technologies considérées pour le traitement des sédiments contaminés.

Les chapitres précédents ont en effet mis en lumière les avantages et les limites (surtout technologiques et économiques) inhérents à l'utilisation des diverses technologies. Il est important à ce stade-ci d'apporter une perspective plus globale dans le choix des technologies, en considérant **l'ensemble des travaux tant aux plans technique et économique qu'environnemental** (ce dernier critère incluant la protection de la santé publique et les considérations d'ordre social).

6.1 Critères proposés pour l'évaluation et le choix des technologies de traitement des sédiments

Le tableau 6.1 propose une liste de critères d'ordres technique, économique et environnemental à considérer pour l'évaluation et le choix des technologies de la chaîne de traitement des sédiments contaminés (dragage, pré-traitement, traitement proprement dit, traitement des effluents et d'élimination des résidus du traitement).

Bien que cette liste se veut la plus exhaustive possible, elle devra être révisée et adaptée en fonction des particularités du site à dépolluer et en tenant compte de l'évolution technologique rapide des technologies de traitement des sédiments contaminés.

6.2 Rappel des principes/avantages/limites de chaque type de technologie de traitement

Dans les sections précédentes, les principes, les principaux avantages et limites des technologies (biologique, chimique, d'extraction, thermique, d'immobilisation et de confinement sécuritaire) aux plans technique et économique pour le traitement de matrices contaminées ont été présentés. Afin de pouvoir plus facilement comparer les avantages, les limites, les impacts secondaires et les coûts relatifs au traitement de ces six groupes de technologies, les informations ont été synthétisées au tableau 6.2.

Tableau 6.1 Critères à considérer pour le choix des technologies dans la chaîne de traitement des sédiments contaminés

FACTEUR	CRITÈRE
<p>TECHNIQUE</p>	<ul style="list-style-type: none"> . Nature et degré de la contamination . Caractéristiques physiques des sédiments . Stade de développement de la technologie . Efficacité et efficience techniques . Facilités d'opération et maintenance . Fiabilité du/des procédés de traitement . Disponibilité de l'équipement et facilité de réalisation . Capacité de traitement . Durée de traitement . Flexibilité . Compatibilité avec les technologies d'excavation, de pré-traitement et traitement des effluents . Superficie de terrain disponible pour les unités de traitement . Expérience et formation de la main-d'oeuvre
<p>ENVIRONNEMENT</p>	<ul style="list-style-type: none"> . Performance environnementale . Impacts potentiels sur l'environnement et la santé humaine . Impacts potentiels des activités connexes (dragage, transport et entreposage) . Conformité avec les réglementations et politiques des divers paliers de gouvernement . Acceptation sociale . Certificats d'autorisation obtenus pour la technologie . Efficacité à long terme . Efficacité à court terme . Réduction de la toxicité, de la mobilité et du volume des contaminants . Émissions atmosphériques, rejets d'eaux usées, résidus liquides ou solides reliés à la technologie . Risques pour la santé des travailleurs et la population . Proximité de zones sensibles (milieux biologiques et humains) . Risques de déversement accidentel . Programme de contrôle et de suivi environnemental . Historique sur la fiabilité de la technologie
<p>ÉCONOMIQUE</p>	<ul style="list-style-type: none"> . Coûts de dragage, du transport et d'entreposage . Coûts de pré-traitement et traitement des effluents . Coûts de traitement des sédiments . Coûts d'élimination des résidus du traitement . Coûts des études pour obtenir les autorisations gouvernementales . Coûts des analyses chimiques, des programmes d'assurance et de contrôle de qualité . Coûts de mobilisation et d'immobilisation . Coûts pour rendre le site sécuritaire . Coûts de maintenance

Tableau 6.2 Rappel des principes, des avantages et des limites de chaque type de technologie de dépollution des sédiments

PROCÉDÉS	APPLICATIONS	LIMITES	IMPACTS SECONDAIRES	COÛTS RELATIFS
<p>Biologique Principe</p> <p>Utilisation de microorganismes (bactéries, champignons), ou des enzymes pour dissocier les BPC, pesticides, et autres composés organiques en composés inoffensifs ou moins toxiques (CO₂, CH₄, sels organiques).</p>	<p>Technologie pouvant être appliquée aux sédiments à condition que l'utilisation de microorganismes soit appropriée aux contaminants retrouvés.</p> <p>Application commerciale pour le traitement des sols, des effluents liquides et des eaux souterraines.</p>	<p>Efficacité limitée par la biodisponibilité des contaminants et la présence des métaux.</p> <p>Essais de biodégradation sur les sédiments ont été faits jusqu'à présent uniquement en banc d'essai.</p> <p>Température souvent un facteur limitant.</p> <p>Nécessite généralement de grandes superficies et des longs temps de traitement .</p> <p>Fiabilité non assurée en raison de la nécessité de maintenir des conditions optimales en tout temps.</p> <p>Coûts difficiles à évaluer.</p>	<p>Émissions de substances organiques volatiles.</p> <p>Dégradation incomplète de produits dangereux.</p> <p>Eaux de lixiviation.</p>	130-270 US \$/ v ³
<p>Extraction Principe</p> <p>Enlèvement de contaminants d'un médium par une dissolution dans un fluide, lequel est ensuite traité.</p>	<p>Apte à enlever les contaminants organiques et les métaux lourds, mais rarement les deux classes de contaminants dans le même fluide.</p> <p>Enlève généralement les contaminants du solvant pour qu'il puisse être réutilisé dans le procédé.</p> <p>Application très répandue dans la décontamination des sols.</p> <p>Application sur les sédiments limitée surtout à l'échelle de laboratoire, de banc d'essai, ou à l'échelle pilote.</p> <p>Technologies intéressantes pour les sédiments en concentrant les contaminants dans des petits volumes.</p>	<p>Pour la plupart des procédés, plusieurs cycles d'extraction sont nécessaires pour obtenir de hautes efficacités.</p> <p>Procédés de post-traitement sont nécessaires pour traiter ou éliminer les effluents concentrés.</p> <p>Faisabilité pour traiter les sédiments difficile à évaluer en l'absence de projets de démonstration pleine grandeur et des problèmes de régénération des solvants et la toxicité potentielle des solvants résiduels.</p> <p>Limitations pour les matrices contenant un haut pourcentage de limon et d'argile.</p>	<p>Émissions de substances organiques volatiles.</p> <p>Rejets d'eaux usées.</p> <p>Élimination des résidus.</p>	> 100\$/v ³

Tableau 6.2 Rappel des principes, des avantages et des limites de chaque type de technologie de dépollution des sédiments (suite)

PROCÉDÉS	APPLICATIONS	LIMITES	IMPACTS SECONDAIRES	COÛTS RELATIFS
<p>Chimique Principe</p> <p>Utilise des chélateurs, des agents de clivage des liens, addition de base ou acide, déplacement du chlore, oxydation ou réduction pour détruire, désintoxiquer ou enlever les contaminants des milieux contaminés.</p>	<p>Application répandue dans l'industrie chimique lorsqu'un nombre limité de composés chimiques sont présents ou que le milieu à traiter est l'eau.</p> <p>Changement de la forme du matériau pour le rendre moins toxique ou pour changer sa solubilité, sa stabilité, ses possibilités de séparation ou autres propriétés, facilitant sa manutention ou sa mise en dépôt.</p>	<p>Technologie peu appliquée pour le traitement des substances organiques et des métaux lourds dans les sédiments.</p> <p>Difficile d'identifier pour les sédiments la réaction chimique capable de traiter des contaminants très spécifiques.</p> <p>Réaction traitant un contaminant peut augmenter la mobilité d'autres contaminants.</p> <p>Coûts difficiles à quantifier.</p>	<p>Émissions de substances organiques volatiles.</p> <p>Rejets d'eaux usées.</p> <p>Élimination des résidus.</p>	<p>> 100\$/v³</p>
<p>Thermique à haute température. Principe</p> <p>Chauffage des sols et des sédiments à des températures de plusieurs centaines ou milliers de degrés au-dessus de la température ambiante.</p>	<p>Généralement l'option la plus efficace pour détruire les contaminants organiques mais également la plus dispendieuse.</p> <p>Efficacité de destruction supérieure à 99 %.</p> <p>Non encore appliquée aux É.-U. pour les sédiments mais retenue pour plusieurs sites du Superfund américain.</p> <p>Technologies pouvant être appliquées pour les sols, les sédiments, les boues, les liquides et les gaz.</p>	<p>Non destruction des métaux à l'exception des métaux les plus volatils tels que le mercure et le plomb, qui peuvent se volatiliser à hautes températures; ces métaux doivent être captés et traités avant rejets des gaz à l'atmosphère.</p> <p>Changement de l'état d'oxydation de certains métaux présents dans les sédiments (via l'incinération) qui peuvent devenir plus mobiles dans les cendres qu'initialement dans les sédiments.</p> <p>Sédiments avec des concentrations importantes de particules fines peuvent entraîner de fortes charges de particules dans les émissions de l'incinérateur; nécessité de réduire la taille des particules avant l'incinération.</p> <p>Application souvent limitée en raison des délais importants pour obtenir les autorisations gouvernementales et de la forte réticence de la population face à des projets d'incinération.</p>	<p>Émissions atmosphériques.</p> <p>Élimination des sous-produits.</p>	<p>Très élevés 200-1 300 \$/v³</p>

Tableau 6.2 Rappel des principes, des avantages et des limites de chaque type de technologie de dépollution des sédiments (suite)

PROCÉDÉS	APPLICATIONS	LIMITES	IMPACTS SECONDAIRES	COUTS RELATIFS
<p>Thermique à basse température Principe</p> <p>Chauffage des matériaux en l'absence d'agents réducteurs, oxydation à air humide ou autres procédés de désorption.</p>	<p>Haute efficacité et possibilités d'applications pour les sédiments.</p>	<p>Coûts très élevés, en particulier si les sédiments ont une forte teneur en eau.</p>	<p>Emissions atmosphériques.</p> <p>Élimination des sous-produits.</p>	<p>Plus faibles que l'incinération.</p>
<p>Immobilisation Principe</p> <p>Limite la mobilité des contaminants en réduisant la surface active des sédiments par laquelle le transfert de contaminants peut se produire, et (ou) en limitant la solubilité des contaminants par ajustement du pH ou par des phénomènes de sorption.</p>	<p>Améliore les possibilités de manutention et les propriétés physiques des matériaux.</p> <p>Techniques de solidification (processus physique) et stabilisation (processus chimique) souvent retenues dans les projets de dépollution de sols contaminés par les métaux lourds puisqu'ils ne peuvent être détruits.</p> <p>Technique de solidification efficace pour traiter la contamination organique.</p>	<p>Stabilisation non efficace pour les contaminants organiques.</p> <p>Substances organiques peuvent limiter les réactions de solidification/ stabilisation.</p>	<p>Émissions de substances organiques volatiles.</p> <p>Eaux de lixiviation. Stabilité physique à long terme des produits résultants.</p>	<p>< 100 \$/v³</p>
<p>Confinement sécuritaire Principe</p> <p>Encapsule les contaminants par des matériaux de recouvrement ou dans des cellules étanches pour éviter la libération des contaminants dans le milieu.</p>	<p>Solution souvent retenue parce que la plus économique ou en l'absence de centres ou de technologies de traitement.</p> <p>Solutions les plus utilisées : recouvrement en milieu aquatique in situ ou hors site, confinement dans des cellules en milieux aquatique et terrestre.</p>	<p>Utilisation généralement limitée aux sédiments faiblement ou moyennement contaminés.</p>	<p>Stabilité à long terme de la solution.</p>	<p>Faibles (10 à 20 US \$ / v³) pour le recouvrement et en cellule. Élevés (> 200 US \$ / v³) pour des sites à sécurité maximale approuvés.</p>

Sources : Adapté de Averett, *et al.* (1990); USEPA (1990a; 1991a; 1991b).

6.3 Impacts potentiels des technologies de traitement sur l'environnement et sur la santé

En collaboration avec le ministère de l'Environnement de l'Ontario et de Santé et Bien-être Canada, le Bureau de protection de l'environnement de la Ville de Toronto a procédé à une évaluation des impacts potentiels sur l'environnement et sur la santé de l'utilisation des technologies de traitement des sols, en mettant l'emphase sur celles développées et utilisées en Amérique du Nord (Kendall *et al.*, 1991).

Cette évaluation des impacts potentiels sur l'environnement et la santé est basée sur une revue des technologies à l'aide des 15 critères d'évaluation présentés et définis au tableau 6.3.

Ainsi, les critères relatifs à la protection de l'environnement et de la santé visent à évaluer la performance des technologies selon leur efficacité de destruction et d'enlèvement des contaminants, la durée du traitement et les émissions reliées aux procédés. L'efficacité à long terme a été évaluée en se basant sur la mobilité des résidus du traitement et leur toxicité.

Les autres risques évalués incluent les dangers d'explosion et d'incendie, ceux liés au transport d'équipements lourds et de substances dangereuses et les risques pour la santé des travailleurs et de la population vivant dans le voisinage du site de traitement.

Les problèmes potentiels de pollution par le bruit, les odeurs, la poussière, et d'ordre visuel ou esthétique liés à l'exploitation de la technologie, sont rassemblés dans le critère de nuisances pour la population.

Les autres critères considérés sont : les coûts de traitement, le stade de développement de la technologie, le nombre d'évaluations indépendantes de l'efficacité de la technologie (i.e, le nombre de projets démontrés) et enfin, le potentiel de la technologie à traiter une gamme variée de matrices de déchets.

Tableau 6.3 Critères d'évaluation des impacts sur l'environnement et sur la santé des technologies de traitement des sols contaminés utilisés par la Ville de Toronto

CRITÈRES	SIGNIFICATION
Efficacité de destruction	La plupart des technologies séparent les contaminants des sols. Actuellement, peu de technologies détruisent les contaminants ou les rendent moins toxiques.
Efficacité d'enlèvement	Le taux d'enlèvement des contaminants de la technologie.
Temps de réalisation	La durée des travaux influence non seulement les coûts mais également la durée d'exposition des travailleurs et de la population.
Émissions du procédé	La capacité de la technologie à minimiser, réduire ou détruire les contaminants présents dans les émissions atmosphériques, les eaux usées et les résidus solides du procédé de traitement.
Mobilité des résidus	Comme tous les contaminants présents sur un site ne peuvent être enlevés ou détruits, la mobilité des résidus se veut une mesure de la tendance des contaminants restant sur place à se déplacer dans l'environnement.
Toxicité des résidus	Ce critère englobe la toxicité et la biodisponibilité des contaminants résiduels du procédé de traitement.
Dangers d'explosion et d'incendie	Les risques associés aux matières inflammables ou explosives requises pour le traitement et ceux reliés aux procédés nécessitant des températures et des pressions élevées.
Transport d'équipements lourds	La circulation de la machinerie lourde sur le site représente une source de nuisances et de risques d'accident pour la population et les travailleurs.
Transport de matières dangereuses	La quantité et la nature des matières dangereuses manipulées sur le site représentent un risque pour les travailleurs et pour la population.
Exposition des travailleurs et de la population	L'excavation de sols contaminés peut entraîner l'émission de composés volatils et les rejets gazeux, liquides ou solides du ou des procédés de traitement qui représentent un risque pour les travailleurs et la population.
Nuisances pour la population	Le bruit, les odeurs et les poussières associés au traitement peuvent être des sources de nuisances et d'impacts visuels pour la population.
Stade de développement	Le stade de développement de la technologie (conceptuel, banc d'essai, pilote ou échelle commerciale) représente des niveaux de risques différents.
Coûts	Coûts de traitement.
Évaluation indépendante de la technologie	L'historique des sites déjà traités efficacement par la technologie peut confirmer la performance décrite par les promoteurs de technologies.
Contaminants traités	Le type de déchets et de contaminants pouvant être détruits efficacement par la technologie.

Source Kendall et al. (1991).

Le résultat de cet exercice d'évaluation pour 18 technologies de traitement de type physique, chimique, biologique ou thermique, est présenté à la figure 6.1. Tel qu'illustré sur cette matrice, les impacts potentiels de chaque technologie sur l'environnement et la santé sont évalués en fonction de quatre niveaux de risques potentiels à savoir : pas préoccupant, préoccupation faible, préoccupation moyenne et préoccupation élevée.

Les préoccupations élevées, faibles et nulles, identifiées sur cette figure par les auteurs de l'étude pour chacun des critères, entraînent les conclusions suivantes :

Efficacité de destruction. - Les technologies thermiques à hautes températures (incinération, vitrification) qui entraînent une destruction presque complète des contaminants ont été jugées comme n'étant potentiellement pas problématiques par rapport à ce critère.

À l'opposé, toutes les technologies d'extraction, de lavage, de désorption, de traitement par fréquence radio ou d'immobilisation (solidification, encapsulation, excavation et élimination hors site) qui impliquent seulement une séparation ou une désorption des contaminants dans les matrices traitées, contaminants qui doivent ensuite être traités ou simplement immobilisés dans la matrice, ont été jugées plus problématiques en regard de leur efficacité de destruction.

Efficacité d'enlèvement. - Pour l'efficacité d'enlèvement des contaminants, la technologie d'incinération à infrarouge a été jugée non problématique avec des taux d'efficacité d'enlèvement et de destruction démontrés de 99,9 p. 100.

Les technologies d'immobilisation (solidification, encapsulation, élimination hors site) ou de traitement sur place (stripage à l'air/ vapeur, lavage des sols en place) ont été évaluées comme hautement problématiques en ce qui a trait à leur efficacité d'enlèvement des contaminants.

TECHNOLOGIE \ CRITÈRE	CRITÈRE														
	Efficacité de destruction	Efficacité d'enlèvement	Temps de réalisation	Emissions du procédé	Mobilité des résidus	Toxicité des résidus	Dangers d'explosion/Incendie	Transport de la machinerie lourde	Transport de matières dangereuses	Exposition des travailleurs et de la population	Nuisances pour la population	Stade de développement	Coûts	Historique de la technologie	Contaminants traités
Extraction sous vide en place	●	●	●	●	●	●	○	○	●	●	○	○	○	○	●
Strippage en place à l'air/vapeur	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	○	●	●	○	●
Traitement à la fréquence radio	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●	○	●	●
Restauration électro-acoustique	N/A	●	○	●	●	●	○	○	○	○	○	●	○	●	●
Solidification en place	●	●	○	○	●	●	○	●	○	●	○	○	○	○	●
Solidification sur le site	●	●	○	●	●	●	○	●	●	●	●	○	●	○	●
Épandage sur le sol	●	●	●	●	○	●	○	○	●	●	●	●	○	●	●
Biorestauration sur place	●	●	●	○	○	●	○	○	○	○	○	○	●	●	●
Biorestauration sur le site	●	●	●	○	○	○	○	●	○	○	●	○	●	●	●
Incinération à infrarouge	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●	○	○
Vitrification en place	○	○	●	●	○	○	●	●	○	●	●	●	●	●	○
Encapsulation	●	●	○	○	●	●	○	●	○	○	●	○	●	●	○
Excavation et disposition hors site	●	●	○	●	●	●	○	●	●	●	●	○	●	●	○
Déchloration	○	○	○	○	●	●	○	○	●	●	●	●	●	○	●
Lavage des sols sur le site	●	○	○	●	●	●	○	○	●	●	●	○	○	○	○
Lavage des sols en place	●	●	●	●	●	●	○	●	○	○	○	●	-	●	●
Extraction aux solvants	●	●	●	○	●	●	●	○	●	●	●	○	○	○	○
Désorption thermique à basse température	●	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○	●	●

LÉGENDE

- Préoccupation élevée
- Préoccupation moyenne
- Préoccupation faible
- Pas préoccupant
- N/A Non applicable
- Non disponible

Source : Kendal et al. (1991).

FIGURE 6.1 Matrice des sujets de préoccupation pour l'environnement et la santé des technologies de traitement

Temps de réalisation. - Les technologies d'électro-acoustique en place, de solidification sur le site, d'extraction et d'élimination hors site pouvant se réaliser généralement très rapidement, sont considérées non problématiques en ce qui a trait à la variable temps de réalisation.

Les technologies présentant une faible capacité de traitement, en termes de t/d (fréquence radio), et nécessitant donc des temps de traitement relativement longs (biotechnologies et lavage des sols en place) ou les technologies dont la durée de traitement était difficile à évaluer (extraction en place sous vide) ont été considérées comme nettement plus problématiques.

Émissions du procédé. - Les technologies de solidification en place, de biotraitement en place ou sur le site, d'encapsulation, de déchloration et d'extraction aux solvants ont été évaluées comme faiblement préoccupantes sur le plan des émissions.

Les technologies de solidification sur le site (émission de composés organiques et de composés volatils), d'incinération à infrarouge (émissions de particules, gestion des cendres et des eaux), de lavage sur le site (émissions liées aux particules fines traitées, aux chélateurs ou surfactants dans les eaux, émissions de composés organiques volatils) et de désorption thermique (excavation des sols reconnue susceptible d'entraîner des pertes de 60 à 90 p. 100 des contaminants volatils par volatilisation) apparaissent nettement plus problématiques.

Mobilité des résidus. - Pour ce qui est de la mobilité des résidus, seule la technologie de vitrification en place a été jugée non problématique (stabilité à long terme de la masse vitrifiée).

Les technologies d'électro-acoustique en place (désorption partielle et mobilité des substances inorganiques résiduelles et mobilité augmentée des composés

organiques volatils (COV) et les composés organiques semi-volatils (COSV), de solidification (incapacité à immobiliser certains métaux et composés organiques ou encore risques de mobilité à long terme des contaminants non enlevés), d'incinération par infrarouge (mobilité des métaux dans les cendres), encapsulation sur ou hors site dans une cellule sécuritaire (contaminants non traités ou fixés) et de lavage (désorption des contaminants mais non enlèvement) sont considérées plus potentiellement problématiques.

Toxicité des résidus. - Les biotechnologies de traitement sur le site et les technologies de vitrification sur place apparaissent peu préoccupantes en regard de la toxicité des résidus.

Les technologies de restauration électro-acoustique (toxicité et biodisponibilité des composés inorganiques résiduels partiellement désorbés), de solidification (toxicité pour les bactéries des sols, lixiviation toujours possible de certains contaminants et toxicité des contaminants inchangée), d'incinération à infrarouge (toxicité des cendres), d'encapsulation ou d'élimination hors site (toxicité des contaminants inchangée), et de lavage (toxicité des particules fines, biodisponibilité des contaminants dans les eaux usées et dommages potentiels à l'environnement des chélateurs et des surfactants) sont considérées très préoccupantes.

Dangers d'explosion et d'incendie. - Les technologies qui n'utilisent pas de produits toxiques ou inflammables (solidification, biotechnologies, encapsulation et élimination hors site et de lavage des sols) ont été jugées non problématiques en regard des dangers d'explosion et d'incendie.

Les technologies d'incinération à infrarouge (dangers des combustibles d'appoint), de vitrification (inflammabilité des matériaux combustibles sous la surface), d'extraction aux solvants (inflammabilité des solvants) et de désorption thermique (risques d'explosion en présence d'oxygène) ont été jugées très préoccupantes.

Transport de machinerie lourde. - Les technologies qui ne nécessitent pas d'équipements lourds particuliers ou le transport d'équipements de traitement sur plusieurs remorques et qui furent dès lors jugées comme faiblement préoccupantes en regard des nuisances associées au transport de machinerie lourde, sont les suivantes : extraction sous vide, électro-acoustique, biotraitement par épandage sur le sol ou sur place, déchloration, lavage sur le site et extraction par solvants.

Par rapport à ce critère, les technologies d'incinération par infrarouge sont considérées nettement plus problématiques puisqu'elles nécessitent plusieurs remorques pour le transport des équipements et des chargeurs à pelle pour le transport des sols et des cendres.

Transport de matières dangereuses. - Les technologies de solidification sur place et d'encapsulation ne requérant pas le transport de matières dangereuses, furent jugées non problématiques.

Les technologies d'excavation et d'élimination hors site et d'extraction par solvants furent par contre considérées plus potentiellement problématiques parce qu'elles nécessitent respectivement le transport des sols contaminés non traités, le transport de solvants inflammables, d'azote liquide ou d'autres produits chimiques dangereux.

Exposition des travailleurs et de la population. - Les technologies suivantes présentent peu de risques d'exposition pour les travailleurs et la population : électro-acoustique, biotechnologies sur place ou sur le site, encapsulation et lavage des sols en place.

Les technologies de solidification sur le site, d'incinération par infrarouge, de vitrification sur place et de désorption thermique à basses températures furent jugées par contre comme présentant des préoccupations élevées pour les travailleurs et la population pour l'une ou l'autre des raisons suivantes : exposition liée à l'excavation des sols et au mélange des produits, risques de lixiviation à long terme des

contaminants non fixés ou désorbés, émissions atmosphériques, manipulation des sols et des cendres et risques d'incendies.

Nuisances pour la population. - Les technologies qui n'entraînent pas ou très peu d'émissions, de bruit et de poussières en relation avec les équipements utilisés et qui ne nécessitent pas l'excavation préalable des sols en traitant les sols directement en place (extraction sous vide, stripage à l'air/vapeur, électro-acoustique, solidification, biotechnologie et lavage), ont été jugées comme présentant peu de nuisances pour la population.

Ont été jugées nettement plus problématiques toutes les technologies requérant l'excavation des sols contaminés avec toutes les nuisances pouvant y être associées (bruit, poussières, odeurs et impacts visuels) ou les technologies dont les émissions atmosphériques associées au traitement, sont considérées habituellement très préoccupantes par la population : excavation et élimination hors site, extraction aux solvants et incinération par infrarouge.

Stade de développement. - Les technologies qui ont été utilisées avec succès dans des travaux de restauration ou ont été démontrées sur plusieurs sites et qui ont donc été jugées non problématiques en regard de leur stade de développement sont les suivantes : extraction sous vide en place, solidification sur le site, biorestauration sur place, incinération par infrarouge, lavage des sols sur le site et extraction aux solvants.

La technologie de lavage des sols en place est considérée de problématique potentiellement élevée parce qu'elle n'a été testée qu'à l'échelle pilote, et ce à un ou deux sites seulement aux États-Unis et en Europe.

Coûts de traitement. - Avec des coûts de traitement estimés entre 11 US \$/t et 55 US \$/t la technologie d'extraction sous vide ne représente pas un sujet de préoccupation à ce chapitre.

Les technologies susceptibles de présenter des coûts de traitement pouvant limiter considérablement leur utilisation dans des travaux de dépollution sont : les biotechnologies sur place (320 US \$/t) et sur le site (170 à 500 US \$/t), la vitrification sur place (275 à 385 US \$/t), l'excavation et l'élimination hors site (incertitudes sur les coûts véritables du fait que la permanence et la viabilité de la solution à long terme ne sont pas assurées) et la déchloration (200 à 600 US \$/t).

Historique de la technologie. - Les technologies qui ont été démontrées sur plusieurs sites sous supervision des agences de protection de l'environnement (p. ex., USEPA) et pour lesquelles les rapports des résultats d'essais sont disponibles pour consultation et donc ne présentent pas une préoccupation pour l'historique et la fiabilité de la technologie sont : l'extraction sous vide en place, la solidification en place et sur le site, l'incinération à infrarouge et l'extraction aux solvants.

En ce sens, les technologies pour lesquelles aucun résultat d'essai n'était disponible au moment de la parution de l'étude, ou pour lesquelles seules les données fournies par les vendeurs sont disponibles pour anticiper la performance, furent jugées comme nettement plus préoccupantes. Les technologies en question sont : traitement à la fréquence radio, électro-acoustique, biotechnologie sur le site, lavage des sols en place et désorption thermique à basses températures.

Types de contaminants. - Bien que des essais de traitabilité soient toujours nécessaires pour démontrer son efficacité pour une matrice donnée, la technologie de vitrification en place, capable de traiter efficacement de fortes concentrations aussi bien de métaux, de substances radioactives que de contaminants organiques et des COV n'a pas été jugée problématique en regard du type de déchets pouvant être traité par cette technologie.

À l'opposé, les technologies ne convenant que pour les composés organiques halogénés non polaires ou les contaminants solubles ou encore faiblement

adsorbés furent jugées plus préoccupantes par rapport au type de déchets pouvant être traités. Rentrent dans cette catégorie : déchloration et lavage des sols en place.

Comme les auteurs de l'étude ontarienne (Kendall *et al.*, 1991) le précisent, il est important de rappeler que les risques présentés sur la figure 6.1 sont uniquement potentiels et sont fortement dépendant des conditions et des particularités du site et des matrices et contaminants à traiter, à savoir : la nature de la contamination, les propriétés des sols, les conditions hydrologiques, la proximité de zones résidentielles, le temps et les ressources financières disponibles et la vocation du site. Il n'est donc pas possible de sélectionner la technologie apparaissant optimale à partir uniquement de l'information présentée dans la matrice présentée à la figure 6.1.

Une évaluation plus factuelle des risques de chaque technologie devra être basée sur une analyse de risques plus approfondie et ce, pour une matrice ou un site donné. D'autre part, cette analyse des risques potentiels doit être mise à jour d'une façon régulière en fonction du niveau de développement des technologies et des améliorations continues dont elles font l'objet.

6.4 Coûts de traitement anticipés pour la dépollution des sédiments

Dans les sections précédentes, les coûts d'utilisation des différentes technologies de traitement des sols et des sédiments ont été présentés lorsque ces coûts étaient disponibles dans la documentation de référence.

Il convient de souligner que plusieurs des estimations de coûts présentées étaient basées sur des projets de démonstration ou de restauration des sols déjà réalisés. Pour le traitement des sédiments, les coûts qui ont été présentés étaient basés principalement sur des estimations fournies par les vendeurs de technologies ou d'extrapolation à partir de projets de démonstration sur des bancs d'essai ou avec des unités pilotes.

Or, avant d'extrapoler les prix à partir d'un projet donné, il faut être très prudent parce que les coûts d'une activité même très connue peuvent être complètement différents lorsque cette activité est réalisée dans un autre contexte. À titre d'exemple, le tableau 6.4 présente une comparaison des coûts de dragage de capitalisation, d'entretien et de dépollution des sédiments basés sur les expériences hollandaises.

Tel que montré sur ce tableau, le type de matériaux et les coûts totaux/m³ de sédiments varient considérablement d'un projet à l'autre. Le tableau 6.5 présente les principales différences entre un dragage d'entretien et un dragage à des fins de dépollution des sédiments, ce qui explique leurs coûts totaux unitaires respectifs de 5 US \$/m³ et 125 US \$/m³. En effet, les objectifs, le devis de performance, le profil de conception, les contraintes de remise en suspension de sédiments dans la colonne d'eau, les études de pré-faisabilité et les performances attendues (précision, contrôle de qualité, etc.) pour les deux types de projet présentent des différences importantes.

Les autres facteurs à considérer dans le choix des technologies de traitement pour des projets de dépollution des sédiments sont, d'une part, que les volumes à traiter sont généralement considérables (centaines de milliers ou millions de m³) et que les niveaux de contamination des sédiments sont généralement plus faibles

dans les sédiments que dans les sols contaminés. D'autre part, puisque les organismes aquatiques sont directement en contact avec les sédiments et que certains contaminants se bioaccumulent dans la chaîne alimentaire, les objectifs de décontamination fixés (pour ce qui est des teneurs résiduelles en contaminants) sont plus bas pour les sédiments que pour les sols.

En plus d'avoir des incidences économiques importantes sur les coûts des projets de dépollution, ces facteurs influencent forcément le choix des technologies de traitement des sédiments. Ces dernières doivent présenter des efficacités de destruction ou d'enlèvement plus élevées que pour les sols et (ou) encore doivent comporter plusieurs cycles de traitement pour rencontrer les objectifs de restauration.

En attendant que l'on dispose de données suffisamment précises, basées sur des projets de démonstration pleine échelle de traitement des sédiments contaminés, des projets de démonstration (essais de traitabilité) adaptés aux conditions du site seront encore nécessaires, et ce pour plusieurs années, afin de préciser avec un niveau de confiance suffisant, les coûts réels de traitement des sédiments contaminés.

Par ailleurs, il convient également de souligner que les coûts de traitement habituellement présentés dans la documentation ne représentent qu'une partie des coûts des travaux de dépollution. C'est pourquoi, avant de sélectionner la ou les technologies apparemment les plus économiques, il est important de s'assurer que l'ensemble des catégories de coûts (listées au tableau 6.6 et tels que définis dans les essais de traitabilité supervisés par l'USEPA, dans le cadre des projets du *Superfund*), soient précisés (USEPA, 1992e).

De même, il est important de s'assurer que les essais de traitabilité et que les projets de démonstration réalisés sur un site donné soient planifiés pour fournir l'ensemble des coûts et ce, pour l'ensemble des étapes d'un projet de dépollution de sédiments contaminés (dragage, transport, pré-traitement, traitement des sédiments et des effluents, traitement ou élimination des résidus).

Tableau 6.4 Comparaison des coûts hollandais de dragage de capitalisation, d'entretien et de dépollution des sédiments

Paramètre	Dragage de capitalisation	Dragage d'entretien	Dragage de dépollution
Type de matériau	Roc	Limon/sable	Limon
Coûts totaux \$ US/m ³	50	5	125(*)
Coûts totaux \$ US pour un dragage d'une couche de 10 cm sur une surface de 140 X 100 m	70 000	7 000	175 000
Coûts totaux \$ US pour un dragage sur une surface de 140 X 100 m avec une tolérance de 30 cm (projet normal de maintenance)	Non applicable	20 000	500 000

Remarque

* : Ces coûts incluent les coûts de traitement.

Source : Van Oostrum (1992).

Tableau 6.5 Principales différences entre un dragage d'entretien et un dragage à des fins de dépollution des sédiments

<p align="center">Dragage de maintenance (entretien)</p>	<p align="center">Dragage de sédiments contaminés (dépollution)</p>
<p>Objectif</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maintenir un tirant d'eau sécuritaire <p>Devis de performance</p> <ul style="list-style-type: none"> • Assurer un fond plat dans la tolérance <p>Profil de conception</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plat <p>Resuspension et transport dans la colonne d'eau</p> <ul style="list-style-type: none"> • Peu d'intérêt <p>Études de pré-faisabilité</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faisabilité technique du dragage et estimation des volumes <p>Caractéristiques générales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Volume important • Équipement standard • Coûts par m3 faibles • Productivité • Tolérances élevées (20 à 50 cm) • Contrôle standard 	<ul style="list-style-type: none"> • Enlever complètement les sédiments contaminés <ul style="list-style-type: none"> • Minimiser le volume des sédiments à enlever <ul style="list-style-type: none"> • Capricieux (suivre le profil de la contamination) <ul style="list-style-type: none"> • Minimiser la resuspension (pas de surverse, pas de fuites et mise en place d'écran) <ul style="list-style-type: none"> • Faisabilité technique et environnementale du dragage, nature de la contamination, dimensions de la surface, essais de traitabilité et évaluation des volumes <ul style="list-style-type: none"> • Volume faible • Équipement spécial de haute technologie • Coûts par m3 élevés • Précision élevée • Faibles tolérances (5 à 10 cm) • Contrôle par des experts • Contrôle de qualité

Source : Van Oostrum (1992)

Tableau 6.6 Catégories de coûts considérées dans les études de traitabilité du Superfund américain

Item no.	Description
1	Préparation du site
2	Demandes de permis
3	Capitalisation des équipements
4	Démarrage
5	Main-d'oeuvre
6	Produits et biens consommables
7	Services publics
8	Traitement des effluents et élimination
9	Expédition et manutention des déchets et des résidus
10	Services analytiques
11	Maintenance et modifications
12	Démobilisation

Source : USEPA (1989a)

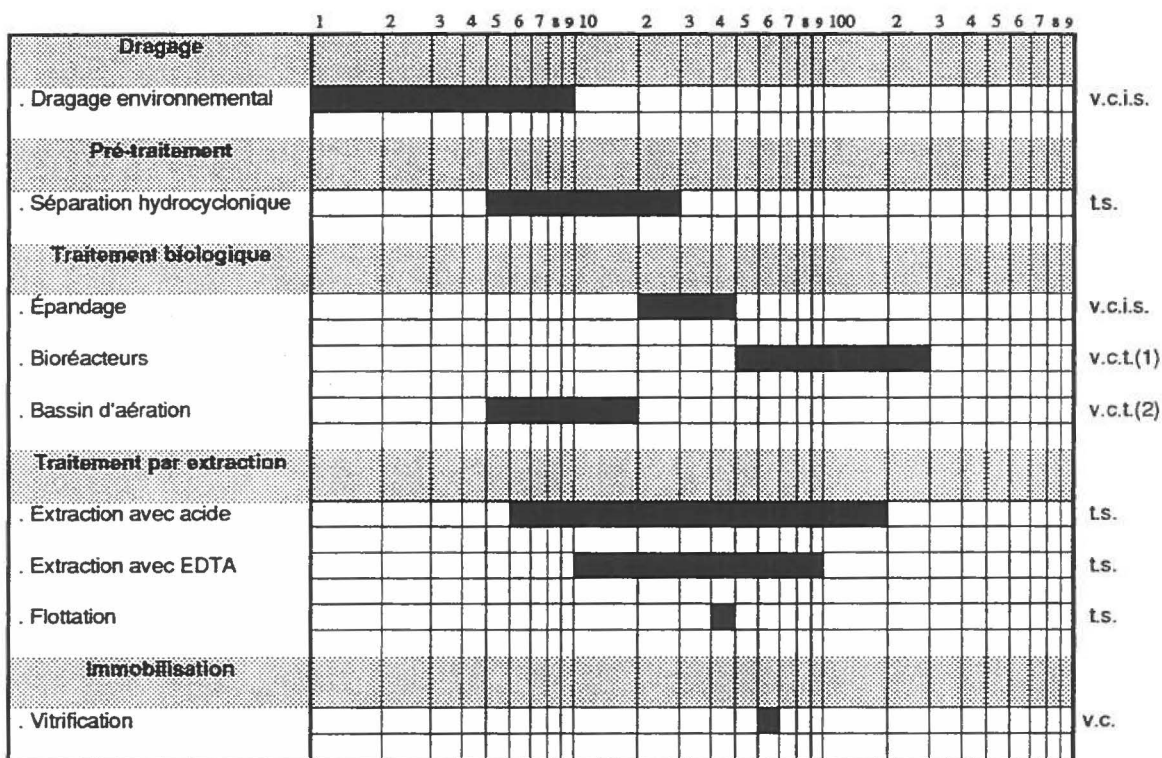
Malgré ces réserves, les nombreuses expériences de traitement de sédiments contaminés réalisées par le gouvernement hollandais depuis 1986 permettent quand même de donner un aperçu des coûts de traitement anticipés. Ainsi, la figure 6.2, qui présente la variation des coûts de traitement des sédiments, montre que ces coûts peuvent varier entre 5 et 300 US \$/v³ ou entre 6 à 200 US \$/t sèche, dépendant de la filière de traitement choisie : biologique, extraction ou immobilisation.

Si on compare ces coûts en les calculant selon les mêmes unités, soit en terme de volume de sédiments en place, les estimés de ces coûts de traitement (dépollution, séparation et immobilisation) varient alors entre 30 et 120 US \$/m³ de sédiments in situ. Quant aux coûts des activités préalables de dragage et de séparation par hydrocyclone, ils varient respectivement entre 2 et 15 US \$ et 2 et 120 US \$ par m³ de sédiments in situ (Van Villen et Bruggeman, 1992).

La figure 6.3 présente pour sa part la variation des coûts anticipés de traitement, en terme de US \$/v³ selon les diverses catégories de technologies de traitement présentées dans le présent document à partir d'estimés de coûts de projets envisagés aux États-Unis et au Canada. Cette figure présente également la variation des coûts de dragage et des activités de transport, de pré-traitement et de traitement des effluents. Tel qu'illustré sur cette figure, les coûts des diverses composantes d'un projet de traitement des sédiments sont susceptibles de varier considérablement dépendamment des volumes de sédiments à traiter et des technologies choisies.

Il convient de préciser que les valeurs présentées sur ces deux figures sont présentées à titre indicatif et doivent donc par conséquent être interprétées avec beaucoup de prudence et réfèrent pour la plupart à des projets non réalisés. De même, ces coûts devraient sensiblement diminuer avec le perfectionnement des technologies de traitement et des expériences acquises lors de projets réels de dépollution de sédiments.

Coûts (US \$)



Remarques :

- v.c. : verge cube
- v.c.i.s : verge cube in situ
- v.c.t (1) : verge cube traité (50 % de matière sèche)
- v.c.t (2) : verge cube traité (10 % de matière sèche)
- t.s. : tonne sèche

Source : Adapté de Van Dillen et Bruggeman (1992).

Figure 6.2 Comparaison des coûts des diverses composantes d'un projet de traitement des sédiments basée sur l'expérience hollandaise

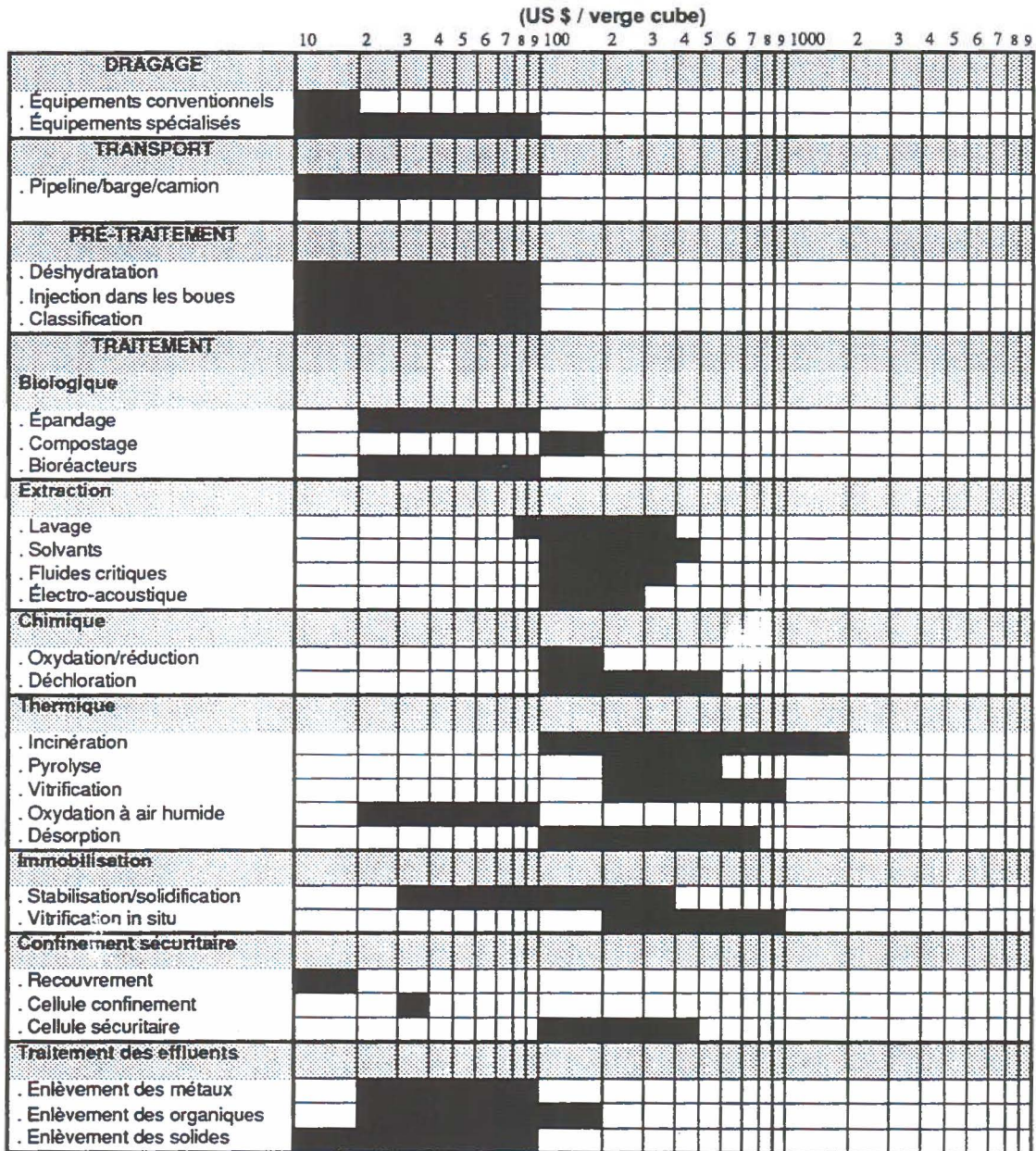


Figure 6.3 Comparaison des coûts des diverses composantes d'un projet de traitement des sédiments basée sur des expériences américaines et canadiennes

En publiant ce *Guide pour l'évaluation et le choix des technologies de traitement des sédiments contaminés*, la Direction du développement technologique du Centre Saint-Laurent (CSL) désire aider les promoteurs de dragage et de dépollution de sédiments en leur présentant les derniers développements en matière de scénarios et de technologies de traitement des sédiments contaminés. En présentant les avantages et les limites des technologies démontrées jusqu'à présent et en cours de démonstration, pour le pré-traitement et le traitement des sédiments et pour le traitement des effluents des opérations de dragage et de traitement des sédiments, le CSL vise également à encourager le développement de technologies innovatrices pour la dépollution des sédiments contaminés.

Bien que ce document tente de présenter par une revue la plus exhaustive possible les derniers développements technologiques, il n'en demeure pas moins que certaines technologies, apparemment peu prometteuses actuellement pour le traitement des sédiments contaminés, peuvent le devenir avec des améliorations apportées au procédé et, inversement, certaines technologies prometteuses identifiées peuvent devenir moins appropriées, suite à des projets de démonstration ou d'essais de traitabilité ou suite à des expériences vécues dans des projets réels de traitement de sédiments.

Ainsi, avant de retenir un scénario et une technologie pour un site considéré, il est impératif de comparer au préalable la problématique du site où le scénario et la technologie ont été démontrés, en tenant compte de la nature et de l'importance de la contamination, de la nature des sédiments et des conditions environnementales et socio-économiques, avec la problématique du site considéré pour la restauration.

Malgré ces réserves, le présent document sur les scénarios et les technologies de traitement des sédiments permet de faire ressortir les conclusions et recommandations suivantes.

7.1 Gestion des matériaux de dragage

Comme dans la plupart des pays industrialisés, la gestion des matériaux de dragage et la présence de sédiments contaminés au fond de nos plans d'eau soulèvent pour les promoteurs, les contracteurs et les gouvernements des défis technologiques, économiques et environnementaux de plus en plus grands.

Ces défis sont d'autant plus importants que certains sédiments, qu'ils soient contaminés ou non, doivent être régulièrement dragués pour assurer une navigation commerciale sécuritaire et la prospérité de nombreuses activités industrielles et commerciales canadiennes qui dépendent des infrastructures portuaires pour leur approvisionnement et l'expédition de leurs produits finis.

Présentement, en présence de sédiments fortement contaminés, les activités de dragage d'entretien et d'agrandissement des installations portuaires sont de plus en plus compromises par l'absence de dragues environnementalement performantes et de centres autorisés de traitement ou d'élimination de sédiments contaminés. De plus, les promoteurs de projets et les compagnies de dragage sont souvent prises au dépourvu face à cette problématique.

En effet, alors que pour les projets antérieurs, seules des considérations techniques et économiques étaient prises en compte au moment de la conception, de l'évaluation et de la réalisation, les projets sont maintenant soumis à des réglementations de plus en plus sévères en matière de protection de l'environnement, réglementations qui de surcroît sont en continuelle évolution. De plus, les promoteurs et les soumissionnaires doivent désormais tenir compte des dimensions environnementales et sociales pour obtenir des certificats d'autorisation et doivent parfois faire face à des procédures de consultations publiques qui remettent souvent en question toute leur planification.

Recommandations

1. Les gouvernements doivent poursuivre leurs efforts pour mettre à la disposition des promoteurs de projets de dragage des centres ou des sites régionaux autorisés de traitement ou d'élimination aussi bien pour les sédiments considérés comme non contaminés que pour les sédiments contaminés.
2. Les gouvernements doivent poursuivre l'éducation des différents intervenants par la mise à jour ou la publication de guides vulgarisés de bonnes pratiques environnementales en matière d'échantillonnage et d'analyse des sédiments, de dragage, de traitement, d'élimination ou d'utilisation profitable des matériaux de dragage.
3. Les projets de dragage et de restauration de sédiments contaminés doivent faire systématiquement l'objet de contrôle et de suivi environnementaux afin de pouvoir d'une part, mesurer les impacts réels de ces projets et, d'autre part, apporter de continues améliorations dans la conception et la réalisation pour que ces travaux soient réalisés avec un minimum d'impacts négatifs pour l'environnement, voire une amélioration de l'environnement du site par des aménagements fauniques et socio-récréatifs.

7.2 Gestion des sédiments contaminés

La présence de sédiments contaminés soulève plusieurs inquiétudes de la part de la population et des ministères tant à vocation de développement industriel et économique que ceux responsables de la protection de l'environnement et des ressources du territoire. Alors que les premiers ministères voient le développement de leurs activités de production possiblement compromis, les seconds doivent évaluer les enjeux socio-économiques et environnementaux aussi bien d'une intervention que ceux liés à une non intervention, et doivent s'assurer de la pertinence de leur décision à long terme, compte tenu des ressources et usages en présence et de l'absence ou non de sources ponctuelles et diffuses de pollution au site considéré.

Recommandation

1. En raison des enjeux socio-économiques et environnementaux, toute décision de dépollution de sédiments contaminés doit faire l'objet d'une analyse au cas par cas pour bien comprendre l'ensemble de la problématique et ce, en considérant les paramètres suivants : présence de sources actives de pollution, nature et importance de la contamination, risques de remise en suspension des contaminants par des phénomènes naturels (périodes de crues automnales et printanières, orages et vents violents) ou artificiels (dragage, navigation commerciale et de plaisance) et présence de ressources et usages sensibles sur ou à proximité du site.

7.3 Technologies de traitement

Le présent document fait ressortir que bien que les recherches et le développement de technologies de traitement des sédiments datent seulement de quelques années, des progrès remarquables ont déjà été réalisés dans les domaines du pré-traitement, du traitement et de la mise en dépôt sécuritaire de sédiments contaminés.

Pré-traitement. - Des 26 technologies de pré-traitement considérées par l'USEPA et l'USACE pour les projets de dépollution des sédiments des Grands Lacs, un certain nombre étaient déjà utilisées depuis plusieurs années dans les projets de dragage pour assurer la sédimentation des particules en suspension et éventuellement l'assèchement des sédiments : bassins de sédimentation ou de confinement et injection de produits chimiques et d'éléments nutritifs dans les boues liquides de dragage pour

favoriser la sédimentation et la biodégradation des composés organiques dans les bassins.

Certaines technologies innovatrices (hydrocyclonage, centrifugation) font déjà l'objet de recherches et de projets de démonstration depuis plusieurs années en Europe pour le traitement des sédiments. Ces projets ont démontré que ces technologies étaient efficaces pour séparer les fractions contaminées des sédiments (parties fines) des fractions plus grossières (sable) généralement non contaminées et pour déshydrater les sédiments avant leur traitement. De telles technologies permettent également des réductions importantes des volumes à traiter et en conséquence des coûts de traitement, tout en facilitant la manipulation des sédiments à toutes les étapes du procédé. Ces technologies ont ou font actuellement l'objet de projets de démonstration aux États-Unis et au Canada.

Traitement des sédiments. - Pour le traitement des sédiments par voie biologique, extraction physico-chimique, chimique, thermique ou d'immobilisation, 23 des 79 technologies considérées au début de 1990 pour l'assainissement des sédiments des Grands Lacs, ont été retenues et certaines font présentement l'objet de démonstration tant du côté américain (Programme ARCS) que du côté canadien (Programme PAGL) en raison de leurs performances anticipées aux plans technique, environnemental et économique.

Dans les banques de technologies de traitement préparées par l'USEPA (banque VISITT) et le Centre de traitement des eaux usées de Burlington (banque SEDTEC) qui ont été discutées dans le présent document, une centaine de promoteurs de technologies prétendent pouvoir traiter les sédiments contaminés. Les chapitres précédents ont toutefois démontré que peu de technologies avaient fait réellement l'objet d'une validation par des projets de démonstration en banc d'essai, à l'échelle pilote ou à pleine échelle en Amérique du Nord.

Il a également été démontré que les projets de démonstration en cours un peu partout en Europe, aux États-Unis et au Canada ont déjà permis d'identifier des technologies efficaces pour le traitement des sédiments contaminés par voie biologique,

physico-chimique, thermique et que ces technologies sont disponibles au Canada pour réaliser des projets de démonstration de traitement des sédiments.

Selon le gouvernement néerlandais, bien que les technologies biologiques et d'extraction physico-chimique testées aient démontré une efficacité relative pour enlever ou détruire les contaminants des sédiments, il faudra encore de deux à dix ans de recherche pour développer des technologies plus efficaces et compétitives.

Entre temps, plusieurs projets de traitement des sédiments feront appel aux techniques habituelles visant leur mise en dépôt sécuritaire telles leur recouvrement par des matériaux propres, l'encapsulation en milieu aquatique dans des cellules spécialement aménagées à cette fin, dans des cellules partiellement submergées et aménagées pour la faune, l'encapsulation en rives via des projets de réfection ou d'expansion portuaire ou enfin, dans des cellules de confinement en milieu terrestre (cellules à sécurité maximale ou accrue) spécialement aménagées pour recevoir des sédiments contaminés ou dans des cellules approuvées de confinement des sols contaminés ou des déchets dits "spéciaux".

Traitement des effluents et lixiviats. - Les effluents liquides résultant de la manutention, du pré-traitement et du traitement des sédiments contaminés et les eaux de ruissellement ou de lixiviation des bassins ou des cellules de confinement, contaminés aussi bien par les métaux lourds que par des composés organiques, peuvent être traités par une gamme variée de technologies ayant déjà fait leur preuve pour la dépollution des eaux industrielles et municipales.

Des 42 technologies considérées pour le traitement des effluents et des lixiviats pour les projets de dépollution des sédiments des Grands Lacs, 18 technologies les plus compatibles pour l'enlèvement des métaux, des substances organiques et des solides en suspension dans les sédiments ont été retenues pour réaliser des projets de démonstration.

Grâce à la participation financière des gouvernements et des promoteurs ou vendeurs de technologies dans les projets de démonstration, de nouvelles technologies prometteuses émergent un peu partout à travers le monde. Ce développement, qui va

probablement s'accroître dans les prochaines années, devrait conduire à des améliorations continues des technologies qui deviendront de plus en plus performantes, polyvalentes et abordables au plan économique.

Recommandations

1. En raison des développements rapides des technologies de traitement, les gouvernements doivent continuer à publier et à mettre à jour les documents portant sur les technologies de traitement afin d'aider les promoteurs dans le choix de technologies performantes adaptées à la problématique de leur projet.
2. En raison de la spécificité des sites par rapport à la nature des sédiments et des contaminants à traiter, des essais de traitabilité avec des sédiments représentatifs du site devront continuer d'être exigés pour démontrer notamment l'efficacité des technologies retenues, pour préciser les quantités et la qualité des sous-produits des procédés et pour pouvoir mieux définir les coûts de traitement.

7.4 Impacts potentiels des technologies de traitement sur l'environnement et la santé humaine

Basé sur une étude ontarienne, le chapitre 6 de ce guide a présenté les impacts potentiels sur l'environnement et la santé humaine de 20 technologies de traitement à l'aide de 15 critères d'évaluation. Cette comparaison a fait ressortir que la sélection d'une technologie dépend dans une large mesure des particularités du site à traiter, à savoir : la nature de la contamination et des matrices à traiter, les conditions hydrologiques du site, la proximité de zones résidentielles, le temps et les ressources financières disponibles et la vocation du site. Certaines technologies sont appropriées sous certaines conditions mais elles ne le sont pas sous d'autres.

Cette comparaison a permis de faire ressortir également qu'il n'est pas possible de juger de la *meilleure* et de la *pire* des technologies en se basant sur une simple sommation de cotes de performance par rapport à des critères donnés. Ce choix doit être basé plutôt sur une analyse comparative approfondie des risques des technologies en fonction des caractéristiques détaillées du site à restaurer.

De même, le choix de technologies dépend également des particularités du site et des contaminants à traiter. Ainsi, si les technologies *in situ* qui n'impliquent pas l'excavation des matrices à traiter devraient normalement être préférées aux plans de la protection de l'environnement et de la santé humaine, elles présentent toutefois généralement de faibles efficacités d'enlèvement et de destruction des contaminants, sont plus difficiles à contrôler et à évaluer en termes d'efficacité de traitement, et nécessitent habituellement pour la plupart des périodes de traitement plus longues; de plus, pour certaines technologies, les contaminants non traités peuvent à la longue se désorber, migrer à l'extérieur du site et devenir biodisponibles (Kendall *et al.*, 1991).

Recommandations

1. Pour évaluer adéquatement les impacts sur l'environnement et la santé humaine des technologies de traitement, des essais de traitabilité ou des projets de démonstration en conditions réelles, avec des unités pilotes sur des matrices représentatives du site à traiter sont recommandés. De plus, toutes les étapes du traitement (excavation, pré-traitement, traitement, épuration des effluents et des émissions atmosphériques) et de l'élimination des sous-produits et des résidus de traitement doivent faire l'objet de contrôle et de suivi environnemental intensifs pour pouvoir mieux évaluer l'efficacité du traitement et en préciser les impacts réels pour l'environnement et la santé humaine.
2. Les études visant à quantifier les risques pour l'environnement et la santé humaine de la présence de sédiments contaminés au fond des plans d'eau doivent être poursuivies en parallèle.
3. Le développement de technologies innovatrices et prometteuses doit continuer d'être appuyé financièrement et être facilité aux plans technique et administratif par les divers paliers de gouvernement.
4. Un tel développement ne peut résulter que d'un effort collectif des gouvernements, des législateurs, des chercheurs, des vendeurs et des promoteurs de projets de développement.
5. Les gouvernements doivent continuer de publier des guides et des procédures pour assurer le suivi efficace des travaux de dépollution et des technologies de traitement et pour minimiser les impacts sur l'environnement et la santé humaine des travailleurs et de la population.

8 RÉFÉRENCES

- Annokkee, G. J. (1989). *TNO-Research on Treatment of Contaminated dredging Sludge; practical application in the Netherlands*. Coursus : "Dredging and the Environment", November 15th, 16th and 17th 1989, Central Dredging Association.
- Averett, Daniel E., Bret D. Perry, Elizabeth J. Torrey et Jan A. Miller (1990). *Review of Removal, Containment, and Treatment Technologies for Remediation of Contaminated Sediment in the Great Lakes*. Miscellaneous Paper EL-90-25, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Averett, Daniel E., et Mark J. Otis (1990). *New Bedford Harbor Superfund Project, Acushnet River Estuary Engineering Feasibility Study of Dredging and Dredged Material Disposal Alternatives; Report 12, Executive Summary*. Technical Report EL-88-15, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Averett, Daniel E., Michael R. Palermo, Mark J., Otis, et Pamela B. Rubinoff (1989). *New Bedford Harbor Superfund Project, Acushnet River Estuary Engineering Feasibility Study of Dredging and Dredged Material Disposal Alternatives. Report 11, Evaluation of Conceptual Dredging and Disposal Alternatives*. Technical Report EL-88-15, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Beck, Paul J. et Dennis W. Laflour et Louis Sabourin (1991). *Current Innovative and Emerging Excavate and Treatment Technologies for Contaminated Soils*. Proceedings GASReP, 1st Annual Groundwater and Soil Remediation R, D & D Symposium, January 30 and 31, 1991, Ottawa (Ontario).
- Bonham, Nancy (1989). *Techniques d'intervention pour le nettoyage des produits chimiques dangereux déposés sur les sédiments*. Environnement Canada, Direction du développement technologique et des services techniques, Protection de l'Environnement, Conservation et Protection, Rapport SPE 4/SP/1.
- Cambell, K.R. et D.J. Hallet (1992). *Demonstration Testing of a Thermal Gas Phase Reduction Process*. ELI ECO LOGIC International Inc..
- Cambell, K.R. et D.J. Hallet (1992). *PCB Destruction Using the EcoLogic Process*. ELI ECO LOGIC International Inc..
- Centre Saint-Laurent (1992a). *Critères intérimaires pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent*. Document préparé conjointement par Environnement Canada et le ministère de l'Environnement du Québec.

- Centre Saint-Laurent (1992b). *Validation des procédés de traitement des sédiments contaminés du Canal de Lachine*. Division des technologies de restauration, Direction du développement technologique, Centre Saint-Laurent, Environnement Canada.
- CH2M Hill Engineering Ltd. (1992). *R&D and Priorities for the DESRT Program. Final Report*. Prepared for Environment Canada.
- Crittenden, G.(1992). "Burn or Bury:Hazardous Waste Incinerators and Class One Landfills in Canada". *Hazardous Materials Management*, October 1992.
- Davis, John D., Scott MacKnight *et al.* (1990). *Environmental Considerations for Port and Harbor Developments*. World Bank Technical Paper Number 126, Transport and the Environmental Series.
- Dillen, M.V et W. Bruggeman (1992). *Development Program Treatment Processes for Polluted Aquatic Sediments in the Netherlands, Phase I (1989-1990)*. Directorate-General for Public Works and Water Management.
- Environment Canada (1992a). "Contaminated Sediment Treatment Technology Demonstration Series, *Cleanup Fund Fact Sheet Number 1 : Contaminated Sediment treatment Technology Program Overview Great Lakes Action Plan*". Great Lakes Environment Office, Ontario Region, Cat. No. En 40-394/1-1E.
- Environment Canada (1992b). "Contaminated Sediment Treatment Technology Demonstration Series, *Cleanup Fund Fact Sheet Number 2 : Ecologic Waste Destructor Laboratory Scale Demonstration*". Great Lakes Action Plan, Great Lakes Environment Office, Ontario Region, Cat. No. En 40-394/1-2E.
- Environment Canada (1993). *Abstracts- Workshop on the Removal and Treatment of Contaminated Sediments*. Environment Canada's Great Lakes Cleanup Fund, January 1993, Etobicoke, Ontario.
- Environnement Canada (1992c). *The Great Lakes Cleanup Fund, Annual Report 1990-91, Great Lakes Action Plan*. Great Lakes Environment Office, Ontario Region, Cat. No. 40-394/1-1E.
- Environnement Canada (1985). *Guide pour un examen environnemental préalable des projets de dragage et de génie maritime dans le Saint-Laurent*. Conservation et protection, En 21-50/1985.
- Environnement Canada (1991). "Le Fonds d'assainissement des Grands Lacs, Plan d'action pour les Grands Lacs". *Pochette d'information*, Bureau de l'environnement des Grands Lacs, Environnement Canada, Région de l'Ontario.
- Evans, G.M, (1990). "Estimating Innovative Technology Costs for the SITE Program"., *J. Air Waste Management Association*, Vol.40, No.7.,pp.1047-1051.

- Francingues, N. R., Jr., et al. (1985). *Management Strategy for Disposal of Dredged Material: Contaminant Testing and Controls*. Miscellaneous Paper D-85-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- Hayes, Donald F., T. Neil McLellan et Clifford L. Truitt (1988). *Demonstrations of Innovative and Conventional Dredging Equipment at Calumet Harbor, Illinois*. Miscellaneous Paper EL-88-1, US Army Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- Huston, John W. et William C. Huston (1976). *Techniques for Reducing Turbidity Associated with Present Dredging Procedures and Operations*, Contract Report d-76-4. US Army Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- Intera Kenting (1990). *Final Report on Current and Innovative Excavate and Treatment Technologies for the Remediation of Contaminated Soils*. Prepared for The National Groundwater and Soil Remediation Program (GASReP), Excavate and Treat Sub-Committee.
- Kendall, P.R.W., (1991). *Identification of Potential Environmental and Health Concerns of Soil Remediation Technologies*, Technical Report, Environmental Protection Office, Department of Public Health, City of Toronto.
- Lavalin Environnement (1990). *Réglementation environnementale sur le dragage et la gestion des sédiments dragués-Résumé*. Rapport préparé pour la Garde Côtière Canadienne, Développement des voies navigables.
- Lavalin Environnement et Sanexen (1990). *Équipements et méthodes de dragage recommandés sur le fleuve Saint-Laurent*. Rapport final. Préparé pour Environnement Canada, Centre Saint-Laurent.
- Lavalin Environnement Inc., (1991) *Technologies de traitement des sédiments contaminés du canal de Lachine*. Rapport préparé pour Travaux Publics Canada, Montréal.
- MacRitchie, S. et M. Diamond (1991). *Identification of Potential Environmental and Health Concerns of Soil Remediation Technologies*. Technical Report, Environmental Protection Office, Department of Public Health, City of Toronto, November 1991.
- Mallette A., (1990). *Répertoire des technologies applicables aux sédiments*. Centre Saint-Laurent, Conservation et Protection, Environnement Canada, Montréal.
- Manahan, S.E. (1990). *Hazardous Waste Chemistry, Toxicology and Treatment*. Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Michigan 48118., ISBN 0-87371-209-9.
- McLellan, Thomas N., Robert N. Havis, Donald F. Hayes et Gene L. Raymond (1989). *Field Studies of Sediment Resuspension Characteristics of Selected Dredges*. Technical Report HL-89-9, US Army Waterways Experiment Station, Vicksburg.

- Ministry of Transport Public Works and Water Management of Netherlands (1992). *Development Programme Treatment Processus for Polluted Aquatic Sediments in the Netherlands, Phase I (1989-1990)*. Directorate-General for Public Works and Water Management, Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment.
- Ministry of Transport, Public Works of Netherlands, Rotterdam Public Works Department, and the Rotterdam Port Authority (1992). *The Storage of Dredged Sludge from the lower Rhine delta*. Rotterdam Public Works, Information and Public Relations Office, Galvanistraat 15, Rotterdam.
- Palermo, Michael R., et Virginia R. Pankow (1988). *New Bedford Harbor Superfund Project, Acushnet River Estuary Engineering Feasibility Study of Dredging and Dredged Material Disposal Alternatives; Report 10, Evaluation of Dredging and Dredging Control Technologies*. Technical Report EL-88-15, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Parametrix, Inc.(1989). *Confined Disposal of Contaminated Sediments. Documentation of Standards Development -Appendices* .Prepared in Association with Ogden Beeman and Associates Inc., Hart-Crowler Inc., Science Applications International Corp., Pacific groundwater Group, Janet N. Knox Inc., for Washington Department of Ecology.
- Parametrix, Inc.(1990). *Standards for Confined Disposal of Contaminated Sediments Development* Documentation.Prepared in Association with Ogden Beeman and Associates Inc., Hart-Crowler Inc., Science Applications International Corp., Pacific groundwater Group, Janet N. Knox Inc. for Washington Department of Ecology.
- Peddicord.R.K., et al.(1986). *General Decisionmaking Framework for Management of Dredged Material-Example Application to Commencement Bay,Washington*. Miscellaneous Paper D-86- ,US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- Petitpas, A. (1990). *La décontamination des sols ; état actuel et besoins en développement technologique*. Rapport final soumis au Centre Saint-Laurent.
- Raymond, Gene I. (1984). *Techniques to Reduce the Sediment Resuspension Caused by Dredging*. Miscellaneous Paper HL-84-3, US Army Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- Roche (1980). *Guide relatif au dragage et à l'élimination des sédiments contaminés dans le Saint-Laurent* Volume 1, Préparé pour Environnement Canada, Service de protection de l'environnement.
- Rochon R. et M. Chevalier (1987). *Échantillonnage et conservation des sédiments en vue de la réalisation des projets de dragage*. Conservation et Protection, région du Québec, Environnement Canada.

- Rochon, René (1984). *Problématique des activités de dragage*. Montréal, Environnement Canada, Service de la protection de l'environnement.
- Rochon, René et Laurie Sarazin (1987) *Technical Guide to the Environmental Screening of Dredging Projects and Marina Developments in Eastern Canada*. Environment Canada, Conservation and Protection. Québec Region and Ontario Region
- Samson, R. (1992). *Les besoins en R&D et le support scientifique disponible pour l'industrie québécoise de la biorestauration des sites contaminés*. Document pour fin de discussion. Rencontre technologique, sites contaminés, Conseil des bio-industries environnementales. Corporation de développement économique de Laval et le Centre québécois de la valorisation de la biomasse.
- Shearer, T.L. (1991). "A Comparison of In-situ Vitrification and Rotary Kiln Incineration for Soils Treatment", *J. Air & Waste Management Association*, Vol. 41, No. 9, pp.1259-1264.
- Turcotte, P. (1991). *Le procédé AOSTRA-Taciuk : Traitement thermique des sols et des déchets contaminés par des substances organiques*. Conférence présentée au séminaire sur la décontamination et la revalorisation des sols contaminés, Coopération Québec Wallonne, Montréal, 30 septembre et 1^{er} octobre 1991.
- US Army Corps of Engineers.(1983). *Dredging and Dredged Material Disposal*. Engineer Manual 1110-2-5025, 25 March 1983, Washington DC.
- US Army Corps of Engineers.(1987). *Confined Disposal of Dredged Material*. Engineer Manual 1110-2-5027, 30 September 1987, Washington DC.
- US Army Corps of Engineers.(1987). *Dredged Material Beneficial Uses*. Engineer Manual 1110-2-5026, 30 June 1987, Washington DC.
- USEPA (1989a). *Guide for conducting Treatability Studies Under CERCLA, Interim Final*. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, Office of Research and Development, Cincinnati, December 1989, EPS/540/2-89/058.
- USEPA (1989b). *Innovative Technology : Glycolate Dehalogenation*. Solid Waste and Emergency Response, November 1989, Directive 9200 5-254FS.
- USEPA (1989c). *Innovative Technology : In-Situ Vitrification*. Solid Waste and Emergency Response, November 1989, Directive 9200 5-251 FS.
- USEPA (1989d). *Innovative Technology : Slurry-Phase Biodegradation*. Solid Waste and Emergency Response, Directive 9200 5-252 FS.
- USEPA (1990a). *Workshop on Innovative Technologies for Treatment of Contaminated Sediments*. June 13-14,1990, Summary Report, Center for Environmental Research Information, Office of Research and Development, EPA/600/2-90/054.

- USEPA (1990b). *The Superfund Innovative Technology Evaluation Program : Technology Profiles*. Office of Solid Wastes and Emergency Response, Washington, Office of Research and Development, Washington, EPA/540/5-90/006.
- USEPA (1990c). *Chemical Dehalogenation Treatment : APEG Treatment*. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, Office of Research and Development, Cincinnati, Engineering Bulletin, EPA/540/2-90/015.
- USEPA (1990f). *Soil Washing*. Treatment Office of Emergency and Remedial Response, Washington, Office of Research and Development, Cincinnati, Engineering Bulletin, EPA/540/2-90/017.
- USEPA (1990g). *Solvent Extraction*. Treatment. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, Office of Research and Development, Cincinnati, Engineering Bulletin, EPA/540/2-90/015.
- USEPA (1991a). *Contaminated Sediments Seminar.-Speaker Slide Copies*. SERI-91-19, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio 45268.
- USEPA (1991b). *Handbook-Remediation of Contaminated Sediments*. Center for Environmental Research Information, Office of Research and Development, EPA/625/6-91/028.
- USEPA (1991c). *Innovative Treatment Technologies. Overview and Guide to Information Sources*. Office of Solid Waste and Emergency Response, Technology Innovation Office, EPA/540/9-91/002.
- USEPA (1991e). *In Situ Soil Vapor Extraction Treatment*. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, Office of Research and Development, Cincinnati, Engineering Bulletin, EPA/540/2-91/006.
- USEPA (1991f). *Thermal Desorption Treatment*. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, Office of Research and Development, Cincinnati, Engineering Bulletin, EPA/540/2-91/008.
- USEPA (1991g). *Handbook, Stabilisation Technologies for RCRA Correctives Actions*. Office of Research and Development, Washington, EPA/625/6-91/026.
- USEPA (1991h). *The Superfund Innovative technology Evaluation : Technology Profiles*, Fourth Edition, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, Office of Research and Development, Cincinnati, Washington, EPA/540/5-91/008.
- USEPA (1992a). *Assessment and Remediation of Contaminated Sediments (ARCS)* . 1992 Work Plan, Great Lakes National Program Office.

- USEPA (1992b). *VISITT, Vendor Information System for Innovative Treatment Technologies - USER MANUAL (VISITT VERSION 1.0)*. Office of Solid Wastes and Emergency Response Technology Innovation Office (OS-110W), EPA/542/R-92/001, Number 1.
- USEPA (1992c). *Soil/Sediment Washing System- Bergmann USA*. SITRE-Superfund Innovative Technology Evaluation, Demonstration Bulletin, EPA/540/MR-92/075.
- USEPA (1992d). *Pyrolysis Treatment*. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, Office of Research and Development, Cincinnati, Engineering Bulletin, EPA/540/S-92/010.
- USEPA (1992e). *Guide for Conducting Treatability. under CERCLA Solvent Extraction*. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, EPA/540/R-92/016.
- USEPA (1992f). *The Superfund Innovative Technology Evaluation Program : Technology Profiles. Fifth Edition*. Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, Office of Research and Development, Washington, EPA/540/R-92/077.
- USEPA (1992g). *SoilTech Anaerobic Thermal Processor : Outboard Marine Corporation Site*. SITRE-Superfund Innovative Technology Evaluation, Demonstration Bulletin, EPA/540/MR-92/078.
- USEPA (1992h). *AOSTRA-SoilTech Anaerobic Thermal Processor : Wide Beach Development Site*. SITRE-Superfund Innovative Technology Evaluation, Demonstration Bulletin, EPA/540/MR-92/008.
- USEPA (1988). *Technology Screening Guide for Treatment of CERCLA Soils and Sludges*. Office of Program Management, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, September 198a, EPS/540/2-88/004.
- USEPA(1990d). *Mobile/Transportable Incineration Treatment*. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, Office of Research and Development, Cincinnati, Engineering Bulletin, EPA/540/2-90/014.
- USEPA(1990e). *Slurry Biodegradation*. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, Office of Research and Development, Cincinnati, Engineering Bulletin, EPA/540/2-90/016.
- Van Dillen, M.R.B. (1989). *Methods to Treat Contaminated Dredged Material*. Kursus: Dredging and the Environment. November 15, 16 and 17 1989, Central Dredging Association.
- Van Oostrum, R.W. (1992). *Dredging Contaminated Sediments in the Netherlands*. International Symposium On Environmental Dredging- A Solution to Contaminated Sediments?, September 20-October 2, Buffalo, New York, 1992.

- Van Raalte, Ir. G.H..(1989). *Technical aspects of the dredging activity in relation to the environment..* Kursus:"Dredging and the Environment", November 15, 16 and 17 1989, Central Dredging Association.
- Van Veen, H.J. (1988). *Technology for Remediation Contaminated Sediments in the Netherlands.* Paper presented at the Technology Transfer Symposium for the Remediation of Contaminated Sediments in the Great Lakes, Burlington Ontario, Canada, October 1988.
- Wardlaw, C. et P. Bucens, (1992). *The Toronto Harbour Sediment Treatment Pilot Scale Demonstration.* International Symposium On Environmental Dredging- A Solution to Contaminated Sediments?, September 20-October 2, Buffalo, New York, 1992.
- Wastewater Technology Centre (1992a). *Sediment Treatment Technologies Database, SEDTEC.* Great Lakes Cleanup Fund Contaminated Sediment treatment Technologies Program, Burlington, Canada.
- Wastewater Technology Centre (1992b). "EcoLogic Pilot-scale Demonstration in Hamilton Harbour", *WTC, Newsletter*, No.22, ISSN 0829-352X.

ANNEXE A

**PROGRAMMES DISPONIBLES DE FINANCEMENT POUR LE
DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE**

Programmes de financement pour le développement de technologies de dépollution

NOM	ABRÉVIATION	GESTIONNAIRES	DOMAINES D'APPLICATION	ORGANISMES ADMISSIBLES	DURÉE (Montant)	MODALITÉS D'APPLICATION	CONTACTS
Programme de développement et de démonstration technologique	PDDT	Centre Saint-Laurent	Technologies de traitement des : . sédiments . sols . déchets dangereux . rejets industriels	.Industries .Secteur privé .Municipalités .Centres de recherche .Universités	31/3/98	Proposition spontanée	Yvan Vallquette EC, Montréal Tel: (514) 283-3557 René Rochon EC, Montréal Tel: (514) 283-0676 Gérald Girouard EC, Montréal Tel: (514) 283-6536
Programme d'Innovation environnementale	PIE	Ministère des Approvisionnement et Services (MAS), Canada	.Assainissement(air/eau/sols) .Exploitation durable .Protection des espèces et des espaces exceptionnels .Préservation de l'intégrité du Nord canadien .Processus décisionnel .Atténuation des conséquences des catastrophes écologiques	.Industries .Universités .Groupes autochtones .Organisations non-gouvernementales .Particuliers	Non déterminé	Proposition spontanée à MAS Canada	MAS Mike Strauss Hull (Québec) Tel: (819) 956-1770 Joseph Caramagno Montréal (Québec) Tel: (514) 283-2137
Technologies porteuses de solutions environnementales (Programme de commercialisation des technologies environnementales, Plan vert)	TPS	. Industries, Sciences et Technologie Canada (ISTC) .Environnement Canada (EC) .Conseil national de recherches du Canada (CNRC)-PARI	.Domaine de pointe en matière de technologie de l'environnement incluant la prévention et le contrôle de la pollution .Mise au point, essais et commercialisation de nouvelles technologies à l'aide de projets pilotes	.Sociétés et partenariats à but lucratif établis au Canada .Regroupement (entreprise, université ou centre de recherche)	31/3/97	.Demande préliminaire et demande officielle	Emile Beauchamps ISCT, Montréal Tel: (514) 973-5000 Yvan Vallquette EC, Montréal Tel: (514) 283-3557 Bureau du PARI CNRC, Montréal Tel: (514) 283-8231
Programme de développement et de démonstration de techniques d'assainissement de lieux contaminés	DÉTALC (DESRT)	.Environnement Canada (EC) .Ministère de l'Environnement du Québec (MENVIQ)	Nouvelles techniques (sols/sédiments) .caractérisation des sols .évaluation .assainissement .contrôle de conformité	. Secteur privé . Universités . Municipalités . Industries	31/3/95 50 Millions \$ Canada 12,5 Millions Québec	.Appel de propositions ou .Proposition spontanée	Bureau du DÉTALC Environnement Canada David Hutchison Hull (Québec) Tel: (819) 953-5228 Centre Saint-Laurent Environnement Canada Gérald Girouard Montréal (Québec) Tel: (514) 283-9274 MENVIQ (Québec) Michel Goulet Québec (Québec) Tél : (418)643-8161

NOM	ABRÉVIATION	GESTIONNAIRES	DOMAINES D'APPLICATION	ORGANISMES ADMISSIBLES	DURÉE (Montant)	MODALITÉS D'APPLICATION	CONTACTS
Fonds de recherche de développement technologique en environnement	FRDTE	Ministère de l'Environnement du Québec (MENVIQ)	.Gestion des déchets et des résidus: réemploi, réduction, recyclage, valori- sation et élimination sécuritaire) .Assainissement et restauration (eau, air, sol et milieux dégradés) . Développement durable	.Milieux de recherche .Secteur privé .Secteur communautaire	31/3/94	.Proposition spon- tanée	Yvon Gosselin MENVIQ (Québec) Tél : (514)643-9262 Michel Goulet Québec (Québec) Tél : (418)643-8161

ANNEXE B

**LISTE DES CONTAMINANTS DANS CHAQUE CATÉGORIE
DÉFINIE PAR L'USEPA**

LISTE DES CONTAMINANTS DANS CHAQUE CATÉGORIE DÉFINIE PAR L'USEPA (USEPA, 1988)

HALOGÉNÉS VOLATILS

Bromodichlorométhane
 Bromoforme
 Bromométhane
 Tétrachlorure de carbone
 Chlorodibromométhane
 Chlorobenzène
 Chloroéthane
 Chloroforme
 Chlorométhane
 Chloropropane
 Dibromométhane
 Cis-1,3-dichloropropène
 Dichloro-1,1 éthane
 Dichloro-1,2 éthane
 Dichloro-1,1 éthylène
 Dichloro-1,2 éthylène
 Dichloro-1,2 propane
 Trichlorofluorométhane
 Chlorure de méthylène
 Tétrachloro-1,1,2,2 éthane
 Tétrachloroéthane
 Trichloro-1,1,1 éthane
 Trichloro-1,1,2 éthane
 Dichloro-1,2 trans éthylène
 Dichloro-1,3 trans propène
 Trichloro-1,1,2, trifluoro-1,2,2 éthane
 Trichloroéthène
 Chlorure de vinyle
 Hydrocarbures chlorés totaux
 Hexachloro-éthane
 Dichlorométhane

HALOGÉNÉS SEMI-VOLATILS

Chloro-2 phénol
 Dichloro-2,4 phénol
 Hexachlorocyclopentadiène
 p-chloro-m-crésol
 Pentachlorophénol
 Tétrachlorophénol
 Trichloro-2,4,5 phénol
 Trichloro-2,4,6 phénol
 Bis(chloro-2 éthoxy)méthane
 Bis(chloro-2)éthyléther
 Bis(chloro-2)isopropyléther
 Bromo-4 phényl phényl éther
 Chloro-4 aniline
 Chloro-2 naphthalène
 Chloro-4-phényl phényléther
 Dichloro-1,2 benzène
 Dichloro-1,3 benzène
 Dichloro-1,4 benzène
 Dichloro-3,3 benzidine
 Hexachlorobenzène
 Hexachlorobutadiène
 Trichloro-1,2,4 benzène
 Bis(chloro-2 éthoxy)phthalate
 Bis(chloro-2 éthoxy)éther
 Bis-1,2 (chloro-2 éthoxy)éthane

NON HALOGÉNÉS VOLATILS

Acétone
 Acroléine
 Acrylonitrile
 Benzène
 Butanone-2
 Bisulfure de carbone
 Cyclohexanone
 Acétate d'éthyle
 Éthyléther
 Éthylbenzène
 Hexanone-2
 Isobutanol
 Méthanol
 Méthyl isobutyle cétone
 Méthyl-4 pentanone 2
 Alcool butylique
 Styrene
 Toluène
 Triméthylbenzène
 Acétate de vinyle
 Xylènes

NON HALOGÉNÉS SEMI-VOLATILS

Acide benzoïque
 Crésol
 Diméthyl-2,4 phénol
 Dinitro-2,4 phénol
 Méthyl-2 phénol
 Méthyl-4 phénol
 Nitro-2 phénol
 Nitro-4-phénol
 Phénol
 Acénaphthène
 Acénaphthylène
 Anthracène
 Benzidine
 Benzo(a)anthracène
 Benzo(b)fluoranthène
 Benzo(k)fluoranthène
 Benzo(a)pyrène
 Benzo(g,h,i)pérylène
 Alcool benzylique
 Bis(éthyl-2 héryl)phthalate
 Butyl benzyl phthalate
 Chrysène
 Dibenzo(a,h)anthracène
 Dibenzofuranne
 Phthalate de diéthyle
 Phthalate de diméthyle
 Phthalate de di-n-butyl
 Dinitro-4,6 méthyl-2 phénol
 Dinitro-2,4 toluène
 Dinitro-2,6 toluène
 Phthalate d'octyle
 Diphenyl-1,2 hydrazine
 Fluoranthène
 Fluorène
 Indéno(1,2,3-c,d)pyrène
 Isophorone
 Méthyl-2 naphthalène
 Naphthalène
 Nitro-2-aniline
 Nitro-3 aniline

**NON HALOGÉNÉS
SEMI-VOLATILS (SUITE)**

Nitro-4 aniline
Nitrobenzène
n-nitrosodiméthylamine
n-nitrosodi-n-propylamine
n-nitrosodi-n-propylamine
n-nitrosodiphénylamine
Phénanthrène
Pyrène
Pyridine
Méthy-2 naphthalène
Bis phthalate
Phénylnaphthalène

PESTICIDES

Aldrine
alpha Bhc
beta Bhc
delta Bhc
gamma Bhc
Chlordane
4,4'-DDD
4,4'-DDE
4,4'-DDT
Dieldrine
Endosulfane I
Endosulfane II
Sulfate d'endosulfane
Endrine
Endrine aldéhyde
Éthion
Éthylparathion
Heptachlore
Heptachlore oxyde
Malathion
Méthylparathion
Parathion
Toxaphène

MÉTAUX VOLATILS

Arsenic
Bismuth
Plomb
Mercure
Étain
Sélénium

MÉTAUX NON VOLATILS

Aluminium
Antimoine
Barium
Béryllium
Bismuth
Cadmium
Calcium
Chrome
Cuivre
Cobalt
Fer
Magnésium
Manganèse
Nickel
Potassium

**MÉTAUX NON VOLATILS
(SUITE)**

Sélénium
Sodium
Vanadium
Zinc

AUTRES CATÉGORIES

Amiante

**SUBSTANCES CORROSIVES
INORGANIQUES**

Acide chlorohydrique
Acide nitrique
Acide fluorhydrique
Acide sulfurique
Hydroxyde de sodium
Hydroxyde de calcium
Carbonate de calcium
Carbonate de potassium

BPC

Arochlorore-1016
Arochlorore-1221
Arochlorore-1232
Arochlorore-1242
Arochlorore-1248
Arochlorore-1254
Arochlorore-1260
(sinon précisé)

**SUBSTANCES CORROSIVES
ORGANIQUES**

Acide acétique
Chlorure d'acétyle
Aniline
Acides sulfoniques aromatiques
Acide crésylique
Acide formique

**ÉLÉMENTS TOXIQUES
NON MÉTALLIQUES**

Fluor
Bismuth

SUBSTANCES RADIOACTIVES

Isotopes radioactifs d'iode, de barium, d'uranium
Radium
Radioactivité gamma
Radioactivité alpha
Radioactivité bêta

CYANURES ORGANIQUES

Organonitriles

CYANURES INORGANIQUES

Cyanure
Cyanures métalliques (ex. ferrocyanure, cyanure de sodium)

OXYDANTS

Chlorates
Chromates

RÉDUCTEURS

Sulfures
Phosphures
Hydrazine

ANNEXE C

**ADRESSES DES PROMOTEURS OU DES DÉVELOPPEURS DE
TECHNOLOGIES DE TRAITEMENT DES SOLS ET/OU DES SÉDIMENTS**

**ADRESSES DES PROMOTEURS OU DES DÉVELOPPEURS
DE TECHNOLOGIES DE TRAITEMENT**

(Sources : Intera Kenting, 1990; USEPA, 1990b; USEPA, 1991c; USEPA, 1991h;
Waste Technology Centre, 1992a)

PRÉ-TRAITEMENT

S A Extract
Siège social
Zi de la Gare BP 62
44980 Sainte-Luce-sur-Loire
France

Cintec Environnement Inc.
2401 Lapierre, Lasalle, Qc
Canada, H8N 1B7
P. Guérin (514) 364-6860

J.Y. Barbier
Tél. : 40 25 66 00

Derrick Environmental Sevices Corp.
590 Duke Road
Buffalo, NY
USA 14225

S. Valine
Tél. : (716)683-9010

Silt n.v.
Tijdokstraat, 28
Zeebrugge
Belgium B-8380

K. van Craenenbroeck
Tél. : 32 50 546144

BIOLOGIQUE

Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO)
TNO/MT
Postbus 342
3800 Ah, Apeldoorn
The Netherlands

G.J. Annokkee
Tél. : 080-601212

Encore Environmental
344 West Henderson Road
Columbus, OH
USA 43214

Tél. : (416)279-2222

Development Programm Treatment Processes
for Polluted Aquatic Sediments (DTPP)
P.O. Box 17, Maerlane 16
8200 AA Leleystack
The Netherlands

Tél. : 31 3200 70456/70533

Dearborn Environmental Consulting Group
P.O. Box 3060, Station A
Mississauga, Ontario
Canada, L5A 3T5

A. Seech
Tél. : (416)279-2222

HAECON N.V.
Deinsesteenweg 110
Ghent, Drogen
Belgium B-9031

B. Malherbe
Tél. : 32 91 265094

Institute of Gas Technology
3424 South State St.
Chigago, IL
USA 60616

V.J. Srivastava
Tél. : (312) 567-5282

SNC-Lavalin
2 Place Félix-Martin
Montréal, Québec
Canada, H2Z 1Z3

F.Dionne
Tél. : (514) 866-1000

Ecova Corporation
3820 159th Avenue NE
Redmond, Washington
USA 98052

Arnon Sugar
Tél. : (206)883-1900

Roy F. Weston
Weston May
West Chester, PA
USA 19380

R. T. Williams
Tél. : (215)363-0774

Dearborn Environmental Consulting Group
3451 Erindale Station Road
P.O. Box 3060, Station A
Mississauga, Ontario
Canada, L5A 3T5

Alan Seech
Tél. : (416)279-2222

TNO/MT
Postbus 342
3800 Ah Appeldoorn
The Netherlands

G.J. Annokke
Tél. : 055-493940

Remediation Technologies, Inc.
Damonhill Square
9 Pond Lane
Concord, Massachusetts
USA 01742

H. K. Schmidt
Tél. : (508)371-1422

EXTRACTION

CF Systems Corporation
3D Gill Street
Woburn, MA
USA 01801

Chris Shallice
Tél. : (617) 937-0800

Dehydro-Tech Corporation
6 Great Meadow Lane
East Hanover, NJ
USA 07936

T.C. Holcombe
Tél : (201)887-2182

Resources Conservation Corporation
3630 Cornus Lane
Ellicott City, MD
USA 21043

Lanny Weimer
Tél. : (301) 596-6066

Art International Inc.
273 Franklin Road
Randolph, N.J.
USA 07869

W. Steiner
Tél. : (201) 361-8840

Publics Works and Water Management of the Netherlands
Rijkswaterstaat
Central Dredging Division
P.O. Box 2280
2280 HV Rijswijk, The Netherlands

Bergman USA Inc.
72-II West Stafford Rd.
Stafford Springs, CT
USA 06076-0535

R.P. Traver
Tél. : (203) 684-6844

Altech Consulting Ltd
225 Sheppard Ave. W.
Willowdale, Ontario
Canada, M2N 1N2

A.R. Keen
Tél.: (416) 226-0148

Toronto Harbours Commission
60 Harbour Street
Toronto, Ontario
Canada, M5J 1B7

Dennis Lang
Tél. : (416) 863-4830

Beak Consulting Ltd
42 Arrow Road
Guelph, Ontario
Canada, M1K 1S6

D. Major
Tél. : (519) 763-2325

DeVoe Environmental Laboratories
1130 Valdavia Way
Palm Springs, CA
USA 92262

I. DeVoe
Tél. : (619) 778-6000

BioVersal USA Inc.
10626 Beechnut Court
Fairfax, VA
USA 22039

C. L. Wilde
Tél.: (703) 250-3442

Recycling Sciences International Inc.
30 South Wacker Drive, Suite 1420
Chicago, IL
USA 60606

A. Novelli
Tél.: (312)559-0122

Ecotechniek BV
Beneluxlaan 9, P. O. 8447
Utrecht, RK
The Netherlands 3503

Tél.: 31 30 957922

COGNIS Inc.
2330 Circadian Way
Santa Rosa, CA
USA 95407

J. Mielenz
Tél. : (707) 576-6223

Tallon Metal Technologies Inc.
110 Leacock Road
Pointe-Claire, Québec
Canada, H9R 1H1

B. Holbein/D.Hall
Tél. : (514) 694-0080

Lavage des sols

Harmon Environmental Services Inc.
1530 Alabama Street
Auburn, Alabama
USA 36830

William C. Webster
Tél. : (205) 821-9253

IT Corporation
312 Directors Drive
Knoxville, Tennessee
USA 37923

R. D. Fox
Tél : (615) 690-3211

Roy F. Weston Inc.
P.O. Box 177
Ohmsett Facility-Waterfront
Highway 36
Leonardo, New Jersey
USA 07737

James Nash
Tél. : (201) 906-3464

Extraction aux solvants

Sanexen International
3027 Harvester Road, Unit 204
Burlington, Ontario
Canada, L7N 3G2

Mark Cvar
Tél. : (416) 681-3366

BP Oil Company
200 Public Square
Cleveland, Ohio
USA 44114-2375

John Laskowski
Tél. : (216) 586-3968

U.S. EPA, Risk Reduction Engineering Laboratory
26 West Martin Luther King Drive
Cincinnati, Ohio
USA 45628

Ed Bates
Tél. : (513) 569-7774

Excalibur Enterprises Inc.
13661 E. Marina Drive, #112
Aurora, CO
USA 80014

G. Downey
Tél. : (303)752-4363

BioTrol Inc.
210 Carnegie Center, Suite 101
Princeton, NJ
USA 08540

P. Sheehan
Tél. : (609)951-0314

Batelle Memorial institute
505 King Avenue
Columbus, OH
USA 43201

S. Chauhan
Tél. : (614)424-4812

Soil Cleaning Company of America Inc.
753 Peralta Avenue
San Leandro, CA
USA 95477

V. Rothlisberger
Tél. : (415)568-1234

Ecova Corporation
3820 159th Avenue NE
Redmond, WA
USA 98052

A. Bourquin
Tél. : (206)883-1900

USEPA Risk Reduction
Engineering Laboratory
Woodbridge Avenue
Edison, NJ
USA 08837-3679

R. Traver
Tél. : (201)321-6677

Heijmans Milieutechniek BV
Graafsebaan 13
NL-5240 BB Rosmalen

Tél. : 31 0 4192-89358

NBM Bodemsanering BV
Zonweg 33
P.O. Box 16032
NL-2500 BA Den Haag

Tél. : 31 0 70-3814331

Heidemij Restosoffendiensten BV
Afdeling Milieutechniek
Sluisweg
P.O. Box 660
NL-5140 AR Waalwijk

Tél. : 31 0 4160-44080

CHIMIQUE

Eli Eco Logic International Inc.
143 Dennis Street
Rockwood, Ontario
Canada, N0B 2K0

J. Nash/D. Hallet
Tél. : (519) 856-9591

Galson Remediation Corporation
6627 Joy Road
East Syracuse, New York
USA 13057

Robert L. Peterson
Tél. : (315) 436-5160

U.S. EPA 15-210
Emergency Response Division
401 M Street, SW
Washington DC
USA 20460

David Lopez
Tél. : (202) 382-2471

THERMIQUE

Incinérateurs à four rotatif

Weston Services Inc.
Weston May
West Chester, Pa.
USA 19380

John W. Noland
Tél. : (215) 430-3103

ENSCO Environmental Services Inc.
First Tennessee Bank Building
Franklin, Tn.
USA 37064

Tél. : (615) 794-1351

IT Corporation
321 Directors Drive
Knoxville, Tn. 37923
USA 37923

Tél. : (615) 690-3211

Vesta Technology Corp.
1670, West McNab Road
Ft. Lauderdale, Fl.
USA 33309

Tél. : (305) 978-1300

Incinérateurs à lit mobile

Ogden Environmental Services, Inc.
10955 John Jay Hopkins Drive
San Diego, Ca.
USA 92121

C. M. Hashiguchi
Tél. : (619) 455-3045

Superburn Systems, Ltd.
#201-2034 West 12th Avenue
Vancouver, B.C.
Canada, V6J 2G2

B. Putt
Tél. : (604) 732-7592

Incinération à infrarouge

O.H. Materials Canada, Ltd.
2180 Speers Road
Oakville, Ontario
Canada, L6J 6L5

ECOVA Corp
12790 Merit Drive
Dallas, Texas
USA 75251

Tél. : (416) 847-1700

Westinghouse/Haztech
5280 Panola Industrial Blvd.
Decatur, Ga
USA 30035

Tél. : (214) 404-7540

Incinération à l'oxygène enrichi

American Combustion Technologies
4476 Park Drive, Suite 100
Norcross, Ga
USA 30079

Tél. : (404) 981-9332

G. Gitman
Tél. : (404) 564-4180

Incinérateur à plateaux

PPM Canada Ltd.
1 Yonge Street, Suite 801
Toronto, Ontario
Canada, M5E 1E5

Tél. : (416) 364-1919

À arc à plasma

Westinghouse
P.O. Box 286
Madison, Pa
USA 15663

Tél. : (412) 722-5714

Retech Inc.
100 Henry Station Road
Ukiah, Ca
USA 95482

Tél. : (707) 462-6522

Von Roll Inc.
Environmental Engineering Division
3080 Nothwoods Circle, Suite 200
Norcross, Georgia
USA 30071

Tél. : (404) 729-0500

Autres

Soil Tech Inc.
94 Inverness Terrace East, Suite 100
Englewood, CO
USA 80112

Tél. : (303) 790-1410

Cintec Environnement Inc.
2401 Lapierre, Lasalle, Qc
Canada, H8N 1B7

Pierre Turcotte
Tél. : (514) 364-6860

US Army Toxic and Hazardous Materials Agency
Aberdeen Proving Ground
Maryland
USA 21010-5401

D. Averett
Tél. : (601) 634-3949

Chemical Waste Management Inc.
3001 Butterfield Road
Oak Brook, IL
USA 60521

T. Briggs
Tél. : (708) 218-1500

Zimpro Passavant Environmental Systems Inc.
310 W. Military Road
Rochschild, W.
USA 54474

W. M. Copa
Tél. : (715) 359-7211

Recycling Sciences International
30 South Wacker Drive
Chigago, IL
USA 60606

W.C. Meenan
Tél. : (312) 559-0122

UMATAC Industrial Process
210-2880 Glenmore Trail, S.E.
Calgary, Alberta
Canada, T2C 2E7

R.M. Ritcey
Tél. : (403) 279-8080

Lurgi Canada Ltd.
100 Adelaide St. W.
Toronto, Ontario
Canada, M5H 1S3

R.F. Day
Tél. : (416) 366-5611

ECOVA Corporation (Shirco)
3820 159th Avenue, NE
Redmond, WA
USA 98052

J. Cioffi
Tél. : (206) 883-1900

Remediation Technologies Inc.
9 Pond Lane
Concord, MA
USA 01742

M. McCabe
Tél. : (508) 371-1422

Immobilisation

Pol-Con Systems Ltd
300-3665 Kingsway
Vancouver, B.C
Canada, V5R 5W2

D. Jones
Tél. : (604) 436-3440.

Emtech Environmental Services Inc.
305 Arthur Street
Forth Worth, TX
USA 76107

L. Cadona
Tél. : (817) 332-5481

Chemfix Technologies Inc.
3858 North Causeway 2500
Metaire, CA
USA 70002

W. Bua
Tél. : (504) 831-3600

Wastech Inc.
114 Tulsa Road, O.O. Box 4638
Oak Ridge, TN
USA 37831

K. Peacok
Tél. : (615) 483-6515

Batelle Nothwest
P.O. Box 999
Richland, Wa
USA 99352

W. F. Bonnes
Tél. : (509) 376-3340

Atomic Energy of Canada Limited Research
Chalk River Laboratories
Chalk River, Ontario
Canada, K0J 1J0

D. H. Charlesworth
Tél. : (613) 584-3311

Beak Consultants Ltd
14 Abacus Road
Brampton, Ontario
Canada, L6T 5B7

D. Wilson
Tél. : (416) 794-2325

Dufferin Construction Company Inc.
505 North Service Road E.
Oakville, Ontario
Canada, L6H 1A5

D. Ostrader
Tél. : (416) 842-2741

Siallon Technologies Inc.
16755 Von Karman Ave
Irvine, CA
USA 92714-9998

T. Mc Dowell
Tél. : (714) 833-3232

Trident Engineering Associates Inc.
2010 Industrial Drive
Annapolis, MD
USA 21401

E. B. Marquard
Tél. : (410) 224-3550

Chemical Waste Management
3001 Butterfield Road
Oak Brook, IL
USA 60521

R. Fizpatrick
Tél. : (708) 218-1678

Geosafe Corporation
2000 Logston Avenue
Richland, WA
USA 99352

Tél. : (509) 375-3268

International Solidification Inc.
256 Bronte Rd.
Oakville, Ontario
Canada, L6L 3C6

D. Krofchak
Tél. : (416) 825-0003

Solidification/Stabilisation à base de Portland Cement

HAZCON Engineering Inc.
P.O. Box 1247
Brookshire, Texas
USA 77423

R Funderburk
Tél. : (800) 227-6534

Canadian Waste Management Corp.
#205-2003 McKnight Blvd. N.E.
Calgary, Alberta
Canada, T2E 6L2

W.Rama
Tél. : (403)291-5082

Soliditech Inc.
6901 Corporate Drive, Suite 215
Houston, Texas
USA 77036

C. Brassow
Tél. : (713) 778-1800

Solidification/Stabilisation à la chaux

Separation and Recovery Systems Inc.
Irvine, California
USA 92714

J. Franco
Tél. :

Solidification/Stabilisation avec des silicates

Silicate Technology Corporation
Scottsdale Technology Center
7655 East Gilging Road, Suite B2
Scottsdale, Arizona
USA 85260

G. Maupin
Tél. : (602) 948-7100

Chemfix Technologies Inc.
Suite 620, Metairie Center,
2424 Edenborn Avenue
Metairie, Louisiana
USA 70001

P. N. Baldwin
Tél. : (504) 831-3600

Siallon Technologies Inc.
P.O. Box 3324
1659 Industrial Road
Cambridge, Ontario
Canada, N3H 4T3

W. Moncrieff
Tél. : (519) 653-1442

Solidification/Stabilisation ; procédés divers

CECOS International Inc.
2321 Kenmore Avenue
Buffalo, NY
USA 14207

Tél. :

Wastech Inc.
P.O. Box 4368
114 Tulsa Road
Oak Ridge, TN
USA 37830

E.B. Peacock
Tél. : (615) 483-6515

International Waste Technologies
150 North Main Street
Suite 910
Wichita, Kansas
USA 67202

J. P. Newton
Tél. : (316) 269-2660

Stablex Canada Inc.
760 boul. Industriel
Blainville, Québec
Canada, J7C 3U4

S. Demeule
Tél. : (514) 871-1176

SILT N.V.
Tijdokstraat 28
B-8380 Zeebrugge
Belgium

H. De Vlieger
Tél. : 011-32-50-54-6144

Ecofix Canada Inc.
394 Isabey, Suite 110
Ville Saint-Laurent, Québec
Canada, H4T 1V3

A. Bensoussan
Tél. : (514) 737-6541

OHM Remediation Services of Canada Ltd
2192 Wycroft Road, P.O. Box 7010
Oakville, Ontario
Canada, L6J 6L5

D. Z. Maat
Tél. : (416) 847-1700

ANNEXE D
SOURCES D'INFORMATION ADDITIONNELLE

SOURCES D'INFORMATION ADDITIONNELLE**Centre Saint-Laurent***Général*

Michel Lamontagne
Directeur
Centre Saint-Laurent
105, rue McGill
Montréal, Québec
H2Y 2E7

Tél. : (514) 283-7000

Développement technologique

Yvan Valiquette
Directeur
Direction du développement technologique
Centre Saint-Laurent
105, rue McGill
Montréal, Québec
H2Y 2E7

Tél. : (514) 283-3557

Technologies de restauration des sédiments

René Rochon
Chef Technologies restauration
Centre Saint-Laurent
105, rue McGill
Montréal, Québec
H2Y 2E7

Tél. : (514) 283-0676

Technologies d'assainissement

Gérald Girouard
Chef Technologies assainissement
Centre Saint-Laurent
105, rue McGill
Montréal, Québec
H2Y 2E7

Tél. : (514) 283-6536

Bureau de l'environnement des Grands LacsGénéral

Griff Sherbin
Environnement Canada
25 avenue St.Clair Est
Toronto, Ontario
M4T 1M2

Tél. : (416) 973-6467

Enlèvement des sédiments contaminés

Ian Orchard
Conservation et Protection
Environnement Canada
25 avenue St.Clair Est
Toronto, Ontario
M4T 1M2

Tél. : (416) 973-1089

Traitement des sédiments contaminés

Craig Wardlaw
Wastewater Technology Centre
P.O. Box 5068
Burlington, Ontario
L7R 4L7

Tél. : (416) 336-4855

Bureau du Programme National des Grands Lacs

Paul Horvatin
U.S. Environmental Protection Agency
Great Lakes National Program office
77 West Jackson Boulevard
Chicago, Illinois 60604

Tél. : (312) 353-3612

U.S. Army Corps of Engineers (USACE)

Mark E. Zappi
Environmental Engineer
Environmental Engineering Division
U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station
3903 Halls Ferry Road
Vicksburg, MS 39180-6199

Tél. : (601) 643-2856

Programme "Superfund Innovative Technology Evaluation (SITE)"General

John Martin
The SITE Program
Risk Reduction Engineering Laboratory
U.S. Environmental Protection Agency
26 West Martin Luther King Drive
Cincinnati, Ohio 45268

Technology Profiles/Demonstration Project Results/Emerging Program Reports

ORD Publications Unit
U.S. Environmental Protection Agency
26 West Martin Luther King Drive
Cincinnati, Ohio 45268

Tél. : (703) 487-4650

Technologies de biodégradation

R. Lewis
Risk Reduction Engineering Laboratory
U.S. Environmental Protection Agency
26 West Martin Luther King Drive
Cincinnati, Ohio 45268

Tél. : (513) 569-7856

Technologies de lavage des sols

R. Traver
Releases Control Branch
U.S. Environmental Protection Agency
2890 Woodbridge Ave, Bldg. 10(MS-104)
Edison, NJ 08837

Tél. : (201) 321-6677

Technologies de désorption thermique, d'extraction aux solvants, d'extraction sous vide et de déchloration

M. Gruenfeld
Releases Control Branch
U.S. Environmental Protection Agency
2890 Woodbridge Ave, Bldg. 10(MS-104)
Edison, NJ 08837

Tél. : (908) 321-6625

Technologies d'incinération et pyrolyse

D.A. Oberacker
Risk Reduction Engineering Laboratory
U.S. Environmental Protection Agency
26 West Martin Luther King Drive
Cincinnati, Ohio 45268

Tél. : (513) 569-7510

Technologies de vitrification in situ

S. James
Risk Reduction Engineering Laboratory
U.S. Environmental Protection Agency
26 West Martin Luther King Drive
Cincinnati, Ohio 45268

Tél. : (513) 569-7877

Technologies de stabilisation/solidification

T. Lyons
Risk Reduction Engineering Laboratory
U.S. Environmental Protection Agency
26 West Martin Luther King Drive
Cincinnati, Ohio 45268

Tél. : (513) 569-7589

ANNEXE E
GLOSSAIRE

GLOSSAIRE

Absorption: pénétration intime d'une substance dans un corps solide ou liquide.

Acide: espèce chimique hydrogénée, dont la dissolution dans l'eau fournit des ions H^+ , et qui de ce fait possède un ensemble de propriétés caractérisant la fraction acide (pH inférieur à 7).

Acidification: modification de l'équilibre chimique naturel d'un milieu provoquée par l'augmentation de sa concentration en éléments acides.

Adsorption: adhésion ou concentration de substances dissoutes ou dispersées à la surface d'un corps.

Aérateur: dispositif ou appareil permettant l'aération de l'eau, des eaux usées et des boues d'égouts.

Aérobic: se dit des microorganismes qui ont besoin, pour leur développement, de l'air atmosphérique ou d'air dissous naturellement ou artificiellement dans l'eau.

Agitateur: appareil destiné à assurer le mélange et l'aération des liquides, soit par moyen mécanique, soit par insufflation d'air.

Anaérobic: se dit des microorganismes qui se développent en l'absence d'air ou d'oxygène libre, ou qui ne sont pas détruits par une telle absence.

Anion: ion de charge négative.

Argile: type de sol de forte cohésion, composé de particules inférieures à 0,002 mm.

Bactérie: organisme primitif unicellulaire généralement sans chlorophylle qui se produit par division. Les bactéries se présentent comme des cellules individuelles, des groupements, des chaînes ou des filaments de cellules.

Base: composé qui se dissocie en solution aqueuse de façon à libérer des ions hydroxydes.

Bioaccumulation: rétention sans cesse croissante d'une substance dans les tissus d'un organisme tout au long de son existence (le facteur de bioconcentration augmentant sans cesse).

Biochimique: se dit d'un changement chimique résultant d'une action biologique mesuré ou exprimé en fonction du changement qui s'ensuit.

Bioconcentration: rétention d'une substance dans les tissus d'un organisme au point que la teneur des tissus en cette substance dépasse la teneur du milieu ambiant en cette substance, à un moment donné de la vie de cet organisme.

Biodégradable: se dit d'une substance ou d'un produit susceptible d'être intégralement décomposé par des organismes vivants.

Bioessai: technique d'évaluation de l'effet biologique d'une substance contenue dans l'eau par l'observation des modifications d'une activité biologique.

Biosphère: partie de la troposphère où l'on rencontre des organismes vivants. Elle va de quelques mètres de profondeur dans le sol à quelques milliers de mètres dans l'atmosphère et dans les mers.

Bioturbation: transformation ou dégradation des sédiments sous l'action d'organismes se déplaçant ou creusant des cavités à l'intérieur de ceux-ci.

Boues activées: boues flocculantes ou flocculées produites par aération prolongée des eaux d'égouts. Par les microorganismes qu'elles contiennent, ces boues sont capables de transformer les matières organiques en produits stables.

Boues: terme général désignant les résidus de l'épuration ou du traitement des eaux, se présentant sous forme de boue ou de vase à forte teneur en eau, déposées sur le fond des bassins de décantation.

BPC: nom générique pour les biphényles polychlorés: composés organiques constitués de composés phénolés et d'atomes de chlore.

Cancérogène (ou carcinogène): désigne les substances provoquant l'apparition d'un cancer chez un organisme vivant.

Caractérisation: identification précise des éléments distinctifs d'une substance, d'un milieu ou d'un processus.

Carbone organique total (COT): mesure de la quantité de carbone dans un échantillon provenant de matières organiques seulement. Cet essai est effectué par la combustion de l'échantillonnage et le dosage du dioxyde de carbone produit.

Cation: ion de charge positive.

Centrifugeur ou centrifugeuse: dispositif mécanique utilisant la force centrifuge pour séparer les solides des liquides ou pour séparer des liquides de densités différentes.

Centrifugeuse à bol perforé: dispositif destiné à enlever l'eau composé d'une machine à bol et d'un panier centrifuge.

Centrifugeuse à bol plein: dispositif centrifuge dans lequel la surface n'est pas perforée.

Chaîne alimentaire: succession de populations végétales et animales qui se nourrissent les uns des autres selon un ordre déterminé. On distingue plusieurs niveaux: les producteurs, les consommateurs primaires, secondaires et tertiaires, ainsi que les décomposeurs.

Chaîne de traitement: procédé de traitement complet qui inclut le pré-traitement, le traitement primaire, le traitement des résidus et des autres rejets (atmosphériques, effluents liquides et solides) des procédés de traitement et incluant le post-traitement. Dans certains cas, ces chaînes de traitement incluent des technologies capables de traiter efficacement aussi bien les contaminants inorganiques que les contaminants organiques.

Charbon actif: charbon végétal auquel un traitement a donné une surface spécifique considérable. Utilisé pour l'adsorption des matières communiquant à l'eau un goût, une odeur ou une couleur, il est aussi employé pour absorber l'excès de chlore dans les eaux désinfectées. Le produit commercial est soit granulaire, soit pulvérulent.

Chaux: produit obtenu par la calcination du carbonate du calcium.

Chélation (chélateur): agent sous forme de liquides ou de résines solides qui se combine aux contaminants au contact des sols: ils peuvent être recyclés en contact avec des acides concentrés qui les libèrent de leur charge de contaminants.

Clarificateur: (voir décanteur)

Classificateur granulométrique: appareil servant à séparer les matières particulières selon leur diamètre dimensionnel, par exemple les hydrocyclones, les classificateurs sur lit fluidisé et les collecteurs de sable à air.

Classificateur selon la densité: appareil servant à séparer les particules selon leur densité.

CO (monoxyde de carbone): gaz inodore, incolore et insipide provenant de la combustion incomplète de composés carbonés (p. ex. gaz d'échappement des automobiles). Dans l'organisme, il se lie solidement à l'hémoglobine du sang rendant ainsi le transport de l'oxygène des poumons vers les tissus moins efficace. Le monoxyde de carbone est donc capable d'induire un manque d'oxygène (hypoxie). Une source très importante de monoxyde de carbone est l'exposition directe ou passive à la fumée de cigarette .

Coagulation: agglomération des particules fines (colloïdales) en suspension dans un liquide.

Combustion: réaction thermique par laquelle un élément se lie à l'oxygène, et les éléments constitutifs combustibles et volatils (comme les matières organiques et l'eau) s'évaporent.

Composé organique volatil (COV): tout composé de carbone à l'exception des oxydes de carbone, des carbures métalliques, des carbonates et des cyanures, susceptible d'être retrouvé dans l'atmosphère à pression et température ambiantes (p. ex. solvants organiques, hydrocarbures légers). La définition d'un composé organique volatil fait souvent référence à des méthodes d'échantillonnage et d'analyse particulières (p. ex. CUM, U.S. Environmental Protection Agency).

Composé organochloré: hydrocarbure organique dans lequel existent un ou plusieurs atomes de chlore: composés typiques (HCB, HCH, dieldrine, DDT, BPC).

Compostage: décomposition biologique des matières organiques solides pour les stabiliser et les utiliser à des fins agricoles.

Conditionnement: traitement d'un produit ou matériel jusqu'à ce qu'il acquiert les propriétés physiques, chimiques et/ou mécaniques voulues.

Confinement: des actions correctrices qui impliquent la construction de barrières physiques pour prévenir la migration des contaminants des matrices.

Contaminant: corps contenu dans l'eau, l'air ou tout autre milieu, qui ne fait pas partie de la composition normale du milieu et qui lui donne un caractère de nocivité.

Selon la *Loi de la qualité de l'environnement du Québec (LQE)*, l'état de l'environnement lorsqu'on y trouve un polluant.

Selon la LQE, résidu solide, liquide ou gazeux provenant d'activités industrielles, commerciales ou agricoles, débris, ordures ménagères, lubrifiant usagé, débris de démolition, rebut pathologique, cadavre d'animal, carcasse de véhicule automobile, pneus hors d'usage, déchet radioactif, contenant vide et rebut de toute nature à l'exclusion des résidus miniers.

Selon la LQE, un contaminant ou un mélange de plusieurs contaminants, présent dans l'environnement en concentration ou quantité supérieure au seuil permmissible déterminé par règlement du gouvernement ou dont la présence dans l'environnement est prohibée par règlement du gouvernement.

Selon la LQE, une matière solide, liquide ou gazeuse, un microorganisme, un son, une vibration, un rayonnement, une chaleur, une odeur, une radiation ou toute combinaison de l'un ou l'autre susceptible d'altérer de quelque manière la qualité de l'environnement.

Décantation: opération consistant à laisser déposer les matières en suspension dans un liquide, en vue de les éliminer ou de recueillir le liquide clarifié.

Décanteur (clarificateur): bassin dans lequel la vitesse de l'eau est réduite de façon à permettre la décantation des matières en suspension.

Décharge contrôlée: lieu destiné à l'enfouissement des déchets solides.

Déchets spéciaux: des déchets qui ne sont pas des déchets dangereux au sens du *Règlement sur les déchets dangereux*, qui résultent de procédés industriels des secteurs d'activités de la tannerie, du raffinage du pétrole, de la métallurgie, de la chimie minérale, de la chimie organique et du traitement et revêtement de surface et dont la concentration de contaminants en composés phénoliques, en cadmium, en chrome, en cuivre, en nickel, en zinc, en plomb, en mercure, en huile et graisse dans le lixiviat du déchet est supérieure aux normes prévues à l'article 30 du Règlement sur les déchets solides.

Déchets: résidus, matériaux, substances ou débris rejetés à la suite d'un processus de production, de fabrication ou d'utilisation.

Demande biochimique en oxygène (DBO₅): test servant à mesurer la quantité d'oxygène consommée par l'intermédiaire de microorganismes durant l'oxydation biologique des matières organiques présentes dans l'eau, dans des conditions physiques, chimiques et biologiques déterminées. La concentration en oxygène dissous d'un cours d'eau ou d'un lac est un des critères principaux du degré de pollution.

Demi-vie: temps nécessaire pour que les concentrations d'une substance diminuent de la moitié de la valeur originale dans un lac, une étendue d'eau, etc.

Déshydratation des boues: procédé consistant à enlever en partie l'eau des boues par drainage, évaporation, compression, centrifugation, aspiration par le vide, passage entre les rouleaux, flottation en présence d'acides, ou toute autre méthode, avec ou sans emploi de la chaleur. Ce procédé entraîne la formation des boues d'un état liquide en un état semi-solide permettant de les manipuler à la pelle.

Développement durable: ensemble des pratiques favorisant un développement des ressources de manière à satisfaire les besoins de la génération actuelle sans compromettre la capacité des générations futures de satisfaire les leurs.

Déversement: tout rejet à l'environnement de nature accidentelle ou volontaire, de courte durée, susceptible de causer une nuisance à l'environnement.

Digesteur: réservoir où l'on entrepose les matières solides provenant de la décantation des eaux d'égouts dans le but de les décomposer ou de les rendre impustrescibles et inoffensives.

Digestion: décomposition biologique des matières organiques des boues, qui entraîne la gazéification, la liquéfaction et la minéralisation partielles.

Dioxines: groupe d'environ 75 produits chimiques de la famille des chlorodibenzodioxines comprenant le tétrachloro-2,3,7,8-dibenzoparadioxine qui est généralement considéré comme le plus toxique.

Eau interstitielle: expression générique désignant l'eau contenue dans les pores d'un sol de surface ou d'un sédiment dans le fond d'un cours d'eau.

Eaux souterraines: terme générique désignant les eaux qui se trouvent au-dessous de la surface du sol. Elles représentent la plus grande partie des réserves d'eau douce.

Écologie: science ayant pour objet l'étude des rapports des organismes vivants entre eux et avec le milieu qu'ils habitent.

Écosystème: unité écologique, appartenant à la biosphère, composée d'éléments vivants, animaux et végétaux (biocénose) et d'éléments inertes (biotop). Les écosystèmes sont donc les systèmes dynamiques fonctionnels de la biosphère à l'intérieur desquels les espèces vivantes sont à la fois productrices et consommatrices dans le cadre des chaînes alimentaires.

Écotoxicité: capacité d'une substance à provoquer des effets toxiques non seulement sur les espèces vivantes mais aussi sur leurs organisations, leurs rapports avec la matière inanimée, et leurs rapports entre elles (déséquilibres biologiques). L'écotoxicité d'une substance est plus particulièrement liée à ses effets toxiques à long terme.

Effluent industriel: ensemble des eaux à évacuer de l'usine et des matières qu'elles sont susceptibles d'entraîner.

Électrolyte: substance qui se dissocie en deux ions ou plus quand elle est dissoute dans l'eau.

Élimination des déchets: terme désignant l'ensemble des opérations de stockage, tri, collecte, transport, et traitement des déchets aboutissant à des substances qui peuvent être soit restituées sans effet nocif au milieu naturel, soit réinsérées dans les circuits économiques à des fins de réemploi, réutilisation ou recyclage.

Élutriation: opération consistant à un lavage à l'eau des matières granuleuses ou boueuses, dispersées ou en suspension, suivi d'une décantation et de l'évacuation du surnageant. Cette opération peut être renouvelée plusieurs fois jusqu'à l'obtention du résultat désiré.

Environnement: ensemble des conditions naturelles (physiques, chimiques, biologiques) et culturelles (sociologiques) susceptibles d'agir sur les organismes vivants et les activités humaines.

Au sens de la LQE, l'environnement désigne l'eau, l'atmosphère et le sol ou toute combinaison de l'un ou l'autre ou, d'une manière générale, le milieu ambiant avec lequel les espèces vivantes entretiennent des relations dynamiques.

Enzymes: protéines dotées d'une fonction catalytique particulière.

Épidémiologie: science ayant pour objet l'étude des rapports existant entre les maladies et divers facteurs susceptibles d'exercer une influence sur leur fréquence, leur distribution et leur évolution.

Essais (études) de traitabilité: essais de technologies de traitement en laboratoire ou directement sur le terrain, nécessaires pour une évaluation détaillée de sa faisabilité technique, économique et environnementale.

Évaporation: passage de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux, à partir de la surface libre d'une eau ou du sol.

Extraction: action exercée sur un composé chimique pour en libérer les éléments constitutifs par l'usage d'un solvant (acide, base, etc.).

Filtre-presse: filtre à travers lequel la séparation des matières solides et du liquide se fait sous une certaine pression, au moyen d'un tissu ou d'un autre matériau filtrant.

Fixation: fixation de composés ou d'éléments.

Floculation: phénomène d'agglomération des colloïdes déchargés. Les flocons ainsi formés sont plus faciles à éliminer par décantation.

Flottation: extraction sous forme d'air des matières solides en suspensions dans l'eau ou l'eau usée en les amenant à la surface, généralement par insufflation d'air.

Furannes: famille de produits dont la composition et la toxicité s'apparentent à celles des dioxines.

Grizzlies: grilles à barreaux (crible rudimentaire destiné à calibrer grossièrement des calibres relativement élevés, p. ex., 150 mm).

Halogène: se dit du chlore et des éléments qui figurent dans la même colonne du tableau périodique: fluor, brome, iode et astate.

Halogénés: composés organiques comportant plusieurs atomes d'halogène.

Hydrocarbure (H_xC_y): composé organique constitué de carbone et d'hydrogène. Le pétrole est un mélange naturel d'hydrocarbures et d'autres composés organiques.

Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP): hydrocarbures dont les atomes de carbone sont disposés en deux ou plusieurs cycles.

Hydrocyclone: dispositif pour calibrer, par voie centrifuge, des particules fines en suspension dans l'eau.

Hydrophobe: fibre ou substance qui ne se laisse pas mouiller par l'eau.

Hydrophyle: substance qui a de l'affinité pour l'eau.

Hydrosphère: ensemble des océans et des lacs continentaux, c'est-à-dire du milieu liquide qui recouvre les 7/10 de la terre.

Immiscible: propriété qui fait que deux liquides ou plus se séparent en deux phases ou plus après un mélange intime.

Incinération: destruction par combustion des déchets organiques des ordures ménagères, des boues des stations d'épuration, des déchets industriels, etc.

Inflammable: qui s'enflamme facilement.

Inorganique: terme générique qui désigne certaines composantes chimiques. En général, elles sont non incinérables et ne contiennent le carbone que sous forme non combustible. Qui n'est pas constitué de matière vivante.

Ion: atome ou molécule qui a perdu ou gagné un ou plusieurs électrons, par ionisation. Il devient chargé électriquement.

Lagune: bassin destiné à recueillir en plein air les eaux usées ou les boues afin d'en faciliter le traitement.

Limon ou silt: type de sol aux propriétés cohésives, composé de grains d'un diamètre compris entre 0,002 mm et 0,006 mm.

Lixiviation: a) entraînement par solubilisation de certains contaminants dans une substance lorsque celle-ci est mise en contact avec un liquide agissant comme solvant (souvent l'eau). Dans une décharge, les déchets sont principalement lixiviés par les eaux de pluie.

b) phénomène d'entraînement des éléments solubles d'un déchet par un solvant. Sur un site d'enfouissement, les déchets sont principalement lixiviés par les eaux de pluie.

Matière (substance) dangereuse: matière ou substance qui, en raison de ses propriétés (p. ex. corrosivité, inflammabilité, toxicité, radioactivité, etc.), constitue un danger pour la santé, la sécurité ou l'intégrité physique d'un travailleur ou l'environnement et dont les risques associés peuvent être éliminés ou réduits grâce à des techniques spéciales de manutention et d'élimination.

Matières en suspension: matières pouvant être soit déposées, soit retenues par filtrage.

Matières inorganiques: substances chimiques d'origine minérale.

Matières organiques: substances chimiques d'origine animale ou végétale, ou plus correctement, à structure de base carbonée. Cette catégorie inclut la plupart des composés du carbone; la plupart des matières organiques sont combustibles et un grand nombre est volatile.

Matières solides en solution: matières dissoutes dans l'eau naturelle ou les eaux usées.

Matières solides: ensemble des matières dissoutes ou non, volatiles ou non, présentes dans les eaux d'égouts ou les eaux des circuits d'alimentation.

Métaux lourds: terme qui désigne des métaux à poids atomique relativement lourd tels que le chrome, le nickel, le cadmium, le plomb, l'argent, l'or, le mercure, le bismuth, le cuivre, etc., et qui peuvent être précipités par l'acide sulfhydrique. À l'état soluble, ils sont souvent toxiques. Les métaux lourds peuvent s'accumuler le long de la chaîne alimentaire.

Microorganisme: organisme très petit, végétal ou animal, invisible ou à peine visible à l'oeil nu.

Minéralisation: décomposition de la matière organique en composés minéraux.

Mobilité: capacité des substances, sous l'influence de processus physiques ou chimiques, à se dégager de leur support ou milieu original.

Mutagène: toute substance ou tout effet qui modifie les caractéristiques génétiques ou qui produit du matériel génétique.

Nappe phréatique: nappe d'eau souterraine.

Neutralisation: réaction chimique entre les ions H^+ et les OH^- , accompagnée de la formation de molécules d'eau.

NO_x (oxydes d'azote): les oxydes d'azote sont une famille de contaminants que l'on retrouve fréquemment dans l'air présentant une pollution photochimique (p. ex. smog de Los Angeles). Le dioxyde d'azote (NO₂) est un irritant pulmonaire.

Nuisance: désigne à la fois une cause (agent polluant, bruit, odeur) et un effet (pollution, gêne).

Organique: terme qui désigne des composantes chimiques à base de carbone; en général combustibles. Relatif aux êtres vivants.

Organo-halogéné: substance chimique organique comprenant un nombre indéterminé d'atomes d'un halogène quelconque. Désigne aussi bien les organochlorés que les organofluorés et ainsi de suite.

Organochloré: se dit d'une substance chimique organique de synthèse, dérivée de molécules de chlore et utilisée à diverses fins: insecticides, pesticides (p. ex.DDT), fongicides, réfrigérants,etc. Les organochlorés sont généralement toxiques et persistants.

Oxydation biochimique: oxydation résultant de l'activité biologique qui entraîne la combinaison chimique de l'oxygène avec la matière organique.

Oxydation: processus chimique pouvant consister dans la fixation d'oxygène (combustion), la perte d'hydrogène (H_2S en S) ou le relèvement de la valence (transformation d'un corps ferreux en corps ferrique).

Ozone: gaz résultant de la condensation de l'oxygène en une molécule de formule O_3 . L'ozone est un puissant oxydant ayant des propriétés bactéricides et virulicides.

Pesticides: terme générique désignant les composés synthétisés industriellement pour servir de produits de lutte antiparasitaire, notamment les pesticides et surtout les composés organochlorés: herbicides, fongécides et insecticides).

pH: mesure du degré d'acidité ou d'alcalinité d'une solution, d'un sol. Il s'agit du logarithme décimal inverse de la concentration en ions H^+ .

Photosynthèse: ensemble des phénomènes physiologiques qui permettent aux plantes contenant de la chlorophylle de produire des molécules organiques à partir du gaz carbonique et d'eau, en présence d'énergie lumineuse.

Polaire: molécule assimilable à un pôle électrique.

Polluant: se dit d'une substance, d'un corps qui contamine un milieu. Agent physique, chimique ou biologique qui modifie de façon nuisible l'équilibre naturel.

Pollution: contamination d'un milieu naturel par l'introduction, directe ou indirecte, par l'homme, de produits toxiques. Action de polluer, c'est-à-dire d'introduire une substance non désirable dans un milieu. Dégradation d'un milieu suite à l'introduction d'un polluant.

Polymères: composés chimiques complexes dont les éléments constituants sont eux-mêmes des molécules toutes identiques. Les polymères sont à la base constituante des matières plastiques.

Potentiel redox (Eh): potentiel d'oxydo-réduction d'un sol ou de sédiments dans des conditions oxydantes (Eh positif) ou désoxydantes (Eh négatif).

Pouzzolane: roche d'origine volcanique alvéolaire et scoriacée, de couleur rougeâtre ou noirâtre, utilisée comme granulat pour la confection de bétons légers ou comme constituant secondaire des ciments.

ppb: "partie par milliard", quantité de particules par milliard, exprimée en pourcentage de la masse.

ppm: "partie par million", quantité de particules par million exprimée en pourcentage de la masse.

Précipitation: action chimique par laquelle un corps en solution s'isole de son solvant et se dépose au fond.

Pré-traitement: première étape de l'épuration des eaux d'égout, des sédiments, etc, comportant le dégrillage, le broyage ou dans certains cas le dessablage, et destiné à préparer ces eaux et sédiments pour un traitement plus élaboré.

Processus biologique: processus selon lequel les activités vitales des bactéries et d'autres microorganismes à la recherche de nourriture dégradent des composés organiques complexes en substances simples plus stables.

Programme d'assurance qualité: duplication de toutes ou une partie des analyses en laboratoire pour assurer que les niveaux de précision et de reproductibilité désirés soient obtenus.

Programme de contrôle de qualité: duplication d'une partie des analyses chimiques (généralement dans un laboratoire extérieur et indépendant) pour estimer la qualité globale des résultats obtenus et déterminer, si nécessaire, quels changements peuvent être apportés pour atteindre ou maintenir les niveaux de qualité désirés.

Pyrolyse: chauffage non oxydant accompagné du craquage des produits traités et obtention de fractions moins lourdes, liquides ou gazeuses, susceptibles d'être utilisées comme combustibles ou comme matières premières. La pyrolyse peut être utilisée dans la destruction de déchets pour récupérer sous forme de gaz l'énergie calorifique de ces déchets.

Réactif: un composé est réactif s'il peut réagir spontanément et violemment avec l'eau ou l'air ambiant.

Récupération: séparation de certains produits ou matériaux des déchets à des fins de réemploi, de réutilisation ou de recyclage.

Recyclage: réintroduction d'un matériau récupéré dans le cycle de production dont il est issu. On parlera de recyclage du papier, de l'acier (par l'intermédiaire des ferrailles), du verre (par l'intermédiaire des débris de verre appelés calcin).

Réduction: l'application de techniques plus efficaces qui gaspillent moins de matières premières et l'amélioration de mesures internes pour éliminer les déversements (ex. remplacement du verre de styromousse ou de papier par la tasse à café en porcelaine).

Réemploi: nouvel emploi, en l'état, d'un produit ou d'un matériau récupéré pour un usage analogue à son premier emploi (ex. emballage consigné).

Régénération: traitement visant à rendre à un produit souillé ou usé, son état et ses qualités premières, le rendant propre à la même utilisation (p. ex. régénération des huiles et des solvants).

Remise en suspension: nouveau mélange de particules de sédiments et de polluants avec de l'eau par les tempêtes, les courants, les organismes et des activités humaines comme le dragage.

Résidu: matière qui reste après une opération chimique ou physique, une transformation. Sous-produit d'un procédé industriel qui ne sert pas à des fins commerciales, mais qui peut servir à d'autres fins (énergie, matériau de remplissage, matière première pour une autre industrie, etc).

Responsabilité pénale: la responsabilité pénale a un but punitif, en vue de réprimer un comportement contraire aux intérêts de la société dans des situations définies expressément par la loi. La preuve de l'infraction se fait selon la règle hors de tout doute raisonnable.

Ressources naturelles non-renouvelables: ensemble des ressources naturelles dont les quantités sont limitées et susceptibles d'être épuisées au rythme actuel de la consommation.

Ressources naturelles renouvelables: ensemble des ressources naturelles considérées comme inépuisables en raison de leur renouvellement constant (p. ex. énergie solaire).

Ressources naturelles: terme générique désignant l'ensemble des produits naturels, des écosystèmes, des éléments abiotiques et des équilibres qui composent la Terre, ainsi que des diverses formes d'énergie naturelle.

Réutilisation: introduction d'un matériau récupéré dans un autre cycle de production que celui dont il est issu (p. ex. incorporation de déchets de verre dans les revêtements routiers, confection de dalles d'isolation à partir de papier et de caoutchouc récupérés).

Sable: type de sol non cohésif, composé de grains d'un diamètre compris entre 0,06 mm et 2 mm.

Sédiments: couche de matériaux provenant de n'importe quelle source, roche, matière organique ou volcanique, et transportés par l'eau depuis le lieu d'origine jusqu'au lieu de dépôt. Dans les cours d'eau, les sédiments sont des matériaux alluvionnaires transportés en suspension ou par charriage.

Sels: se dit d'un composés d'un ion positif, autre que H^+ , avec un ion négatif autre que OH^- . Les sels peuvent être formés de diverses manières, notamment par l'action d'un acide sur un métal, une base, un oxyde ou sur un autre sel.

Site orphelin: se dit d'un site contaminé dont le propriétaire est non identifiable ou non solvable.

Solidification: procédé pour convertir les sols, les boues, les sédiments, ou les déchets liquides dans un produit solide monolithique qui peut être plus facilement manipulé et qui réduit également la volatilisation et la lixiviation des contaminants des déchets ou matrices traités.

Sorption: adsorption ou absorption physique ou chimique.

Stabilisation: procédé pour réduire physiquement ou chimiquement le potentiel dangereux d'un déchet en convertissant les contaminants toxiques en une forme moins mobile ou réactive.

Strippage à la vapeur: élimination de polluants en injectant de la vapeur dans le matériel à épurer, après quoi la vapeur chargée de ces polluants est séparée et condensée.

Stripping: entraînement de fractions légères et volatiles d'un liquide.

Substance toxique: substance pouvant causer la mort, la maladie, des anomalies du comportement, le cancer, des mutations génétiques, des anomalies de la physiologie ou de la reproduction, des déformations physiques, chez tout organisme ou chez sa progéniture ou qui peut devenir toxique après concentration dans le réseau trophique ou lorsque combinée à d'autres substances.

Sulfates: terme générique pour les sels dont l'anion est du sulfate. Les sulfates sont des produits naturels ou sont formés par l'action de l'acide sulfurique.

Surfactant: produit agissant comme des savons pour diminuer la tension superficielle de l'eau: ce sont des agents actifs en surface qui se concentrent à l'interface des régions : air-eau, huile-eau et solide-liquide.

Synergie: effet de la combinaison de plusieurs agents, de telle sorte que le résultat est supérieur à la superposition des propriétés de chacun des agents.

Tamis: appareil destiné à retenir sur une toile (habituellement métallique) des matières solides de petites dimensions.

Technologie propre: technologie pouvant soit être un nouveau procédé de production moins polluant, soit une récupération de matière première perdue et recyclée en tête de fabrication, soit une valorisation de déchets qui deviennent la matière première d'une production secondaire.

Technologies d'assainissement: technologies visant l'épuration des rejets d'un procédé, soit au niveau des émissions atmosphériques, soit au niveau des eaux usées ou au niveau des déchets. Comparativement aux technologies propres, ce sont des technologies qui sont insérées à la toute fin du procédé.

Tératogène: agent qui augmente l'incidence de malformations congénitales.

Toxicité: capacité d'une substance à provoquer des altérations ou des perturbations des fonctions d'un organisme vivant, conduisant à des effets nocifs dont le plus grave est la mort de cet organisme. La toxicité d'une substance est fonction de la concentration et de la durée d'exposition. On distingue deux types de toxicité: la toxicité aiguë (court terme) et la toxicité chronique (long terme).

Traitement biologique: procédé de traitement qui utilise les microorganismes pour briser les contaminants toxiques des déchets en composés moins toxiques.

Traitement chimique: procédé de traitement qui modifie la structure chimique des contaminants toxiques des déchets pour réduire la toxicité, la mobilité ou le volume des déchets.

Traitement des déchets: ensemble d'opérations effectuées sur les déchets, en vue de réduire leur nocivité éventuelle pour l'environnement, de faciliter leur manipulation ou leur transport ou de les valoriser.

Traitement in situ: procédé qui traite les matrices contaminées (sols, boues, eaux souterraines, sédiments) en place sans excavation des matrices. Les procédés in situ peuvent être physiques, biologiques, thermiques ou chimiques.

Traitement physique: procédé de traitement qui modifie la structure physique des contaminants des déchets pour en réduire la toxicité, la mobilité ou le volume.

Traitement thermique: procédé de traitement qui est conçu pour oxyder les substances organiques dangereuses en dioxyde de carbone et en eau.

Trommel: cylindre rotatif incliné et constitué par un tamis muni de lames internes; un appareil similaire à une bétonnière dont la paroi est un grillage conçu pour accomplir une séparation physique des particules de diamètre de l'ordre de 5 à 6 mm.

Turbidité: caractère d'une eau qui n'est pas transparente.

Valorisation des déchets: qualifie tout traitement des déchets qui permet de leur trouver une utilisation ayant une valeur économique positive, soit sur le plan énergétique soit sur le plan de la récupération de matières premières.

Zéolites: nom donné à un groupe d'alumino-silicates naturels hydratés de métaux alcalins ou alcalino-ferreux. Dans l'industrie, les zéolites sont utilisées comme adsorbants sélectifs (séchage des fluides, dépollution des gaz industriels), comme tamis moléculaire (séparation d'hydrocarbures) et comme catalyseur (craquage du pétrole).

Zone non saturée: zone sous la surface où l'eau est présente à des pressions inférieures à la pression atmosphérique et les gaz, aux pressions atmosphériques. Cette zone est aussi connue comme la zone vadose.

Zone saturée: zone sous la surface des sols où l'eau remplit les interstices sous des pressions plus grandes ou égales à la pression atmosphérique.

Zone vadose: zone sous la surface des sols où l'eau est présente à des pressions inférieures à la pression atmosphérique et les gaz, aux pressions atmosphériques. Cette zone est aussi appelée zone non saturée.