

SC400501 P47d
CSL-0400 1ex

La décontamination des sols:
état actuel et besoins en
développement technologique

CENTRE DE DOCUMENTATION CSL
105, MCGILL, 2ième étage
MONTREAL (Québec) H2Y 2E7
Tél.: (514) 283-2762
Fax: (514) 283-9451

Rapport final
soumis au Centre Saint-Laurent

par
Arlette Petitpas, Ph.D

Mai 1990

TABLE DES MATIERES

	Page
1.0 PROBLEMATIQUE	1.1
1.1 INTRODUCTION	1.1
1.2 Le support législatif	1.3
1.2.1 Au Québec	1.3
1.2.2 Au Canada	1.5
1.3 Les sols contaminés	1.7
1.4 Les sites d'enfouissement	1.9
1.5 Les contaminants	1.11
1.6 La réhabilitation des sites et terrains contaminés	1.12
1.7 Situation actuelle au Québec	1.13
 2.0 LES TECHNOLOGIES DE DESTRUCTION ET DE TRAITEMENT DES SOLS CONTAMINÉS	 2.1
2.1 Les procédés thermiques	2.3
2.1.1 L'incinération	2.5
2.1.1.1 Les fours rotatifs	2.6
2.1.1.2 Incinération par des radiations infrarouges	2.13
2.1.1.3 Incinération sur lit fluidisé	2.15
2.1.1.4 La pyrolyse	2.17
2.1.2 La vitrification	2.18
2.1.2.1 La vitrification sur le site	2.19
2.1.2.2 La vitrification in-situ (28)	2.19
2.2 Les procédés physico-chimiques	2.21
2.2.1 L'extraction chimique	2.23
2.2.1.1 Le procédé BEST (Best Extraction Sludge Treatment)	2.23

2.2.1.2	Procédé développé par la CF Systems Co.	2.24
2.2.1.3	Procédé de la compagnie LEEP (Low Energy Extraction Process)	2.25
2.2.1.4	Procédé EXTRAXSOL de la compagnie Envirocorp Inc.	2.26
2.2.1.5	Procédé Thermonic développé par la Société Thermonic Décontamination	2.27
2.2.2	Le lavage des sols sur le site	2.27
2.2.3	Le lavage des sols in-situ	2.29
2.2.4	Déchloration des sols et des boues selon le procédé APEG-PLUSTM	2.30
2.2.5	Volatilisation à basse température: procédé X-TRAXTM	2.33
2.2.6	Stabilisation/solidification	2.34
2.2.6.1	Stabilisation/solidification in-situ	2.35
2.2.6.2	Stabilisation/solidification sur le site	2.36
2.3	Les procédés biologiques	2.39
2.3.1	Les bioréacteurs	2.42
2.3.1.1	Aux Etats-Unis	2.43
2.3.1.2	Aux Québec	2.43
2.3.2	Epandage des sols	2.44
2.3.3	Biodégradation in-situ	2.44

Page

3.0	LES BESOINS POUR LE FUTUR	3.1
3.1	Les besoins au plan légal	3.1
3.2	Les besoins au niveau technologique	3.2
3.2.1	Caractérisation et niveaux de décontami- nation des sites	3.2
3.2.2	Les technologies	3.4
3.2.2.1	Les technologies thermiques	3.5
3.2.2.2	Les technologies physico-chimiques	3.7
3.2.2.3	Les procédés biologiques	3.9
4.0	CONCLUSIONS	4.1
5.0	BIBLIOGRAPHIE	5.1

1.0 PROBLEMATIQUE

1.0 PROBLEMATIQUE

1.1 Introduction

Depuis toujours l'évolution des sociétés a été associée au développement technologique. Au fur et à mesure des découvertes et de leur application dans la vie courante l'homme a relié son bien être à la technique. Il n'y a pas si longtemps encore, la présence de cheminées crachant des fumées noires était le signe de l'essor de la région et de la prospérité de la population.

A cette époque les effluents gazeux des industries étaient relâchés dans l'atmosphère sans aucun traitement, de même les effluents liquides se retrouvaient dans les cours d'eau sans aucune transformation. On pensait que l'effet de dilution était suffisant et qu'il n'y avait aucun danger pour la population. Il n'y avait pas encore de législation sur la qualité de l'environnement, on commençait seulement à se soucier de la qualité du milieu de travail car de nouvelles maladies faisaient leur apparition: les maladies professionnelles.

Les matières premières en vrac étaient entreposées sur les cours des usines, les déchets étaient entreposés sur le sol en attendant d'en avoir en quantité suffisante pour justifier leur envoi sur des sites d'enfouissement extérieur ou, si la compagnie disposait de terrains suffisamment grands, ils étaient simplement déposés ou enfouis dans une partie du terrain consacré à cet effet.

Ce type de gestion des déchets a existé pendant de nombreuses années. Les répercussions de ce comportement des entreprises

qui, vu le manque de connaissances et de réglementation à l'époque était considéré comme normal et légal, se font sentir à l'heure actuelle sur toutes les sociétés industrielles. Celles-ci ont à faire face aux problèmes environnementaux parfois très graves causés par les générations antérieures.

L'évolution technologique est telle, ces dernières années, que de nombreuses entreprises aux technologies périmées ont dû fermer leurs portes en raison de leur manque de productivité. Ces usines qui, auparavant étaient situées au coeur des villes ont commencé à être démantelées. Ce phénomène va s'accroître. Les usines vétustes ne sont plus compétitives, elles vont progressivement disparaître. Cependant, les nouvelles entreprises vont préférer s'installer en dehors des grands centres pour éviter les coûts exorbitants de l'immobilier. Les terrains et bâtiments des anciennes industries sont ainsi appelés à être utilisés à d'autres fins et, vu les coûts croissants des terrains des grands centres urbains c'est le développement résidentiel qui va prendre la relève.

Au cours des années les activités industrielles ont produit, utilisé et généré de grandes quantités de substances dangereuses. Celles-ci se retrouvent, à l'heure actuelle, en partie dans notre environnement. La mauvaise gestion de ces produits en l'occurrence, l'enfouissement non contrôlé sur le site ou à l'extérieur, ou les déversements accidentels sont responsables, tel qu'on s'en aperçoit aujourd'hui, de la contamination du sol, des eaux souterraines et de la nappe phréatique.

Dans ces conditions, il est aisé de comprendre pourquoi on ne peut permettre à des promoteurs immobiliers de convertir un site

industriel en zone résidentielle ou commerciale sans s'assurer au préalable que la contamination éventuelle du site ne pose aucun risque pour la population.

1.2 Le support législatif

1.2.1 Au Québec

Le Québec s'est doté de différentes lois, règlements et politiques pour solutionner le problème de la gestion de ses déchets et pour assurer le développement économique de la province tout en respectant l'environnement.

La loi sur la qualité de l'environnement (36) et son règlement d'application le règlement sur les déchets dangereux (37) fournissent le cadre légal en ce qui concerne l'entreposage, le devenir et les besoins reliés à l'élimination des déchets dangereux tels que définis dans le dit règlement.

Le règlement sur les déchets solides (38) fournit le cadre législatif pour l'enfouissement sanitaire et l'enfouissement des déchets solides non dangereux. Au troisième trimestre de l'année 1989, le gouvernement du Québec a déposé une politique de gestion intégrée des déchets solides (39) qui vise essentiellement à éliminer le gaspillage des ressources et à favoriser la réduction des déchets à la source, le réemploi, le recyclage, le traitement et la valorisation des déchets et finalement l'élimination de ce qui n'est plus récupérable. Il s'agit d'une politique et non d'un règlement. Les entreprises ne sont donc pas obligées, à l'heure actuelle, de se conformer à ce type d'approche de gestion des déchets proposée dans la politique mais

celle-ci aboutira certainement et probablement dans un avenir proche sur un règlement. Le monde industriel a donc tout avantage à s'y préparer.

En ce qui a trait aux problèmes associés aux terrains et sites d'enfouissement contaminés le gouvernement du Québec s'est également doté d'une politique et non d'un règlement. Il s'agit de la politique de réhabilitation des terrains contaminés (42). Cette politique est assortie de guides (42): le guide standard de caractérisation des terrains contaminés, le guide d'implantation et de gestion de lieux d'enfouissement de sols contaminés et le guide technique des mesures de contrôle à effectuer lors de travaux d'excavation de sols.

La politique de réhabilitation des terrains contaminés vise la collaboration et non l'action coercitive. Elle fournit aux intervenants: industriels, consultants, groupes de pression, municipalités, citoyens ... des informations leur permettant de déterminer si les terrains en jeu sont contaminés et s'il existe un danger associé à leur utilisation. En cas de contamination sérieuse, les mesures de restauration devront se faire selon les lignes directrices définies par le ministère de l'Environnement.

La politique fournit une liste d'activités susceptibles de contaminer le sol et une grille de critères indicatifs de la contamination des sols et des eaux souterraines. Ces critères sont des valeurs seuils pour trois catégories de plage d'intervention.

- La valeur "A" est le bruit de fond qui tient compte de la "contamination" naturelle du sol.

- La valeur "B" est le seuil à partir duquel des analyses plus approfondies sont requises ce qui ne signifie pas pour autant que des mesures correctrices soient nécessaires sauf s'il y a danger de contamination de la nappe phréatique.
- A partir du seuil "C" il faut corriger la situation. Le délai peut être relativement court en cas de situation d'urgence.

Il est très important de signaler que ces critères ne sont pas des normes et par conséquent ne sont pas les niveaux à viser et atteindre lors des travaux de restauration d'un site.

Le transport des déchets dangereux doit se faire en respectant la réglementation du ministère des Transports du Québec s'il s'agit de transport sur des routes provinciales. La réglementation fédérale émise par Transports Canada intervient si les transporteurs empruntent des voies de circulation à juridiction fédérale. Quelle que soit la juridiction responsable les transporteurs doivent remplir un manifeste du ministère de l'Environnement concerné dans le cas du transport de déchets dangereux. De plus, ces transporteurs doivent détenir une accréditation, être reconnus pour le transport de ce type de marchandises.

1.2.2 Au Canada

Le Canada dispose également d'une législation relative à la qualité de l'environnement: la Loi canadienne sur la protection de l'environnement et ses règlements (20, 21).

(Il n'existe pas de réglementation pour les sols contaminés.) Une politique de gestion des sols contaminés est en cours de rédaction par Environnement Canada et devait être déposée en avril 1990.

L'approche adoptée par cette politique privilégiera l'utilisation de critères pré-établis (41). Certains grands principes sous-tendent cette politique:

- 1- Le principe du pollueur-payeur partout au pays,
- 2- L'évaluation, le classement et le nettoyage des sites orphelins se feront sur la base de critères communs dans tout le pays,
- 3- La contribution fédérale au programme de décontamination dans les différentes provinces et territoires sera déterminée selon une formule de calcul fondée sur le nombre d'habitants.

En ce qui a trait aux sites et terrains contaminés fédéraux au Québec, le ministère fédéral de l'Environnement conseille les divers ministères fédéraux aux prises avec le problème. La gestion des sols et terrains contaminés se fait en conformité avec la politique du ministère de l'Environnement du Québec en utilisant les critères pré-établis ABC.

Tel que mentionné plus haut Transports Canada réglemente le transport de toutes les catégories de marchandises sur les

routes, voies d'eau, aériennes et ferroviaires qui sont de juridiction fédérale. Depuis peu le transport des marchandises dangereuses y compris les déchets dangereux requiert l'utilisation d'un manifeste du ministère de l'Environnement visant à s'assurer que ces derniers effectuent bien le trajet indiqué.

1.3 Les sols contaminés

Un sol contaminé peut être défini comme un sol où l'on retrouve des composés chimiques à des concentrations excédant le critère "A" dans le guide standard de caractérisation des terrains contaminés.

Ces polluants présents en concentration supérieure à la concentration naturelle sont intégrés au sol.

La contamination peut résulter de multiples activités. Les terrains étaient soit des zones d'entreposage, des quais de débarquement ou de chargement soit tout simplement des lieux d'élimination attenants aux industries. Dans d'autres cas il s'agit d'endroits contaminés lors de déversements accidentels ou lors d'écoulements provenant de fuites de réservoirs souterrains devenus trop vieux. Les terrains sus-mentionnés ont été progressivement contaminés suite aux opérations quotidiennes des industries. Le processus de la contamination des sols s'est, parfois, déroulé sur de nombreuses années.

[La caractérisation des sols contaminés est de ce fait relativement complexe car il faut connaître l'historique d'un site pour en déterminer les occupations successives et cerner les opérations qui s'y sont déroulées ce qui finalement permet d'établir

un portrait relatif du type de contamination qui a pu s'y produire durant toutes les années d'activité de l'industrie.

[La caractérisation d'un site n'est pas chose aisée car les données sur le degré de pollution sera toujours fonction du lieu d'échantillonnage, de la profondeur à laquelle ont été effectués les prélèvements, à la nature du sol... Il est difficile de déterminer avec certitude la distribution spatiale (horizontale et verticale) des polluants, les superficies sont parfois très vastes et cela implique d'importants volumes de matériaux contaminés sous forme solide. Il faut aussi tenir compte de la migration éventuelle des contaminants dans le sol jusque dans les eaux souterraines. Dans certains cas la nappe phréatique elle-même est polluée. La contamination peut s'être, au cours des ans, répandue sur de grandes distances. La caractérisation du site doit donc aussi inclure les conditions hydrogéologiques du sol et l'analyse de la qualité des eaux souterraines.

La caractérisation d'un site est l'élément clé sur lequel repose la décision de procéder à une éventuelle restauration ultérieure. C'est une opération généralement très coûteuse. La qualité de la caractérisation dépend de la qualité de la méthode d'échantillonnage utilisée, des méthodes d'analyse choisies pour l'évaluation des différents échantillons, de la qualité des laboratoires qui vont réaliser ces analyses et, finalement de l'interprétation des résultats obtenus. C'est au niveau de l'interprétation des résultats d'analyse que l'utilisation des critères ABC semble poser le plus de problèmes. Il a été noté que le MENVIQ lui-même pouvait interpréter de façon différente sa propre politique (41).

L'utilisation des critères ABC présente cependant un avantage indéniable car elle permet de réagir rapidement en cas de situation d'urgence.]

[Aux Etats-Unis, l'EPA privilégie l'analyse de risques lors des évaluations de contamination de sites. Cette analyse qui tient compte du milieu physique (air, eau, sol), des contaminants et des bio-récepteurs (en particulier l'homme) permet de mieux préciser les niveaux de contamination dangereux pour la santé humaine. Cette approche est beaucoup plus complexe que l'utilisation des critères ABC et est aussi plus onéreuse. Par contre, elle permet d'obtenir une meilleure évaluation des dangers pour la population.]

[Le traitement des sols contaminés en vue de la restauration du site est l'étape suivante. Le choix du type de traitement dépend de la nature des polluants et de leur concentration mais ce choix n'est pas toujours simple. La contamination du sol, dans bien des cas, n'est pas uniquement soit organique soit inorganique mais plutôt un mélange des deux. Dans ces conditions, il sera parfois nécessaire de recourir à plusieurs technologies de traitement afin de réaliser efficacement la décontamination.]

1.4 Les sites d'enfouissement

Contrairement aux sols contaminés, cette fois la contamination par des éléments polluants est relativement circonscrite. Cependant, la nature des différents polluants amenés sur le site n'est pas toujours connue avec précision. On fait face au même problème de caractérisation du site mais celle-ci peut impliquer un beaucoup plus grand nombre de produits. [Les problèmes reliés

À la contamination, éventuelle des eaux souterraines est également présent dans le cas des sites d'enfouissement. La surveillance des drains installés pour recueillir les eaux de lixiviation et la qualité de ces dernières sont l'assurance du confinement des polluants dans la cellule (naturelle si dans l'argile, artificielle si l'on utilise une membrane).]

Actuellement les sites d'enfouissement pour des sols contaminés par déchets dangereux requièrent des conditions très particulières de confinement des déchets par exemple dans des cellules étanches. Cependant, celles-ci n'ont une durée de vie que de 25 ans. Cela signifie que le problème de l'enfouissement des déchets dans ces conditions n'est pas résolu de façon finale mais bien temporaire. Le problème est simplement reporté en attendant que des solutions plus intéressantes et efficaces soient disponibles.

Ce sont les sites d'enfouissement dits "orphelins" qui sont les plus problématiques car, non seulement soit on n'en connaît pas le propriétaire soit celui-ci est connu mais il n'est pas solvable. Cela signifie que l'on ne dispose pas d'informations adéquates sur les activités qui s'y sont déroulées, de plus on ne peut avoir aucun recours contre les responsables. Toute action prise pour la restauration du site sera à la charge de la société dans son ensemble.

Les anciennes carrières qui ont servi et servent encore de sites d'enfouissement notamment pour l'enfouissement de déchets sanitaires acceptent aussi des composés chimiques dits non dangereux. Cependant, auparavant les exigences environnementales étant moins restrictives que maintenant de nombreux

produits chimiques actuellement considérés comme dangereux ont été enfouis avec les autres types de déchets. De même, le manque de surveillance peut aussi permettre à des transporteurs peu scrupuleux de déverser des déchets dangereux dans ce type de site réservé à d'autres fins car ils n'ont pas été conçus et aménagés pour accepter ce type particulier de déchets.

Les sites d'enfouissement du Québec ont été répertoriés et caractérisés de façon préliminaire. Ceci permet de les classer par ordre de priorité d'intervention compte tenu de l'urgence et de l'ampleur des problèmes et dangers qu'ils représentent pour l'environnement.

Parmi les sites orphelins de catégories 1 répertoriés au Québec on retrouve les catégories suivantes:

- site d'enfouissement sanitaire;
- ancien dépotoir;
- ancien terrain d'usine;
- site d'enfouissement de déchets solides;
- parcs à résidus miniers.

La contamination des différents sites y est très variée, on y retrouve aussi bien des polluants organiques qu'inorganiques.

1.5 Les contaminants

Sur un même site on rencontre une grande variété de produits mais il en est que l'on retrouve plus fréquemment.

[Dans la catégorie des produits organiques les plus fréquents sont les huiles et graisses, des solvants, des résidus de peinture, des boues de pâtes et papier et de raffineries. Dans la catégorie des produits chimiques inorganiques ce sont le plus souvent des métaux lourds, des résidus acides ou basiques et des cyanures.]

La présence simultanée de produits des 2 catégories rend les opérations de restauration assez complexes car cela implique la nécessité éventuelle de faire appel à plusieurs types de technologies.]

1.6 La réhabilitation des sites et terrains contaminés

[Tel que mentionné plus haut cette intervention repose sur la caractérisation du site. Il ne s'agit pas d'une caractérisation préliminaire en vue de mettre en évidence le type de polluants et le niveau approximatif de leur concentration mais une caractérisation exhaustive qui donne un portrait le plus exact possible de la nature, de la quantité et de la répartition spatiale (horizontale et verticale) des polluants. La caractérisation du site à ce niveau permet d'évaluer l'ampleur des travaux à effectuer. Elle permet aussi de porter un choix sur les moyens qui seront utilisés pour réaliser la réhabilitation du site ainsi que sur les coûts qui y seront associés.]

[Aux Etats-Unis, l'EPA requiert, après une caractérisation exhaustive du site et souvent une analyse de risques, la réalisation d'une étude de faisabilité du projet de restauration des sols contaminés avec la technologie choisie.]

[Dans le cas des petits projets, l'EPA recommande même d'excaver le sol et de réaliser la caractérisation sur les sols excavés afin obtenir une meilleure connaissance de la contamination et des volumes à traiter. Cette procédure peut paraître onéreuse à première vue mais le fait de mieux évaluer le volume de sols à décontaminer permet de réaliser des économies parfois très appréciables.]

L'étude de faisabilité permet de s'assurer que le choix de la technologie (parmi les technologies reconnues par l'EPA) est adéquat et que le projet sera économiquement réalisable.]

La compagnie Resources Conservation qui commercialise le procédé BEST charge 5 000\$ à ses clients pour l'étude de faisabilité préalable à l'utilisation de leur technologie pour la réhabilitation du site.

[L'analyse de risques est une approche qui permet de mieux évaluer le niveau de décontamination à atteindre pour assurer la protection de l'environnement et de la population. Cette technique complexe et coûteuse va probablement être de plus en plus utilisée dans l'avenir.]

1.7 Situation actuelle au Québec

Les travaux de réhabilitation de terrains contaminés ne peuvent efficacement se réaliser que si l'on obtient la collaboration des différents intervenants impliqués dans le processus des opérations. La collaboration entre les représentants du Menviq. les propriétaires et les firmes de consultants en charge de l'étude de caractérisation est essentielle si l'on veut appli-

quer des mesures correctrices pour la restauration du site qui soient en accord avec les lignes directrices du ministère. [Rappelons qu'il s'agit de lignes directrices et non d'obligation en terme légal car il s'agit d'une politique et non d'un règlement sur la réhabilitation des terrains contaminés. Le seul aspect légal concerne l'application du règlement sur les déchets dangereux. En effet, les polluants des sols contaminés doivent passer le test de lixiviation conformément aux annexes du règlement sur les déchets dangereux afin de s'assurer qu'ils ne constituent pas un danger pour l'environnement.]

La politique, dans sa forme actuelle, sans cadre législatif à son application, n'incite pas les propriétaires de sols contaminés à les gérer adéquatement et à prendre les mesures correctrices qui s'imposent en vue de leur restauration. [La politique propose seulement un cadre d'action sans obliger qui que ce soit à s'y conformer. Il y a donc un vide juridique important que le gouvernement doit corriger au plus tôt en légiférant sur les sols contaminés tout en précisant la responsabilité de ceux qui réaliseront la décontamination.]

Les préoccupations majeures des autorités gouvernementales sont de s'assurer que les terrains sont décontaminés à un niveau qui soit jugé sécuritaire pour le type d'utilisation projetée. Il est évident qu'un terrain industriel, dans une zone à vocation industrielle ne sera pas décontaminé au même niveau qu'un terrain qui verrait sa vocation industrielle modifiée en utilisation à des fins domiciliaires. Le démantèlement des anciennes usines sises au centre d'une ville ou leur conversion en vue de construire des habitations familiales ou des condominiums requiert cette fois l'assurance que ces terrains et bâtiments ne

causent aucuns risques pour la population. L'intérêt des promoteurs pour ces terrains réside dans le fait que ceux-ci ont une grande valeur vu leur localisation dans la ville, la rareté des terrains vacants les rend donc très intéressants pour le développement domiciliaire urbain.

Les promoteurs immobiliers ont le devoir de s'assurer que leurs projets de développement seront sécuritaires c'est-à-dire respectent la sécurité du public et celle de l'environnement. Or les promoteurs, d'une manière générale, n'ont ni la connaissance ni la formation adéquate pour se prononcer à ce sujet.

Ce sont les municipalités qui connaissent le mieux leur milieu, leur territoire et l'historique des lieux, elles devraient donc faire savoir aux promoteurs, lors de la demande du permis construction, si elles soupçonnent que les terrains ou bâtiments visés par le projet sont contaminés. Il incombe alors aux promoteurs de vérifier la justesse des présomptions de contamination. Cependant, dans le cadre législatif actuel, les municipalités ne peuvent refuser d'émettre un permis de construction pour des raisons de contamination potentielle. Le délais de 60 jours dont elles disposent ne suffit pas pour obtenir une caractérisation des terrains convoités par les promoteurs, de plus elles n'ont ni les ressources humaines ni financières pour réaliser cette opération.

Selon le règlement sur les déchets dangereux tout propriétaire est responsable de la contamination éventuelle de sa propriété: terrains et bâtiments. Il doit assumer les coûts, parfois très élevés, pour les réhabiliter si ceux-ci s'avèrent contaminés. Le propriétaire fait aussi face au problème de sa responsabilité

vis-à-vis la décontamination qu'il a fait réaliser par une firme spécialisée.

[Lors des transactions immobilières, de plus en plus d'acheteurs veulent se protéger contre les problèmes environnementaux éventuels, c'est-à-dire les coûts, exorbitants parfois, associés à la décontamination des lieux. Ils demandent donc au vendeur de faire la preuve que les terrains ne sont pas contaminés ou s'ils le sont les coûts de la décontamination sont inclus dans la transaction. Ceux-ci seront évalués sur la base d'une étude de caractérisation du site. C'est la seule façon d'évaluer la situation: niveau éventuel de la contamination, types de polluants présents et leurs dangers respectifs, volumes à traiter et coûts associés aux opérations de restauration du site.)

La valeur de ces évaluations repose entièrement sur la qualité de la caractérisation du site. Au Québec, on n'exige pas d'étude de faisabilité du projet de restauration.

Les notaires peuvent également jouer un rôle très important auprès des acheteurs en les informant sur les risques et les dangers potentiels associés à la restauration éventuelle du site dont ils envisagent faire l'acquisition si ce dernier s'avère contaminé. Ainsi prévenu, l'acheteur peut exiger que le vendeur lui fournisse les informations concernant l'utilisation antérieure du site et l'état actuel de la situation. Il peut aussi exiger que le vendeur décontamine le site avant d'en prendre possession.

Ces procédures et exigences, bien que n'étant pas régies par une législation, sont de plus en plus courantes lors de transactions impliquant des terrains ayant appartenu à des industries.

Il existe trois types de solutions pour la restauration des sites contaminés:

- le confinement des sols sur place;
- l'enfouissement sécuritaire;
- le traitement des sols contaminés.

A l'heure actuelle, au Québec, la solution la plus utilisée est l'enfouissement dans des sites approuvés.

Le seul type de traitement, courant quoique très onéreux, est réalisé chez Stablex: la stabilisation/solidification. Celle-ci fixe les polluants. Le produit solide obtenu est ensuite enfoui de façon sécuritaire.

Certaines compagnies, aux Etats-Unis, en Europe et au Canada, ont mis au point des technologies pour l'élimination, la dégradation ou le traitement des polluants organiques ou inorganiques présents dans les sols contaminés. Il est à noter, cependant, que la majorité d'entre elles ne sont pas encore commercialisées au Québec.

Face au problème des sites d'enfouissement abandonnés le Québec comme les autres sociétés industrielles n'a d'autre choix que de prendre en charge la restauration des lieux. Vu les coûts parfois exorbitants et l'ampleur des travaux, il faut procéder à un choix, à une priorisation de l'urgence de l'intervention.

Cette opération est délicate. La priorisation ne devrait pas être sujette à l'arbitraire d'où la nécessité de développer des critères permettant d'établir l'ordre d'intervention de la manière la plus éclairée et la plus efficace du point de vue du respect de l'environnement.

2.0 LES TECHNOLOGIES DE DESTRUCTION ET DE TRAITEMENT DES SOLS CONTAMINES

2.0 LES TECHNOLOGIES DE DESTRUCTION ET DE TRAITEMENT DES SOLS CONTAMINÉS

Les technologies de destruction et de traitement des sols contaminés se regroupent en 3 classes:

- les techniques thermiques;
- les techniques physico-chimiques;
- les techniques biologiques.

Généralement, les techniques thermiques détruisent complètement les polluants organiques. Dans ce cas, elles ne permettent pas la récupération ou le recyclage des déchets. Il s'agit d'une perte totale des produits et donc un gaspillage du point de vue économique. Il est cependant possible d'utiliser des équipements dotés d'un système de récupération d'énergie. Ces systèmes sont de plus en plus populaires en Europe. Les procédés de destruction thermique éliminent complètement les déchets initiaux mais, lors des opérations ils génèrent eux-mêmes, une certaine quantité de déchets : gaz, solides et éventuellement liquides qu'il faudra traiter subséquentement.

Les techniques biologiques dégradent les polluants organiques et de ce fait ne permettent pas davantage que les procédés thermiques la récupération des déchets. Ces techniques génèrent également, au cours de leur processus, des déchets notamment sous forme de biomasse qu'il faudra aussi traiter ultérieurement. Dans le cas de polluants inorganiques, certains procédés biologiques permettent de faire passer des éléments en solution ce qui rend possible leur récupération ultérieure.

Les techniques physico-chimiques pourraient permettre la récupération des déchets en vue d'une réutilisation ultérieure car elles ne détruisent pas les produits. Elles sont donc plus intéressantes lorsque l'on veut éviter le gaspillage et les problèmes environnementaux potentiels. Elles aussi génèrent une certaine quantité de déchets lors de leur utilisation. Les procédés de stabilisation/solidification, comme les autres procédés physico-chimiques, ne détruisent pas les déchets mais ils les fixent les rendant non disponibles. Ces procédés présentent cependant l'avantage de limiter voire presque annuler le phénomène de lixiviation et les dangers de contamination des eaux souterraines et de la nappe phréatique.

D'une manière générale, l'efficacité des différentes techniques de destruction et de traitement des déchets est fonction non seulement de l'efficacité de la technologie en soi mais aussi de celle du système de dépollution mis en place pour traiter les déchets générés lors des opérations.

Le devenir des différents déchets générés variera selon leur état: gaz, solides et liquides:

- Les émissions gazeuses devront passer dans un système de dépollution pour en éliminer les particules et les polluants volatils (neutralisation des acides halogénés, absorption des polluants organiques...) avant d'être rejetées dans l'atmosphère.
- Les solides obtenus lors des opérations reliées à l'utilisation des différentes technologies: cendres d'incinération, cendres volantes, particules solides générées lors des

traitements chimiques ou obtenues dans les systèmes d'épuration des gaz seront soumises à la technique de stabilisation/solidification ou à la vitrification s'ils contiennent des métaux lourds.

- Les effluents aqueux: générés lors des traitements chimiques, solutions de lavages, eaux de lixiviation etc ...sont envoyés dans un système de traitement des eaux.

2.1 Les procédés thermiques

Les procédés thermiques conduisent, généralement, à la destruction et donc à l'élimination des polluants. Ces procédés sont largement utilisés de par le monde pour le traitement des déchets organiques industriels liquides et solides. L'incinération est la technologie la plus populaire. L'incinération d'un solide ou de sols contaminés est plus énergivore car une partie de l'énergie est utilisée pour le chauffage du solide ou du sol en vue de permettre la volatilisation des polluants organiques qu'il contient. Les procédés thermiques sont utilisés sur des sols excavés. Seule la vitrification peut être aussi réalisée in-situ.

Remarques relatives à l'utilisation des procédés thermiques:

- Le contenu en eau du sol provoque une baisse de la température de la combustion car une partie de l'énergie est utilisée pour la vaporisation de l'eau.
- Le contenu en halogènes influence la quantité d'acides halogénés libérés lors du traitement thermique. Ceux-ci ont

une action corrosive sur les réfractaires du four et requièrent un traitement dans le système de dépollution des gaz afin de respecter les normes des émissions atmosphériques.

- La présence de BPC ou de dioxines dans le sol influence les conditions d'opérations du procédé. En effet, ces produits requièrent une température de destruction plus élevée (1 200° C) et un temps de résidence d'au moins 2 secondes pour assurer une destruction complète. De plus, les opérateurs d'installations pouvant traiter ces produits doivent détenir un permis.
- Les métaux volatils à une température inférieure à ~ 1 080°C (2 000° F): As, Pb, Hg, Sn, Cd, Ag (qu'ils soient purs ou sous forme de sel ou d'oxyde) se vaporisent lors du traitement thermique. La rétention de ces métaux volatils dans les effluents gazeux est très difficile.
- Lors du traitement thermique qui se réalise généralement dans des conditions oxydantes le Cr 3+ est transformé en Cr 6+ très toxique.
- La présence de composés organiques contenant du phosphore provoque la libération d'oxyde de phosphore (P₂O₅) produit corrosif pour les réfractaires du four.
- Le sol traité et les cendres obtenues du traitement thermique contenant des métaux à des niveaux jugés encore inacceptables devront être soumis à un traitement supplémentaire soit la stabilisation/solidification ou la vitrification.

- Les cendres volantes contenant des métaux volatils seront soit réintroduites dans la chambre primaire soit traitées comme les cendres de combustion c'est-à-dire seront soumises au traitement de stabilisation/solidification.
- Les solutions aqueuses provenant du système de dépollution des gaz seront soumises à divers traitements: neutralisation, précipitation chimique, filtration etc... pour purifier les eaux avant le rejet.
- L'avantage des procédés thermiques est de réduire considérablement le volume des déchets.

Il est à noter qu'aux Etats-Unis les sols obtenus suite à un traitement thermique peuvent être déclassés ce qui permet leur réutilisation pour le remblayage du site. Au Canada et au Québec il n'y a pas de déclassification des sols. Ceux-ci doivent être entreposés et nécessitent un suivi environnemental quel que soit le niveau de décontamination atteint suite au traitement thermique. Cet état de fait implique des coûts supplémentaires ainsi que la mobilisation d'énergie et de ressources humaines pour le suivi de l'entreposage.

2.1.1 L'incinération (1, 2, 12, 13, 14, 15, 18, 22, 25, 28, 30, 31, 33, 44, 48, 51, 53, 54)

Il existe sur le marché une grande variété d'incinérateurs pour la destruction des déchets organiques industriels. Certains, tels les incinérateurs à injection liquide, ne pourront être utilisés pour le traitement des sols contaminés.

Services, SCA Chemical Services ... Ces compagnies traitent tous les types de déchets dangereux y compris les BPC. Elles opèrent un centre de destruction de déchets dangereux sur une base commerciale depuis de nombreuses années: Ensco et Rollins sont en opération depuis 1981, SCA depuis 1983 et Pyrochem depuis 1986.

La décontamination de sites d'enfouissement contaminés par des polluants organiques faisant appel aux services offerts par les centres de destruction fixes impliquent des coûts de transport des matériaux élevés.

En Europe également l'incinération dans des fours rotatifs est le mode de traitement thermique privilégié.

Au Canada, le seul centre de traitement des déchets en opération à l'heure actuelle est celui de Swann Hills en Alberta (2). Les responsables du centre qui avaient opté pour le four berçant sont en train d'installer un nouveau four, cette fois de type rotatif, qui sera en opération probablement en été. L'ajout de ce four se justifie par le fait que les déchets organiques reçus au centre sont majoritairement sous forme solide et non liquide tel qu'anticipé. Le four rotatif est plus versatile que le four de type berçant car il accepte les déchets quel que soit leurs formes.

Au Québec, la compagnie Envirocorp Inc. (14), fondée par Sanivan et Lavalin espère toujours implanter un incinérateur fixe à Senneterre où elle dispose déjà d'un site d'entreposage agréé par le Menviq. L'incinérateur choisi est un four rotatif à scories Von Roll (slagging). Ce système peut accepter les

déchets sous toutes leurs formes: liquides, boues, solides avec une efficacité de destruction de 99,9999 % pour les BPC. Cette technologie est reconnue, éprouvée et utilisée commercialement aux Etats-Unis et en Europe. Il faut compter un délai de ~ 2 ans avant l'opération commerciale à compter du jour où le processus d'étude d'impact est enclenché.

D'autres groupes voudraient implanter des incinérateurs au Québec notamment le groupe Chem Security - Stablex. Celui-ci a un projet visant l'implantation d'un incinérateur rotatif de conception américaine sur le parc industriel de Valleyfield. Les déchets traités seraient des boues de peinture, des solvants, des herbicides, des pesticides des huiles usées et des produits pharmaceutiques.. Les BPC ne seraient pas acceptés bien que la technologie le permette en raison de la réticence des populations à leur égard.

b - Installations mobiles

Ce type d'installation qui a généralement été conçu pour traiter des boues et des sols présente l'avantage de traiter les déchets sur place.

1- Ensco MPW-2000 (18)

Ensco Environmental Services dispose d'une unité transportable et non réellement mobile: MPW-2000 capable de détruire efficacement les polluants organiques y compris les BPC. A l'heure actuelle cette unité fonctionne comme un procédé fixe sur l'un des sites de la compagnie Ensco. Bien que reconnue et approuvée par l'EPA, cette technologie n'est pas encore commerciale aux

Etats-Unis. Transportable et non réellement mobile, elle requiert de longs délais pour le transport de l'unité et son installation sur le site, le démantèlement et la restauration du site après l'opération et le transport à son port d'attache. Le four est installé sur un camion remorque de 40 pieds, la chambre secondaire, le système d'alimentation, les systèmes de dépollution, le laboratoire de contrôle, les unités de services... sont transportés sur d'autres remorques. L'unité de destruction requiert en tout un dizaine de remorques. Les coûts du traitement doivent tenir compte non seulement des coûts d'opération de l'unité pour la destruction des polluants mais aussi ceux du transport, de l'installation, du démantèlement et de la restauration du site.

L'utilisation d'un tel système ne peut se justifier que lorsque les volumes de déchets à traiter sont très importants afin de répartir les coûts fixes de l'installation, du démantèlement et du transport sur un grand volume sinon les coûts peuvent être exorbitants. Malgré cela, les coûts sont élevés, c'est d'ailleurs la raison pour laquelle le Canada et l'Ontario qui avait envisagé l'utilisation de cette technologie ont abandonné cette option. Il semblerait que la compagnie Ensco elle-même ait récemment décidé de cesser ses opérations avec cette unité.

2- La technologie VESTA (44, 54)

C'est la seule technologie d'incinération munie d'un four rotatif qui soit réellement mobile. Elle a été conçue pour le traitement des sols contaminés.

La compagnie VESTA Technology Limited de Fort Lauderdale en Floride a développé cette technologie pour la rendre mobile. Le four rotatif, la chambre secondaire, l'alimentation, le système de dépollution et de contrôle peuvent être transportés sur 3 camions-remorques. Elle peut être mise en place en moins d'une semaine.

Bien que la technologie VESTA n'ait pas encore été testée aux Etats-Unis pour détruire des BPC, elle a prouvé son efficacité pour la décontamination de sols contaminés par des dioxines sur un site d'enfouissement de l'armée américaine. La teneur en dioxines retrouvée dans les cendres était ≤ 1 ppb et les émissions atmosphériques respectaient les normes à tous égards.

La technologie a aussi fait ses preuves dans le cas de sols contaminés par des pesticides. Le procédé VESTA fait actuellement l'objet d'une évaluation de performance pour la destruction des BPC à Swann Hills en Alberta. Environnement Canada, les ministères de l'Environnement de l'Ontario et du Québec, Hydro-Ontario et Hydro-Québec et la compagnie VESTA ont conclu une entente pour la réalisation des essais de performance de la technologie sur des sols contaminés par des BPC au coût de ~ 2,5 millions de dollars.

L'unité soumise aux tests de performance a subi quelques modifications au niveau du brûleur de la chambre de combustion primaire. L'unité installée à Swann Hills est dotée d'un brûleur à oxygène. L'utilisation d'un tel brûleur permet de réduire le volume de gaz à traiter dans la chambre secondaire et dans le système de dépollution. La température dans la chambre de combustion primaire est de ~ 470° C (900° F) à l'entrée et de

~ 970° C (1800° F) à la sortie. La chambre secondaire chauffée au propane atteint une température de ~ 1 200 ° C (2 200° F). Le système de dépollution comprend le traitement des gaz, la filtration des poussières et le rejet des émissions épurées par une petite cheminée.

Les premiers résultats obtenus sont très prometteurs. L'efficacité de destruction des BPC atteint 99,9999 % et l'efficacité du système de dépollution en ce qui a trait au dépoussiérage des émissions gazeuses permet de respecter les normes québécoises très restrictives de 25 mg/m³. Les tests ont été momentanément suspendus suite à quelques incidents mécaniques.

Trois tests étaient prévus:

- Sols contaminés par des BPC: concentration 1%;
- Sols contaminés par des BPC: concentration 10%;
- Sols + condensateurs déchiquetés.

Le premier test a été réalisé. Le deuxième est annulé et le troisième sera réalisé en avril-mai à la reprise des essais.

Quinze jours à trois semaines sont nécessaires pour la réalisation du troisième et dernier test. Les résultats ne seront pas disponibles avant ~ 2 mois après la reprise des opérations. L'EPA suit avec grand intérêt le déroulement de ce test de performance de la technologie VESTA et semble avoir un avis favorable à son égard pour le traitement des sols contaminés par des BPC.

Coûts: à venir

Remarques particulières relatives à l'utilisation des fours rotatifs:

- La dimension et la forme des débris ou des particules solides ont une grande importance sur l'efficacité du procédé et sur la durée de vie des équipements.
- Les gros morceaux (exemple: débris de broyage ou de déchiquetage des condensateurs) peuvent causer des dommages aux réfractaires du four. Dans le procédé VESTA, l'ajout de sable au mélange vise à minimiser les impacts négatifs causés par les débris métalliques sur les réfractaires ce qui a pour conséquence de prolonger la durée de vie du four.
- Les très fines particules (argile, silt) provoquent une surcharge de particules dans les émissions gazeuses.
- Les particules de forme sphérique roulent dans le four. La combustion des polluants qu'elles contiennent est alors incomplète.
- La présence de sulfate sodique ou potassique cause l'attaque des réfractaires avec formation de scories empêchant l'élimination des résidus solides de l'incinérateur.
- L'opération de l'incinérateur à une température proche de la fusion des cendres provoquera l'agglomération des sels inorganiques.

2.1.1.2 Incinération par des radiations infrarouges (18, 30, 44, 55)

* Cette technologie a également été conçue pour le traitement des solides et des sols contaminés. S'il advient que l'on doive détruire des déchets liquides (contenu de barils soit enfouis ou simplement déposés sur le site), ceux-ci doivent être incorporés à un sol porteur par exemple du sable avant d'être introduits dans le four.

↓ Le procédé SHIRCO commercialisé par différentes compagnies dont OH Materials Inc., Haztec Inc. et Riedel Environmental Technologies Inc. n'est pas réellement mobile mais plutôt transportable. Il peut traiter jusqu'à 100 tonnes de sol par jour. Il ne se justifie donc que pour le traitement de grands volumes de déchets.

Le système requiert ~ 4 semaines pour son installation sur un site et offre, semble-t-il, la même efficacité qu'un système fixe. Il comprend un système d'alimentation, une chambre de combustion primaire chauffée par des infrarouges (750 °C), une chambre de combustion secondaire chauffée au propane et un système de dépollution des émissions gazeuses.

L'efficacité de destruction requise pour les BPC de 99,9999 % peut être atteinte par ce procédé. Il subsiste cependant des incertitudes concernant la constance de cette performance car celle-ci est directement reliée à l'alimentation en BPC.

La OH Materials Corporation des Etats-Unis procède actuellement à Goose Bay, pour Environnement Canada, à une évaluation de la

performance de sa technologie sur des terrains contaminés de l'armée canadienne. 3 000 tonnes métriques de déchets contaminés par des BPC seront traités.

Les résultats obtenus jusqu'à présent à Goose Bay sont bons. Le temps de résidence est adéquat et le programme d'assurance qualité du procédé est jugé excellent. Même s'il s'est produit un incident causé par l'arrêt du ventilateur permettant l'évacuation des gaz, incident suivi du non fonctionnement du relais responsable de la mise en marche du ventilateur de secours, les résultats semblent très prometteurs. Les essais se poursuivent à l'heure actuelle.

L'EPA reconnaît cette technologie comme moyen valable pour la restauration des sites contaminés par des polluants organiques.

Remarques relatives à l'utilisation de l'incinération par des infrarouges:

- L'alimentation du système accepte les déchets sous forme solide ou de boue mais les particules ne peuvent dépasser 1 à 2 pouces. Les débris tels que pierres, racines, barils... doivent être déchiquetés aux dimensions sus-mentionnées pour être acceptables dans le processus d'alimentation.
- Le taux d'humidité du sol ou de la boue doit maintenir un contenu en solides > 22% afin de permettre son déplacement sur la courroie métallique du convoyeur. Les boues contenant un excès d'eau (sédiments de lagons) doivent être asséchées avant d'être introduites dans le système d'alimentation du four.

Coûts: de 425\$ à 795\$ US la tonne pour des opérations réalisées aux Etats-Unis. Les essais de Goose Bay fourniront des évaluations de coût au Canada pour un volume de 3000 tonnes.

Si les technologies VESTA et SHIRCO sont jugées performantes le Canada et le Québec disposeront de technologies, conçues pour les sols, pour résoudre le problème de la décontamination des sites d'enfouissement contaminés par des polluants organiques y compris les BPC.

2.1.1.3 Incinération sur lit fluidisé (18, 30, 44)

Ce type d'incinération développé aux Etats-Unis par Waste-Tech Inc., Combustion Engineering ... permet de traiter des solides halogénés ou non, des boues ou des liquides dans une atmosphère contrôlée avec surplus d'oxygène.

Ce procédé utilise un lit de matériaux inertes (souvent du sable) sur lequel est déposé le déchet afin d'améliorer le transfert d'énergie au déchet à incinérer. L'air de combustion est introduit à la base du lit dans un courant de bas en haut. La chaleur de combustion est fournie par l'apport minimal d'un combustible auxiliaire et par la chaleur dégagée par la combustion du déchet. La chambre de combustion secondaire permet un temps de résidence de 2 secondes, temps requis pour l'obtention d'une combustion complète des polluants. Un système de dépollution permet de traiter efficacement les émissions gazeuses avant leur rejet dans l'atmosphère.

Une variante de cette technologie soit le four à lit circulaire est commercialisée par la compagnie Ogden Environmental Services (43).

Ce procédé utilise de l'air à grande vitesse ce qui crée une zone de combustion avec grande turbulence et permet une meilleure efficacité de destruction des polluants. La forte turbulence et le temps de résidence relativement long dans ce type de four permet l'incinération des composés organiques à des températures plus basses que dans les fours rotatifs: 800 à 860 °C (1 500-1 600 °F). L'incinération à basse température permet de réduire le taux d'émissions d'oxydes d'azote (NO_x) et évite l'agglomération des cendres. L'ajout de chaux solide à l'alimentation en déchet permet d'éliminer les gaz acides dans la zone de combustion supprimant la nécessité du traitement subséquent de neutralisation des émissions gazeuses. Bien que disposant d'un permis de l'EPA pour la destruction commerciale des sols contaminés par des BPC dans les 10 régions de l'EPA, ce système ne serait toujours pas en exploitation commerciale.

Remarques relatives à l'utilisation de l'incinération sur lit fluidisé:

- La dimension des particules affecte non seulement le système d'alimentation mais aussi l'efficacité de la combustion. Les particules ne devraient pas dépasser 3 pouces. Les particules très fines (argile, silt) provoquent une surcharge en particules des émissions gazeuses.
- La température de la combustion joue un rôle sur la fluidité du lit. Une température plus élevée permet la fusion des

particules et augmente la viscosité du lit. Une température de combustion plus basse a le même impact sur la fluidité du lit. La présence de contaminants à faible point de fusion ($< 860^{\circ}\text{C}$ ou $1\,600^{\circ}\text{F}$) tels que les sels alcalins (Na) en proportion $> 5\%$ en poids sec ou les halogènes en proportion $> 8\%$ en poids sec favorisent la perte de fluidité du lit et causent des problèmes reliés à la formation de scories.

- Des concentrations en cendres $> 64\%$ encrassent considérablement le lit.
- Si la densité des déchets augmente, il faut réduire la dimension des particules afin d'assurer un bon mélange et un bon transfert de chaleur.
- La présence de grandes concentrations de polluants halogénés ou sulfonés va impliquer l'ajout de quantités plus importantes de chaux ou de carbonate pour neutraliser les gaz acides dans le four ou éventuellement requérir l'ajout d'un système de dépollution des émissions gazeuses.

2.1.1.4 La pyrolyse (28, 44)

La pyrolyse est une technique d'incinération qui permet la destruction des composés organiques en l'absence d'oxygène ou en atmosphère contrôlée en oxygène ($<$ conditions stoechiométriques). Cette technologie réduit fortement le volume de gaz à traiter dans le système de dépollution. La température de la chambre de combustion primaire est $\sim 500\text{--}750^{\circ}\text{C}$ ($1\,000\text{--}1\,400^{\circ}\text{F}$). La chambre secondaire est opérée à $1\,200^{\circ}\text{C}$ ($2\,200^{\circ}\text{F}$).

Cette technologie a le désavantage de favoriser la formation de HAP ce qui va nécessiter un contrôle et un traitement efficace des émissions rejetées dans l'atmosphère.

Les coûts d'opération élevés de cette technologie ont été un frein à son utilisation aux Etats-Unis. En Europe, la pyrolyse est une technique utilisée sur une base commerciale aux Pays-Bas et en République fédérale d'Allemagne. Il semble qu'à l'heure actuelle les prix deviennent plus compétitifs. La compagnie allemande BABCOCK (9) tente de percer le marché nord-américain avec un four pyrolytique. Reconnu techniquement valable par l'EPA, ce procédé est très volumineux et ne doit pas être considéré comme mobile ou même transportable.

Des recherches sur l'utilisation de la pyrolyse à des fins de récupération des ressources sont en cours à l'Université Laval sous la direction du Dr. Christian Roy, professeur au département de génie chimique.

2.1.2 La vitrification (28)

La vitrification est une technologie thermique qui immobilise le polluant dangereux dans une masse vitreuse. La destruction des composés organiques dangereux se produit en absence d'oxygène. Les contaminants inorganiques sont incorporés à la masse vitreuse. L'avantage de cette technique est la réduction du volume des émissions gazeuses et la réduction de la lixiviation des métaux. Ce phénomène est surtout important dans le cas d'une contamination par des métaux lourds.

2.1.2.1 La vitrification sur le site

Cette technologie est reconnue par l'EPA pour les résidus d'amiante. La compagnie VITRIFIX North America s'est spécialisée dans la vitrification de l'amiante. Elle opère commercialement des unités transportables aux Etats-Unis et en Angleterre.

La Westinghouse Electric Corporation dispose d'un prototype testé dans le cadre du programme Site de l'EPA et espère le commercialiser dans un proche avenir.

Remarques relatives à l'utilisation de la vitrification:

- La dimension des particules ne doit pas dépasser 4 pouces.
- Au début de la vitrification, il peut se produire l'émission de produits de combustion incomplète des composés organiques. La concentration en organique ne doit pas dépasser 10%.
- Les métaux volatils comme le mercure et le cadmium se retrouveront dans les émissions gazeuses qui devront être traitées et rigoureusement contrôlées.
- Le contenu en eau ne doit pas excéder 25% en poids.

2.1.2.2 La vitrification in-situ (28)

L'EPA considère que cette technologie va devenir la solution pour le traitement des sols contaminés par des composés inorganiques dans le cas de petits projets bien connus et localisés. Ce

procédé est bien reconnu pour les déchets radioactifs depuis des années.

La compagnie GeoSafe dans l'Etat de Washington commercialise cette technologie qui peut traiter 4-6 tonnes à l'heure. L'avancement de la vitrification dans le sol est de 1-2 pouces à l'heure.

Des électrodes sont introduites dans le sol jusqu'à une profondeur de 18-20 pieds. Pour démarrer le processus de vitrification du graphite et du verre finement divisés sont disposés entre les électrodes ce qui permet au courant de circuler ensuite le courant est conduit par le sol en fusion. La fusion se produit à des températures de l'ordre de 1 600-2 000° 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.

Un système de captage des gaz (couverture de la zone de traitement) permet de confiner les émissions gazeuses produites lors de la vitrification et de les faire passer dans le système de dépollution avant de les rejeter dans l'atmosphère.

Remarques relatives à l'utilisation de la vitrification in-situ:

- Au démarrage, il y a possibilité de libération des produits de combustion incomplète dans les cas des polluants organiques et de libérer des métaux volatils.

- Les électrodes, dont la longueur ne dépasse pas 18 à 20 pieds, ne permettent pas la décontamination d'un site en profondeur.
- Un site contaminé n'ayant pas de fond on ne sait ce qui se passe en dessous de la zone de vitrification.
- La présence de poches de produits organiques ou de charbon dans le sol peut causer des poches de gaz.
- La présence de barils métalliques ou de ferrailles dans le sol peut en modifier la conductivité.
- La présence d'eau cause une énorme perte d'énergie.

Malgré les inconvénients mentionnés ci-dessus, l'EPA n'éprouve aucune appréhension à reconnaître la valeur de cette Technologie. Elle admet cependant qu'il existe un problème de sécurité relié à l'utilisation de l'électricité et notamment les dangers d'électrocution surtout en présence d'eau.

Coûts: 250 à 350 \$ US la tonne.

2.2 Les procédés physico-chimiques

Les procédés strictement physiques ne détruisent pas les polluants. Ils se basent sur les caractéristiques et constantes physiques des constituants pour en effectuer la séparation. Le déchet est séparé en deux fractions: l'une organique, l'autre inorganique qui pourront être traitées ou récupérées par la

suite. Les procédés physiques sont des techniques de pré-traitement.

Les procédés physiques les plus couramment utilisés sont: le tamisage

- le broyage;
- la sédimentation;
- la floculation/décantation;
- la filtration;
- la centrifugation;
- la déshydratation (évaporation);
- l'air stripping.

Ces techniques qui sont applicables sur des sols excavés, excepté l'air stripping qui peut aussi être réalisé in-situ, sont bien connues et d'usage courant non seulement pour le traitement des sols contaminés mais surtout dans l'industrie depuis de nombreuses années.

Les procédés chimiques modifient les composés organiques ou inorganiques pour les rendre moins toxiques et donc plus faciles à manipuler que ce soit pour les éliminer ou les récupérer.

Les procédés les plus utilisés sont: la précipitation par l'ajout de produits chimiques, la neutralisation, l'oxydation et la réduction ainsi que la stabilisation/solidification.

Les traitements physico-chimiques intègrent les deux types de procédés (6, 24, 26, 27, 28, 30, 31, 32).

2.2.1 L'extraction chimique

Cette technologie vise la séparation du sol contaminé en ses phases constitutives: organique, eau, particules solides. Reconnue et intéressante pour des concentrations en organiques < 400-500 ppm, elle n'est pas économique lorsque la contamination est importante. Dans ce cas les méthodes thermiques sont plus adéquates.

L'extraction chimique peut être réalisée in-situ ou après excavation du sol.

2.2.1.1 Le procédé BEST (Best Extraction Sludge Treatment)

Ce procédé est commercialisé par la Resources Conservation Corporation dans l'Etat de Washington (28,47). Les composés organiques sont extraits du sol à l'aide d'un solvant: la TEA (triéthylamine). A froid, le solvant est à la fois miscible dans l'eau et la fraction organique. Il extrait les polluants organiques des particules solides. La filtration ou une centrifugation sépare les particules de la phase liquide (eau - organique). A chaud la fraction liquide se scinde en ses deux composantes: l'une aqueuse l'autre organique.

Remarques relatives à l'utilisation du procédé BEST:

- Des composés volatils peuvent réagir avec le solvant ce qui peut nécessiter un traitement additionnel.
- Les déchets doivent être pompables.

- La TEA est une base faible qui existe sous cette forme à $\text{pH} \geq 10$. Les déchets acides ou de $\text{pH} < 10$ doivent être neutralisés.
- La présence d'émulsifiant perturbe l'action de la TEA ce qui a pour effet de nécessiter l'utilisation de plus grandes quantités de solvant.
- Les métaux tel l'aluminium réagissent en milieu fortement alcalin. Lorsque le déchet contient de tels éléments, il est recommandé d'ajuster le pH des déchets à traiter à l'aide de TEA plutôt que par l'usage de bases fortes.

La compagnie Resources Conservation Co. charge 5 000\$ US pour réaliser une étude de faisabilité du traitement du site à l'aide de sa technologie.

Ce procédé a été fortement critiqué lors de sa présentation à la réunion organisée par l'EPA à Cincinnati en février 1990 car il utilise d'énormes quantités de solvants qui ne sont pas recyclés. Le procédé génère de la sorte de grandes quantités de déchets.

Coûts: Bien qu'un test a été réalisé au coût de 150\$ US la tonne, en général les coûts oscillent entre 200 et 300\$ US la tonne.

2.2.1.2 Procédé développé par la CF Systems Co. (28, 31)

Ce procédé extrait les contaminants organiques à l'aide de gaz liquéfié. Le dioxyde de carbone est généralement utilisé pour l'extraction de polluants organiques présents dans des solutions

aqueuses tandis que le propane est utilisé pour les sédiments les boues et les sols (semi solides).

Bien que cette technologie soit jugée efficace par l'EPA pour une grande variété de polluants organiques y compris les BPC, elle est jugée très onéreuse. Ce procédé n'est pas encore en opération commerciale.

Remarques relatives à l'utilisation du procédé de CF Systems Co.:

- Les sols doivent être relativement fluides (semi solides).
- Ce procédé ne convient pas pour les métaux lourds.
- Les sols qui peuvent réagir avec le solvant utilisé (CO₂, propane) doivent subir un pré-traitement.
- Le contenu en organique ne peut excéder 200 ppm, 40% pour les huiles.

Coûts: de l'ordre de 500\$ US la tonne.

2.2.1.3 Procédé de la compagnie LEEP (Low Energy Extraction Process), (communication personnelle)

Il s'agit d'un procédé d'extraction solvant/solvant pour les composés organiques. L'utilisation d'un solvant comme le méthanol reconnu comme étant un excellent extractant donne de très bons résultats mais l'utilisation d'un mélange de solvants permet d'obtenir de bien meilleurs rendements. Pour optimiser

la rentabilité du procédé, il faut connaître exactement la nature du sol ainsi les caractéristiques de ses contaminants afin de réaliser l'extraction à l'aide du meilleur solvant.

Coûts: 100-690\$ US cependant, en général, ils sont plus proches de 100\$ US la tonne.

2.2.1.4 Procédé EXTRAXSOL de la compagnie Envirocorp Inc.

Cette technologie (14) permet de décontaminer des sols, graviers, sables, roches etc... par l'action de solvants organiques non chlorés et non toxiques. Le procédé est efficace pour extraire les BPC, huiles et graisses, hydrocarbures polyaromatiques (HPA) et monoaromatiques (HMA), les pentachlorophénols ...

L'efficacité du procédé est fonction du nombre d'extractions. Les solvants utilisés sont recyclés. Les résidus de distillation contiennent les polluants organiques concentrés résultant de l'extraction du sol. La réduction du volume peut atteindre 95%.

Une unité actuellement en opération commerciale peut traiter des sites contenant jusqu'à 1 000 tonnes de sols.

Coûts: 600\$ à 2 000\$/tonne selon la quantité de BPC avec une unité de 1 t/h et un minimum de 20 tonnes. 200\$/tonne pour une unité de ~~500 t/h~~ et un minimum de 10 000 tonnes. Cette unité est à construire.

2.2.1.5 Procédé Thermonic développé par la Société Thermonic Décontamination (50).

Cette société québécoise a développé une technique de régénération des sols contaminés par des métaux (As, Pb, Hg, Zn, Cr, Fe) ainsi que par des huiles et graisses. Le procédé vise la récupération et le recyclage des métaux. Ce procédé n'est pas commercial. Des tests pilotes vont être entrepris sous peu notamment pour la Société de Développement Industriel de Montréal.

Coûts: estimation de 200\$/m³.

2.2.2 Le lavage des sols sur le site (28)

Ce procédé s'apparente à l'extraction chimique mais cette fois le liquide extracteur est généralement une solution aqueuse froide ou chaude à laquelle on ajoute soit un acide, une base, un agent tensio-actif ou un agent complexant. Dans certains cas on peut aussi utiliser des solvants organiques. Une unité de traitement du fluide extractant permet le recyclage de ce dernier. Ce type de traitement est surtout valable pour les métaux: Pb, Cd, Cr, Cu, Ni.

La technologie développée, aux Etats-Unis, par MTA Remedial Resources Inc. et par la Ecova Corporation est utilisée sur une base commerciale à l'aide de petites unités mobiles depuis quelques années. En Europe et notamment aux Pays-Bas cette technologie est également bien reconnue. Dans ce pays des unités transportables ou mobiles de capacité de 11 à 30t/h traitent avec efficacité des sols contaminés par des métaux lourds mais

aussi par des cyanures, des huiles, des composés aromatiques ... Il faut mentionner que malgré leur mobilité potentielle ces unités sont opérées comme des unités fixes.

Remarques relatives à l'utilisation du lavage des sols sur le site:

- Lorsque le coefficient de partage est défavorable, le procédé requiert de grands volumes de fluide extractant.
- Lorsque la récupération du solvant est difficile à réaliser ou n'est pas envisagée, les coûts deviennent exorbitants.
- Les variations observées dans la composition des polluants du déchet rend difficile le choix du fluide utilisé pour la lavage du sol.
- La composition du sol a un rôle très important. La présence d'une forte concentration en acide humique inhibe la désorption des polluants. Les particules fines d'argile ou de silt sont difficilement séparées des boues qu'elles engendrent. Les sols argileux retiennent fortement les produits organiques volatils. La perméabilité du sol joue également un rôle très important.
- L'utilisation de solvants toxiques requiert des procédures de manipulation rigoureuses et peut nécessiter un traitement de détoxification subséquent.

Coûts: de 90\$ à 160\$/t, aux Pays-Bas, pour des unités pouvant traiter 10 à 25t/h.

2.2.3 Le lavage des sols in-situ (28, 29)

Cette technologie s'apparente à celle présentée pour le traitement des sols dans des unités mobiles amenées sur le site. Cette fois la solution extractante est introduite dans le sol. Les eaux de lixiviation ou les eaux souterraines contenant les polluants désorbés sont recueillies et traitées soit en vue de leur destruction ou récupération.

Les compagnies MTA Remedial Resources Inc. et Ecova Corporation commercialisent ce procédé aux Etats-Unis.

Aux Pays-Bas la TAUW Infra Consult B.V. dispose d'une technologie permettant de restaurer des sols contaminés par du cadmium. Le sol est lavé in-situ par une solution acide (HCl 10-3 M, pH 3,5). Des puits et des drains permettent de recueillir le lixiviat et les eaux souterraines contaminées. Ces eaux acides contenant le Cd sont alors traitées par échangeur d'ions pour récupérer le cadmium.

Remarques relatives au lavage des sols in-situ:

- Les remarques à propos du coefficient de partage des polluants et sur la composition des déchets mentionnées pour le lavage des sols sur le site s'appliquent aussi au traitement in-situ.
- Les caractéristiques du sol ont une grande importance dans le cas du traitement in-situ. De fortes concentrations d'organiques inhibent la désorption, une faible perméabilité du sol réduit la percolation, le sol et le solvant peuvent

du sol réduit la percolation, le sol et le solvant peuvent réagir. Une mauvaise hydrologie du sol empêcherait la récupération des eaux souterraines.

- L'utilisation de fluides de lavage toxiques cause des risques pour la santé.
- Le fluide extractant utilisé doit pouvoir être recyclé sinon le procédé ne sera pas rentable.

Coûts: 83\$ US/m³ dans le cas de la récupération du Cd aux Pays-Bas pour un volume traité total de 30 000 m³. Ce coût représente 80% du coût du lavage du sol sur le site.

2.2.4 Déchloration des sols et des boues selon le procédé APEG-PLUSTM (8, 28)

La déchloration alcaline est un procédé utilisé depuis de nombreuses années dans l'industrie chimique notamment pour la production de phénol à partir de chlorobenzène.

C'est aussi une technologie qui est largement utilisée pour le traitement des huiles contaminées par des BPC (huiles contenues dans des transformateurs). Ce traitement présente l'avantage de réutiliser l'huile décontaminée obtenue après un reconditionnement pour lui rendre ses propriétés initiales excepté la présence de BPC.

Le procédé de déchloration alcaline des sols et des boues est semblable à celui mis au point pour les huiles en ce sens qu'on utilise un réactif qui va déchlorer la molécule du polluant. Une étape supplémentaire est cependant requise dans le cas des sols car il faut extraire le polluant des particules sur lesquelles il est fixé.

Le procédé APEG-PLUSTM développé par la Galson Remediation Corporation utilise une solution alcaline de KOH et de polyéthylène glycol (PEG) à laquelle on ajoute un solvant en l'occurrence le diméthylsulfoxyde ou DMSO afin d'augmenter la vitesse de la réaction. Le DMSO agit comme un catalyseur sur la vitesse de la réaction en augmentant l'alcalinité du milieu. Le DMSO favorise aussi l'extraction des polluants organiques chlorés présents dans le sol, cependant ce solvant est assez onéreux.

Les sols sont mélangés avec les réactifs puis chauffés à 150° C. Après plusieurs heures ou après le temps requis pour assurer la déchloration au niveau recherché, le mélange est filtré ou centrifugé. Le temps requis pour une déchloration est fonction de la nature du polluant et du niveau de dépollution recherché. Le sol obtenu est lavé à l'eau à plusieurs reprises. Le réactif et les eaux de lavages sont recyclés.

Le procédé APEG-PLUSTM s'est montré efficace pour des sols contaminés par du pentachlorophénol, des pesticides (DDT, 2,4,5-T), des dioxines, des BPC. Les concentrations de ces polluants ont été réduites à des niveaux < 1 ppb pour les dioxines et < 2 ppm pour les BPC.

Remarques relatives à l'utilisation du procédé APEG-PLUS™:

- Cette technologie n'est applicable que pour les dérivés organiques halogénés. Cependant le réactif n'est réellement efficace que pour les dérivés halogénés aromatiques: BPC, dioxines, chlorophénols, chlorobenzènes ou autres molécules contenant un noyau benzénique halogéné.
- Lorsque la concentration du polluant halogéné est élevée (> 5%) le volume de réactif requis pour la déchloration devient excessif.
- Le procédé opérant dans des conditions alcalines, les sols acides seront neutralisés.
- Un taux d'humidité du sol > 20% pourra impliquer des volumes excessifs de réactif.
- La présence de concentrations élevées d'acide humique allongera la durée de la réaction.
- La présence, dans le sol, de métaux comme l'aluminium qui peuvent réagir en milieu fortement alcalin impliquera l'utilisation de quantités accrues de réactif.

Coûts: 200\$ à 300\$ US/t. Les coûts de mobilisation, démantèlement et transport de l'unité mobile ainsi que la restauration du site ne sont pas inclus.

2.2.5 Volatilisation à basse température: procédé X-TRAX™ (28)

Le procédé X-TRAX™ mis au point par la Chemical Waste Management en Illinois permet de désorber les composés organiques d'un sol contaminé en présence d'eau. L'azote est utilisé comme gaz porteur pour entraîner les composés organiques. L'air peut être substitué à l'azote pour l'entraînement des gaz.

Ce procédé est reconnu et apprécié par l'EPA. Il est surtout efficace pour des sols sablonneux.

Remarques relatives à l'utilisation du procédé X-TRAX™

- Ce procédé convient pour des sols contenant moins de 10% d'organiques dont la température d'ébullition est $< 400^{\circ} \text{C}$ (800°F) et dont le taux d'humidité est $< 60 \%$.
- Le mercure présent dans le sol sera volatilisé durant l'opération.
- La présence de teneur élevée d'argile ou de silt favorisera les émissions de poussières.
- Un sol compacté freinera la désorption des polluants.
- L'assèchement du sol est un pré-requis lorsque le sol contient une teneur élevée en eau.

Coûts: 150\$ à 250\$/verge cube.

2.2.6 Stabilisation/solidification (7, 11, 13, 28, 31)

La stabilisation est une technologie applicable aux déchets sous forme liquide, solide ainsi qu'aux boues. Ce procédé ne modifie pas les propriétés toxiques des contaminants mais en limite considérablement si pas totalement la migration par son action inhibitrice sur le phénomène de lixiviation. Le déchet est solidifié ce qui le rend plus stable et plus facile à manipuler et à entreposer. Il est aussi chimiquement stable suite à la stabilisation.

Le mécanisme de fixation du polluant dépend du type de procédé choisi: matrice cimentaire, matrice alcaline, matrice thermoplastique (asphalte), polymères organiques, silicates. Il est aussi possible de réaliser la fixation en associant plusieurs techniques. L'ajout de plusieurs additifs en même temps pour former la matrice de stabilisation renforce les qualités de cette dernière. L'addition de silicate ou de ciment à de la chaux conduit à l'obtention d'une matrice capable de stabiliser une plus grande variété de polluants que les matrices cimentaire ou alcaline, chacune prise séparément.

Cette technologie peut être réalisée sur des sols excavés ou in-situ.

Le procédé est surtout applicable aux sols contaminés par des polluants inorganiques tels les métaux lourds mais il peut aussi traiter, accepter un certain contenu organique (huiles, graisses, BPC créosote ...). C'est la technologie la plus reconnue et utilisée pour le traitement des sols contaminés par des composés inorganiques aux Etats-Unis. L'EPA admet cependant qu'il y a

encore des incertitudes ou inconnues concernant le phénomène de lixiviation à long terme. Il y a aussi la possibilité de créer des antagonismes suite à la présence simultanée de certains polluants ainsi que des effets causés par le niveau élevé du pH de la matrice.

Le déchet soumis à cette technologie subit, au départ un pré-traitement visant à ajuster son pH et à insolubiliser les métaux lourds. La forte alcalinité des différentes matrices de stabilisation permet la neutralisation des lixiviats acides. Les métaux lourds sont de ce fait maintenus sous une forme insoluble et donc moins mobile.

2.2.6.1 Stabilisation/solidification in-situ (28, 31, 32)

Cette technologie requiert l'utilisation d'équipement particulier permettant de creuser et mélanger, en profondeur, le sol aux additifs choisis. Un système de drains permet de recueillir les eaux de lixiviation. Le procédé Géo-Con/DSM commercialisé par la compagnie International Waste Technologies a été testé dans le cadre du programme Site de l'EPA. Les résultats obtenus sur des sols contenant des BPC se sont avérés intéressants mais il reste encore certaines incertitudes. L'efficacité réelle du procédé pour les BPC et la qualité et le comportement de la masse solidifiée dans des conditions climatiques avec gel-dégel.

Coûts: 194\$ US la tonne.

2.2.6.2 Stabilisation/solidification sur le site

Les compagnies Hazcon Inc. et Chemfix Technologies Inc., aux Etats-Unis proposent des technologies de stabilisation/solidification des sols contaminés par des déchets dangereux: métaux lourds et composés organiques de haut poids moléculaire.

- 1- Le procédé Hazcon utilise une matrice cimentaire à laquelle on ajoute un additif appelé Chloranan qui encapsule les produits organiques les empêchant de retarder ou inhiber la solidification. Le procédé a été jugé efficace par l'EPA pour des sols contenant jusqu'à 25% d'organiques (13, 28, 31, 32).

Coûts : ~ 200\$ US/tonne.

- 2- Le procédé Chemfix utilise une matrice à base de silicates sodiques à laquelle on ajoute des additifs choisis en fonction des besoins reliés à la nature des déchets (7, 11, 28, 31).

Les réactions intervenant dans le procédé sont très complexes cependant on peut les classer en 3 catégories:

- Réactions entre les silicates de sodium et les polysilicates contenus dans le CHEMSET C-220 et les cations présents dans le déchet pour former des silicates de métaux insolubles;
- Réactions entre les silicates de métaux obtenus et le CHEMSET I-20 qui contient des agents réactifs à base de calcium. Le choix des réactifs varie selon la nature du

déchet. Généralement, il s'agit de ciment Portland mais on peut aussi utiliser des poussières de four à ciment, des poussières de four à chaux, de cendres volantes de centrales thermiques. Il se forme une structure de gel qui donnera au produit final ses propriétés caractéristiques suite à la solidification.

- Le troisième groupe comprend des réactions d'hydratation, d'hydrolyse et de neutralisation entre l'eau, les déchets et les réactifs au sein du gel.

Le procédé Chemfix immobilise efficacement les cations métalliques dans la matrice à base de silicates. Il n'en est pas de même dans le cas de métaux sous forme anionique ou sous forme neutre. Il faut donc s'assurer de la forme sous laquelle se trouvent les métaux et éventuellement réaliser des pré-traitements. En ce qui a trait aux composés organiques, d'une manière générale, ces produits ne sont pas efficacement retenus par la matrice de stabilisation. Des recherches sont entreprises afin de solutionner ce problème.

Le procédé Chemfix est bien apprécié par l'EPA. Ce procédé qui opère à pH 9 convient particulièrement pour des sols contaminés par du plomb car à ce pH le plomb ne lixivie pas. Il en est autrement lorsque le pH est 13 comme c'est le cas chez Stablex.

Coûts: 195\$-475\$/tonne.

- 3- Le procédé Sealofafe utilisé par la compagnie STABLEX est à base d'une matrice cimentaire à laquelle on ajoute différents additifs (poudre d'aluminium et/ou alumine, sili-

cate...) ce qui conduit à l'obtention d'un matériau solide semblable à du béton (46).

Ce procédé est particulièrement efficace pour le chrome, le mercure, les cyanures et autres produits toxiques inorganiques. Le plomb sous forme métallique n'est pas acceptable par cette technologie qui opère à pH 13.

Coûts: 275\$-400\$/tonne.

Remarques relatives à l'utilisation de la stabilisation/
solidification:

- Les composés organiques interfèrent avec les agents de liaison de la matrice utilisée.
- La concentration en polluants organiques ne doit pas dépasser 20 à 45% en poids surtout dans le cas d'une matrice cimentaire.
- Les composés semi volatils ou les PAH ne doivent pas dépasser 10 000 ppm.
- Les huiles et graisses ne doivent pas excéder 10%.
- Si le contenu en solides est inférieur à 15%, il faut recourir à l'ajout de plus grandes quantités de ciment.
- Les fines particules interfèrent dans la prise du ciment. Les poussières recouvrent les particules de ciment, ceci affaiblit les liaisons et retarde la prise.

- La présence de halogénures retarde la prise du ciment et favorise le phénomène de lixiviation.
- Des concentrations > 3 000 ppm de cyanures interfèrent également dans le phénomène de liaison des particules.
- La présence de métaux solubles de Mn, Sn, Zn, Cu et Pb modifie les caractéristiques du produit obtenu et le temps de prise ce qui peut conduire à une lixiviation potentielle plus accentuée.
- L'augmentation du volume et du poids de déchets à enfouir varie de 20 à 50%.
- La chaleur dégagée lors de la formation de la matrice peut provoquer la libération de composés volatils dangereux.

2.3 Les procédés biologiques

Les procédés biologiques se sont d'abord développés pour le traitement des solutions aqueuses contenant de faibles concentrations de polluants organiques (< 1%). Les micro-organismes détruisent les composés organiques mais libèrent de la biomasse qu'il faudra éventuellement traiter ultérieurement. En effet, les métaux lourds éventuellement présents dans le déchet s'accumulent dans les boues qui doivent ainsi être considérées et traitées comme des déchets dangereux.

La composition du déchet a une très grande influence sur le rendement de ces procédés. Les paramètres tels que: pH,

température, concentration en sels et en métaux, concentration en organiques sont autant de facteurs qui vont interférer, modifier la croissance des micro-organismes responsables de la biodégradation.

La biodégradation peut se réaliser en condition aérobie ou anaérobie. Pour fonctionner en milieu aérobie, l'aération ou oxygénation du déchet est le facteur principal. Les micro-organismes qui peuvent vivre et se développer en milieu privé d'air ou plus précisément en absence d'oxygène libre sont appelés anaérobies. Le procédé fonctionnant dans ces conditions permet la récupération de biogaz mais libère des produits volatils malodorants dangereux tels le H_2S , les mercaptans. La production de biomasse est inférieure lors de la biodégradation anaérobie mais le temps du traitement est plus long.

La biodégradation peut aussi être réalisée sur des sols contaminés et des boues. Il s'agit de variantes des procédés développés pour les effluents aqueux. Ils ont été mis au point pour traiter une grande variété de polluants: pesticides, diesel, essence, huile, créosote, pentachlorophénol, produits organiques halogénés...

Ces technologies sont très utilisées aux Etats-Unis et en Europe notamment aux Pays-Bas et en Allemagne. Elles sont souvent couplées à d'autres procédés dans le but d'obtenir une meilleure restauration du site.

Au 4ème colloque sur les substances toxiques les 4 et 5 avril dernier à Montréal, MM. Couillard, Mercier et Tyagi de l'INRS-eau ont présenté leur résultats relativement à l'utilisation d'un

procédé biologique pour la solubilisation des métaux lourds présents dans les boues résiduelles. Les bactéries Thiobacillus oxydent les métaux et permet de les solubiliser en milieu acide d'où ils peuvent être récupérés. Ces procédés mis au point pour des boues à un coût moins élevé que les traitements chimiques pourraient aussi s'appliquer dans le cas des sols contaminés. Des recherches sont nécessaires dans ce domaine qui semble très prometteur.

Remarques relatives à l'utilisation des techniques de biodégradation:

- Une variation dans la composition du déchet aura une influence sur l'activité biologique et par conséquent sur la biodégradation.
- Les polluants solubles dans l'eau sont plus facilement biodégradables.
- La température doit être comprise entre 15 et 70° C car la majorité des populations microbiennes vivent surtout dans cette zone,
- Le manque d'oxygène et l'insuffisance d'agents nutritifs freinent l'activité biologique.
- Le taux d'humidité doit se maintenir entre 40 et 75%. Un taux d'humidité inférieur à 40% inhibe l'activité biologique, s'il dépasse 75%, la disponibilité de l'oxygène et l'activité biologique sont affectées.

- Un pH en dehors de la zone comprise entre 4,5 et 8,5 inhibe l'activité biologique.
- en l'absence de micro-organismes indigènes on peut ajouter au milieu des souches cultivées choisies selon le type de polluant à dégrader.
- La présence de concentrations élevées de métaux lourds, sels inorganiques ou dérivés organiques chlorés tels des pesticides, herbicides... a une forte influence sur l'activité biologiques car ces produits peuvent être très toxiques pour les micro-organismes

Coûts: 145-285\$ US/tonne.

2.3.1 Les bioréacteurs

Les bioréacteurs sont généralement utilisés pour le traitement des effluents aqueux industriels ou municipaux ainsi que pour les déchets sous forme de boue aqueuse (10, 26, 28, 29, 33, 45, 49, 56).

Le bioréacteur est alimenté par des micro-organismes, au début des opérations ou sur une base régulière, et par les éléments essentiels à leur croissance afin d'opérer dans les conditions optimales. Il s'agit d'oxygène, d'acide ou de base pour ajuster le pH, d'éléments nutritifs organiques et inorganiques.

2.3.1.1 Aux Etats-Unis

Différentes compagnies disposent d'unités mobiles pour le biotraitement des eaux, des boues et des sols contaminés:

- Motec Inc. peut traiter les déchets contenant de la créosote, du pentachlorophénol, des pesticides et des résidus pétroliers.
- Detox Industries Inc. s'est spécialisée pour le traitement des dérivés halogénés dont les BPC.
- Ecova Corporation réalise la biodégradation des pesticides, des PAHs, de pentachlorophénol et de produits pétroliers.

D'autres compagnies américaines telles Biotrol, Solmar Corporation, oeuvrent aussi dans le domaine.

2.3.1.2 Aux Québec

Envirocorp Inc. (14) possède une unité pilote mobile de traitement des boues huileuses selon un procédé biologique thermophile et aérobie. Cette unité est actuellement en opération chez Texaco à Toronto. La compagnie a déposé une demande de brevet pour ce procédé qui sera en opération commerciale en 1990. Les boues peuvent contenir jusqu'à 30% d'huiles et graisses et 40% de solides.

D'autres compagnies telles ADS offrent aussi des services de biotraitement d'effluents aqueux et de sols contaminés pour le domaine des produits pétroliers.

2.3.2 Épandage des sols

Il s'agit d'un traitement des sols qui s'effectue sur des sols excavés que l'on étend sur une surface préparée et consacrée à cette fin.

L'épandage des sols contaminés permet de réaliser le traitement biologique dans des conditions aérobies.

Le procédé proposé par Envirocorp Inc. (14) convient bien pour les huiles et graisses, les hydrocarbures mono et polyaromatiques, les phénols... Il permet de réduire la contamination dans les sols à un niveau permettant de rencontrer les normes de la province. Si le sols contaminés contiennent des hydrocarbures volatils l'aire de traitement est couverte afin de récupérer et traiter les émissions volatiles avant leur rejet dans l'atmosphère. Le biotraitement dégrade les produits organiques mais les métaux lourds éventuellement présents dans le déchet s'accumulent au cours des ans. Il en résulte que, au bout de 10 ans, le sol sur lequel ont été épandus les sols contaminés, doit être considéré et traité comme déchet dangereux jusqu'à une profondeur d'environ 6 pouces.

2.3.3 Biodégradation in-situ (28, 49)

Les micro-organismes responsables de la biodégradation in-situ sont indigènes ou sont introduits dans le sol à décontaminer. Ils croissent et fonctionnent en milieu aérobie ou anaérobie. Le taux de dégradation dans des conditions anaérobies sont très faibles aussi ce type de remédiation ne sera guère utilisé.

La biodégradation des sols in-situ est souvent associée au pompage des eaux souterraines et à la réinjection des agents nutritifs et de l'oxygène dans la nappe aquifère et les sols contaminés.

Les conditions favorables pour la bioréclamation sont:

- une oxygénation suffisante;
- un pH neutre;
- des agents nutritifs (azote, phosphore...);

Le facteur limitatif du procédé est la concentration en oxygène dissout. On utilise souvent le peroxyde d'hydrogène comme source d'oxygène. Ce produit relâche graduellement l'oxygène dans le milieu ce qui permet une biodégradation continue. Cet effet est contrecarré et même annulé par la présence de fer dans le sol. L'ajout de composés à base de phosphate permettrait de complexer le fer et prolonger la stabilité du peroxyde in-situ. Cette technologie convient bien pour le traitement de sols contaminés par des composés organiques en absence de métaux lourds car ceux-ci ont une action inhibitrice sur la biodégradation. Elle a été fréquemment utilisée et notamment par la TreaTek Inc. pour la bioréclamation dans le cas de contamination par de l'essence ou du diesel et des huiles de raffineries. La compagnie Ecova, également aux Etats-Unis, applique ce procédé pour la décontamination de sols contaminés par des solvants et des composés aromatiques halogénés.

Remarques relatives à l'utilisation de la biodégradation in-situ

Aux remarques mentionnées plus haut sur la biodégradation en général, il faut ajouter:

- Une faible perméabilité du sol empêche le mouvement de l'eau et des agents nutritifs.
- Une variation de la composition du sol impliquera une variation dans la biodégradation.
- L'activité biologique est inhibée à $\text{pH} < 5,5$.
- Un sol à faible contenu en organique (humus) équivaut à une déficience de substrat organique pour la croissance biologique.
- Lorsque le taux d'humidité tombe en dessous de 10%, il faut humidifier le milieu sinon l'activité biologique s'arrête.
- Le pompage et la réinjection des eaux souterraines requièrent une hydrologie du site qui soit favorable.
- La qualité des eaux souterraines influence fortement l'activité biologique notamment son contenu en oxygène dissout et son pH.

3.0 LES BESOINS POUR LE FUTUR

3.0 LES BESOINS POUR LE FUTUR

Les deux chapitres précédents ont fait ressortir les difficultés rencontrées lorsque l'on veut réhabiliter des terrains contaminés et ont présenté les différentes technologies actuellement disponibles aux Etats-Unis en Europe et au Canada pour détruire, éliminer ou traiter les polluants plutôt que de les enfouir, solution privilégiée jusqu'à présent au Québec.

3.1 Les besoins au plan légal

Tel que mentionné au chapitre 1, il faut combler sans délais le vide juridique observé dans le cas de la gestion des sols contaminés. Le gouvernement du Québec devrait adopter une loi ou un règlement sur les sols contaminés et définir clairement les responsabilités des différents intervenants.

Il faudrait aussi réviser les lois et règlements en vigueur et mettre en place un cadre législatif permettant de s'assurer que ce soit les responsables de la contamination des terrains qui soient aussi ceux qui réaliseront leur restauration et par le fait même en assumeront les coûts. Il s'agit du principe du "pollueur-payeur". Ceci permettrait d'éviter pour l'avenir le problème des sites orphelins qui a pour conséquence de faire payer à l'ensemble de la société la réparation des dégâts causés par des pollueurs peu scrupuleux.

Si l'on veut implanter une politique de gestion intégrée des déchets visant la récupération, le recyclage, la réutilisation et la valorisation des déchets, il faudra aussi modifier la législation actuelle afin de se doter d'une réglementation qui

favorise ce type d'opération. On y définira les objectifs, les critères et les normes à respecter.

Il serait aussi souhaitable que les critères, normes et protocoles sur lesquels reposeront la décision de restaurer les sols et le niveau de décontamination à atteindre soient harmonisés d'un bout à l'autre du pays.

Une révision des critères visant l'identification et la classification des sites orphelins par ordre de priorité permettrait de mieux cerner le problème de la réhabilitation de ces sites contaminés et d'y apporter une solution plus appropriée compte tenu des ressources limitées de la société dans son ensemble pour la restauration de tels sites.

La mise en place d'une législation autorisant la déclassification des sols décontaminés permettrait de solutionner le problème de l'enfouissement de volumes énormes de sols décontaminés alors que les sites d'enfouissement se font de plus en plus rares. La déclassification permettrait aussi de réaliser des économies qui pourraient être substantielles.

3.2 Les besoins au niveau technologique

3.2.1 Caractérisation et niveaux de décontamination des sites

Tel qu'il a été mentionné précédemment, la caractérisation du site est l'opération la plus importante car elle est l'élément sur lequel repose l'évaluation de l'ampleur des travaux de restauration à réaliser et de ce fait des coûts qui y seront associés.

Toute amélioration au niveau des procédures et de la méthodologie utilisée pour la réalisation de la caractérisation du site aura un impact très important sur les coûts de restauration et du suivi de celui-ci.

Lors de l'évaluation de l'ampleur des travaux de décontamination, on est confronté au problème relié au niveau de décontamination qui sera jugé acceptable. Puisqu'il s'agit d'une politique et non d'une réglementation, les décisions sont prises au cas par cas. Cette situation est ambiguë. Dans ces conditions, les propriétaires des terrains contaminés, ne sont guère portés à collaborer avec les représentants du Menviq car ils se sentent impuissants. Ils sont inquiets car ils ne savent pas où les démarches vont aboutir, et quelles en seront les conséquences sur le plan financier. Il ne faut pas oublier qu'en bout de ligne c'est le propriétaire qui paie. Il faut établir un climat de confiance mutuelle et non en arriver à la confrontation.

Les exigences du Menviq doivent être justes, raisonnables, les mêmes pour tous et n'avoir pour unique but que le respect éclairé de l'environnement. Toute clarification relative aux niveaux de décontamination visé est essentiel pour le futur.

L'analyse de risques, telle que mentionnée au chapitre 1, permet de mieux définir et évaluer le niveau de décontamination à atteindre pour assurer la protection de la population. En effet, cette approche tient compte, dans son évaluation, du milieu physique, de la nature des polluants et de l'exposition de la population. Toute recherche ayant pour but le perfectionnement

de cette technique assez complexe et onéreuse devrait être encouragée.

3.2.2 Les technologies

Au chapitre 2, il a été présenté les différentes technologies disponibles actuellement aux Etats-Unis, en Europe et au Canada pour le traitement et l'élimination des contaminants des sols.

Il est souhaitable et essentiel d'améliorer l'efficacité de ces dernières afin de tenter de garantir avec toujours plus de certitude le respect de notre environnement. C'est ce que visent les programmes de recherche et de développement mis sur pied par les compagnies détentrices des technologies. Vu les exigences toujours plus restrictives des agences gouvernementales en matière d'environnement dans les différents pays, les compagnies tentent de mettre au point des technologies de plus en plus performantes mais aussi sécuritaires sur le plan de la performance à long terme.

Il faut aussi préciser que parallèlement à la performance des équipements, la qualité et l'expertise du personnel appelé à opérer ces diverses technologies sont des plus importantes même si ces dernières sont de plus en plus assistées par ordinateur. C'est la qualité de l'opération des équipements qui en garantit la performance et par conséquent, assure la protection de la qualité de notre environnement.

Différentes tendances se dégagent:

3.2.2.1 Les technologies thermiques

Tel que mentionné au chapitre 2, c'est l'incinération qui est, à l'heure actuelle, la méthode thermique de destruction des produits organiques la plus populaire. L'incinération qui se réalise en présence d'air requiert un système de dépollution très efficace pour retenir les particules volantes et traiter les effluents gazeux pour ne pas libérer des produits toxiques dans l'atmosphère. Les coûts du système de dépollution sont souvent plus élevés que ceux de l'incinérateur lui même.

Parmi les différents types d'incinérateurs mis sur le marché pour éliminer les contaminants organiques, c'est l'incinérateur à four rotatif qui est le plus populaire et le plus utilisé de par le monde. Les incinérateurs à scories, tels que Selenco tente d'installer à Senneterre, semblent être de plus en plus considérés.

- les brûleurs à oxygène

Depuis quelques années l'implantation de brûleurs à oxygène dans les incinérateurs est à l'étude. Le volume d'oxygène requis pour l'incinération est de beaucoup inférieur du volume d'air habituellement nécessaire. Les volumes et la vitesse des gaz libérés lors de la combustion sont considérablement réduits, il en est de même pour les particules. La diminution du volume des gaz à traiter avant le rejet dans l'atmosphère conduit à une réduction appréciable des coûts de dépollution des gaz de l'incinération. C'est en 1989 que l'EPA a testé ce type d'incinération dans le cadre de son programme SITE. Des recherches se poursuivent dans ce domaine très prometteur ce qui fait croire

que dans un avenir proche tous les incinérateurs seront dotés de brûleurs à oxygène. Il faut, à ce sujet, rappeler l'intérêt de l'EPA pour les tests de performance de la technologie VESTA à Swann Hills en Alberta.

- la pyrolyse

Les procédés pyrolytiques qui ne requièrent que peu ou pas d'air ont aussi un avenir très prometteur. La diminution du volume des émissions gazeuses abaisse considérablement les coûts de dépollution des gaz. Des recherches sont nécessaires pour mettre au point des systèmes à la fois performants et compétitifs au niveau des coûts. Les procédés pyrolytiques prendront probablement beaucoup d'expansion dans l'avenir.

Cette technique est aussi prometteuse dans le domaine de la récupération, par l'obtention de produits commercialisables, à partir des déchets soumis à la pyrolyse. Les recherches, en cours actuellement, dans ce domaine devraient être encouragées et poursuivies.

- volatilisation à basse température

Ce procédé qui convient pour les composés organiques volatils voit sa performance grandement affectée par la nature du sol. Des recherches visant à solutionner ce problème ainsi que celui de l'utilisation de la technologie pour des composés moins volatils rendraient cette dernière beaucoup plus versatile et attrayante.

- la vitrification

La vitrification est une technologie reconnue mais il demeure des incertitudes, notamment lors des opérations in-situ, concernant les phénomènes se produisant en dessous du niveau d'action des électrodes dans le sol. Des recherches dans ce domaine sont nécessaires mais le développement de cette technologie est prévisible car c'est une solution permanente.

3.2.2.2 Les technologies physico-chimiques

- la neutralisation

La neutralisation est très répandue notamment pour éliminer les problèmes de corrosivité des solutions acides et basiques. Les solutions obtenues contiennent de fortes concentrations en sels dissous que l'on va de plus en plus tenter de récupérer pour éviter le gaspillage des ressources. Cette technologie ne sera plus considérée comme un moyen d'élimination des polluants mais comme une étape dans un processus de récupération. La recherche dans le domaine de la récupération des métaux est essentielle dans le cadre d'une gestion intégrée des déchets visant la diminution des déchets à la source et le recyclage.

- les procédés de stabilisation/solidification

Les procédés de stabilisation/solidification déjà reconnus de par le monde vont se raffiner, se perfectionner afin de les rendre plus efficaces, c'est-à-dire que la lixiviation serait à toute fin pratique considérée comme nulle. A l'heure actuelle on vise de

de plus en plus des solutions permanentes pour la gestion des déchets.

- les techniques d'extraction

Les techniques d'extraction par lavage et lessivage des sols semblaient très prometteuses mais les rendements et la génération de grandes quantités de déchets sous la forme d'eau de lavage ou de solvants contaminés font en sorte que leur application en a été limitée. Le recyclage des liquides extractants est essentiel si l'on veut rentabiliser ce type de technologie. Il faut aussi viser la récupération et non le rejet des produits extraits du sol afin d'obtenir des résultats à 2 niveaux: la décontamination du sol et la récupération des ressources.

- le traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées. Il ne s'agit pas à proprement parler de techniques de décontamination des sols mais la plupart des technologies font face au problème d'eaux usées générées ou présentes lors de leurs opérations. De nouvelles technologies vont émerger dans un avenir proche: l'oxydation supercritique développée par la compagnie Modar Inc. dans les cas simples, l'évaporation avec oxydation catalytique proposée par la Chemical Waste Management Inc. lors de mélange complexe de polluants.

- les technologies de séparation à l'aide de membranes

Les techniques telles l'ultrafiltration, l'osmose inverse, l'électrodialyse etc. reposent sur l'utilisation de filtres ou membranes pour réaliser la séparation des polluants. De

nouvelles matières, filtres ou membranes sont proposées et sont en développement en vue de permettre une séparation plus efficace des contaminants. Des recherches dans ce domaine particulier permettraient de mettre au point des matériaux de plus en plus performants et résistants aux produits chimiques et aux forces physiques tout en étant abordables du point de vue des coûts.

■ les systèmes de dépollution.

Ces équipements sont indispensables pour assurer que les rejets des effluents gazeux dans l'atmosphère respectent les normes édictées par les autorités gouvernementales. Vu les exigences de plus en plus restrictives, ces équipements deviennent de plus en plus sophistiqués et coûteux et par la même occasion plus délicats d'opération. De la recherche visant le perfectionnement et la mise au point d'équipements plus performants, simples d'opération et dotés d'un meilleur rapport bénéfices-coûts est souhaitable. Le développement de systèmes automatisés de contrôle des opérations du système de dépollution permettrait d'avoir un meilleur contrôle de la performance des équipements.

3.2.2.3 Les procédés biologiques

Ces procédés surtout efficaces pour les composés organiques ont un avenir très prometteur relativement à la destruction des polluants. Dans le cadre d'une gestion des déchets visant le recyclage ces procédés biologiques seront surtout intéressants pour finaliser une décontamination après avoir extrait tout ce qui pouvait être récupérable. Les procédés biologiques font l'objet de nombreuses recherches tant sur le plan du développe-

ment de nouvelles souches capables, soit de dégrader des composés organiques élaborés et très stables, soit d'extraire ou concentrer de éléments inorganiques, en vue de leur séparation ultérieure. Des études sur les conditions optimales de croissance et d'action de ces microorganismes sont aussi très importantes.

4.0 CONCLUSIONS

4.0 CONCLUSIONS

La prise de conscience des sociétés au niveau environnemental se poursuivra avec pour conséquence le resserrement des exigences pour la gestion de nos déchets.

A l'heure actuelle, il existe des technologies pour solutionner pratiquement toutes les situations, mais les coûts pour atteindre efficacement et sécuritairement les niveaux de décontamination exigés sont très élevés.

Les technologies de traitement et d'élimination disponibles devraient être perfectionnées, en vue de les rendre non seulement plus efficaces, mais aussi plus rentables sur le plan économique.

Il faut noter que même si on favorise le recyclage, la récupération et la valorisation des déchets, il y aura toujours des déchets à éliminer et à traiter, car toute opération génère par elle-même des déchets.

On devrait encourager l'utilisation de méthodes à solution permanente pour les déchets non récupérables, soit la destruction thermique des composés organiques et la stabilisation ou la vitrification des résidus solides.

Il faut promouvoir la recherche et le développement pour solutionner le problème de contamination à grande échelle des années passées comme les sites orphelins et la contamination de nappes phréatiques.

Les besoins en développement technologiques sont, cependant, davantage requis dans le domaine de la récupération des déchets et de la mise au point de nouveaux procédés propres pour les industries afin de ne plus générer autant de déchets à gérer au présent et dans le futur.

Les technologies de production des industries doivent devenir plus performantes, c'est-à-dire doivent pouvoir produire plus avec moins et générer moins de déchets et surtout moins de déchets dangereux, tout en demeurant compétitives sur le plan financier.

Les technologies de traitement des sols contaminés doivent être simples d'utilisation et adaptables aux particularités des sites à traiter. A cet effet, l'exigence par l'EPA, aux Etats-Unis, d'une étude de faisabilité de l'utilisation de la technologie retenue pour la restauration du site est très intéressante. Elle permet de savoir si la technologie choisie convient aux besoins spécifiques du site et aussi de déterminer les adaptations à y apporter et les coûts afin de pouvoir l'utiliser efficacement.

Vu la complexité de la pollution (organique et inorganique) habituellement rencontrée dans les sols contaminés, il est fort probable que le traitement nécessite non pas l'utilisation d'une mais d'un ensemble de technologies. Les traitements biologiques sont souvent utilisés comme technique de polissage.

Parallèlement à l'évolution du développement technologique, il faut développer et promouvoir l'expertise et la formation du personnel appelé à les opérer.

Une bonne gestion des déchets dangereux et des sols contaminés ne peut se faire que si l'on dispose d'un cadre législatif adéquat, d'où la nécessité de légiférer là où l'on a décelé un vide juridique ou des précisions à apporter.

De nouveaux outils tels l'analyse de risques semblent très prometteurs à long terme. De la recherche dans le domaine de l'analyse de risques permettrait de rendre cette technique plus efficace, plus simple d'application, tout en étant acceptable sur le plan économique.

5.0 BIBLIOGRAPHIE

5.0 BIBLIOGRAPHIE

1. P. Acharya - PCB Trial Burn in a Modular, Movable Incinator. Ensco Environmental Services. APCA meeting in New York, N.Y. 1987, June 21-26.
2. Alberta Special Waste Treatment Centre - Documentation remise par Chem Security Ltd.
3. Anonymes - GE Evaluates Methods for Treating PCB - Contaminated Soil. The Hazardous Waste Consultant. 1-24, January/February 1986.
4. Anonymes - Removing Volatile Organics from Contaminated Soils by In-situ Air-Stripping. The Hazardous Waste Consultant. 1-10, July/August 1986.
5. Anonymes - Efficiency of In-situ Soil Washing Increased by Surfactants. The Hazardous Waste Consultant. 1-27, July/August 1986.
6. Anonymes - Managing Corrosives Wastes: Neutralization, Recovery, Incineration. The Hazardous Waste Consultant. 1-16, July-August 1986.
7. Anonymes - Stabilization: Chemfix Technologies Inc. E.I. Digest 25-30 November 1989.
8. APEG-PLUSTM - Dechlorination of Soils and Sludges. Documentation de la Galson Remediation Corporation.

9. **BABCOCK** - Documentation publicitaire de la compagnie.
10. **Biotrol Treatment Systems** - Documentation publicitaire.
11. **Chemfix** - Documentation publicitaire.
12. **B. Rey de Castro** - Six Burn Technologies Roll Onto Sites. Waste Age. 128, February 1989.
13. **P.R. de Percin** - Description of EPA Site Demonstration of HAZCON Stabilization Process at the Douglassville, Pennsylvania Superfund Site. JAPCA Vol. 39, No. 3, 286, 1989.
14. **Envirocorp Inc.** - Documentation remise par la compagnie.
15. **Environnement Canada** - La gestion des déchets renfermant des BPC. En 40-204/6-1987.
16. **Environnement Canada** - Les déchets dangereux. En 40-204/5-1987.
17. **Environnement Canada** - Inventory of Clean-up Criteria and Methods to Select Criteria, Sept. 1986.
18. **Environnement Canada** - Evaluation des installations mobiles et fixes de destruction des biphényles polychlorés (BPC). SPE 3/HA/5. Mai 1989.
19. **Environnement Canada** - National Guidelines for Decommissioning Industrial Sites, Volumes I et II, juillet 1989.

20. Environnement Canada - Loi canadienne sur la protection de l'Environnement. S.C. 1986, 87, 88, ch. 22.
21. Environnement Canada - Politique d'application. Loi canadienne sur la protection de l'Environnement. 1988. ISBN 0-662-94918-8.
22. EPA - Assessment of Incineration as a Treatment Method for Organic Hazardous Wastes: Summary and conclusions. EPA 230-02-86-002.
23. EPA - Exposure Assessment for Polychlorinated Biphenyls (PCBs), Polychlorinated Dibenzofurans (PCDFs), and Polychlorinated Dibenzodioxins (PCDDs). Released During Transformer Fires. June 1985, prepared by EPA and Versar Inc.
24. EPA - Treatment Technology Briefs. Alternatives to Hazardous Waste Landfills. EPA/600/8-86/017.
25. EPA - PCB Trial Burn Report for the US-EPA Combustion Research. Facility Injection Incinerator System. Project Summary EPA/600/S2-87/-51.
26. EPA - A compendium of Technologies Used in the Treatment of Hazardous Wastes. EPA/625/8-87/014.
27. EPA - Superfund Innovative Technology Evaluation (SITE) Program. HWERL Symposium. May 8-11, 1988.

29. KPA - Assessment of International Technologies for Superfund Applications. EPA/540/2-88/003.
30. KPA - The Superfund Innovative Technology Evaluation Program: Technology Profiles. EPA/540/5-88/003.
31. KPA - Demonstration Bulletin: SITE -
 - EPA/540/MS-88/002 Electric Infrared Incineration Shirco Infrared Systems Inc.
 - EPA/540/M5-89/001 Solidification/Stabilization Process. Hazcon Inc.
 - EPA/540/M5-89/003. In-Situ Vacuum Extraction. Tera Vac Inc.
 - EPA/540/M5-89/004. In-Situ Soil Stabilization. International Waste Technologies.
 - EPA/540/M5-89/006. Organic Extraction Utilizing Solvents. C.F. Systems Corporation.
 - EPA/540/M5-89/008. The Pyretron Oxygen Burner.
 - EPA/540/M5-89/011. Solidification/Stabilization Process. Chemfix Technologies, Inc.
32. KPA - Technology Demonstration Summary:
 - EPA/540/S5-89/001. Technology Evaluation Report. Site Program Demonstration Test, HAZCOM Solidification. Douglassville, Pennsylvania.
 - EPA/540/S5-89/004. International Waste Technologies In-situ. Stabilization/Solidification, Hialeah, Florida.
33. B. Gaboury - Le traitement des sols contaminés au Québec: une solution des années 90. Communication présentée à 11e

33. B. Gaboury - Le traitement des sols contaminés au Québec: une solution des années 90. Communication présentée à 11e Conférence nationale sur la gestion des déchets. Montréal 27 au 29 septembre 1989.
34. M.J. Girovich - Performance of High Temperature Slagging Rotary Kiln Incinerator Air & Waste Management Association 1989.
35. Gouvernement du Canada - Politique fédérale sur l'utilisation des terres..
36. Gouvernement du Québec - Loi sur la qualité de l'Environnement. L.R.Q., chapitre Q-2, janvier 1986.
37. Gouvernement du Québec - Règlement sur les déchets dangereux. Q-2, r.12.1. Décembre 1985.
38. Gouvernement du Québec - Règlement sur les déchets solides. Q-2, r.14. Décembre 1985.
39. Gouvernement du Québec - Politique de gestion intégrée des déchets solides 3e trimestre 1989. ISBN 2-550-20054-3.
40. J. Hansen and V. FiltzPatrick - In-situ Vittrification: Heat and Immobilization are combined for soil remediation. Feature Report. Hazmat World. Dec. 1.
41. LGL Environnement Inc. - Gestion du problème des sols contaminés au Québec. Rapport final soumis à la Commission d'enquête sur les déchets dangereux. Janvier 1990.

42. Ministère de l'Environnement du Québec -

- Politique de réhabilitation des terrains contaminés, ministère de l'Environnement, février 1988.
- Guide standard de caractérisation de terrains contaminés, ministère de l'Environnement, février 1988.
- Procédure pour le choix d'un mode d'intervention sur les sols contaminés. Préliminaire, ministère de l'Environnement, janvier 1989.
- Guide d'implantation et de gestion de lieux d'enfouissement de sols contaminés, ministère de l'Environnement, janvier 1988.
- Les critères de décontamination des sols, ministère de l'Environnement, Michel Beaulieu, 23 avril 1989.
- Mémoire sur l'implantation d'équipements d'élimination des déchets organiques dangereux au Québec. Octobre 1988.
- Orientation du ministère de l'Environnement relative aux projets de biodégradation par épandage et en pile de matières contaminées par des hydrocarbures. Avril 1989..

43. Ogden Environmental Services - Documentation publicitaire de la compagnie.

44. A. Petitpas -

1. Revue des techniques existantes et proposées pour le traitement et l'élimination des déchets dangereux inorganiques et des sols contaminés aux substances inorganiques.

organiques et des sols contaminés aux substances organiques.

Rapports finaux soumis à la Commission d'enquête sur les déchets dangereux. Décembre 1989.

45. Solmar Corporation - Documentation publicitaire de la compagnie.
46. Stablex Canada Inc. - Document publicitaire de la compagnie.
47. G.W. Sudell - EPA Project Summary. Evaluation of the BESTTM Solvent Extraction Sludge Treatment Technology. Twenty-four Hour Test. EPA/600/S2-88/051. Nov. 1988.
48. W.E. Sweet, R.D. Ross and G. Vandervelde - Hazardous Waste Incineration: A Progress Report. JAPCA, Vol. 35, no 2, 38, February 1985.
49. Teatek Inc. - Documentation publicitaire de la compagnie.
50. Thermonic-Décontamination - Documents internes de la Société de Développement industriel de Montréal, Novembre 1989.
51. Transport Canada - Evaluation Report on Mobile Incineration System for Processing Solid Waste at Pearson International Airport, 1988.
52. Tricil Inc. - Documentation publicitaire de la compagnie.

53. Varfalvy, Louis - Evaluation environnementale de destruction de divers déchets liquides et solides contenant des BPC par l'incinérateur de ReChem International Ltd. Pontypool, Gwen, U.K., (Montréal): Hydro-Québec, 1988, 47 p. + Annexes.
54. Vesta - Documents publicitaires de la compagnie.
55. H.O. Wall, R.A. Olexsey and S. Rosenthal - The SITE Demonstration of the Shirco Electric Infrared Incinerator. JAPCA, Vol. 39, no 6, 815, June 1989.
56. Wei-chi Ying, R.R. Bonk, V.J. Lloyd, A. Sojka - Biological Treatment of a Landfill Leachate in Sequencing Batch Reactors. Environmental Progress. Vol. 5, no 1, 41-50, Fév. 1986.