

# Les biotechnologies appliquées au traitement des déchets en Europe et aux Etats Unis

## *Etat de l'Art*



**LES BIOTECHNOLOGIES APPLIQUEES AU TRAITEMENT  
DES DECHETS EN EUROPE ET AUX ETATS-UNIS**

**ETAT DE L'ART**

**RAPPORT FINAL**

**octobre 1992**

**J.-M. LEBEAULT** - Université de Technologie de Compiègne (Europe)  
**M. BERNON** - BERNON Consulting Inc. (Etats-Unis)

Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégialement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :

**RECORD**, Les biotechnologies appliquées au traitement des déchets en Europe et aux Etats-Unis. Etat de l'Art, 1992, 420 p, n°91-0401/1A.

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)  
[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

© RECORD, 1992

Etude RECORD n°91-0401/1A

## TABLE DES MATIERES

	Pages
Introduction	1
La production d'énergie dans les systèmes biologiques	3
Les souches utilisées	18
Les traitements enzymatiques	29
Décontamination microbiologique des sols	36
Traitement des effluents gazeux	68
La méthanisation	97
Le compostage	110
Valorisation des déchets organiques semi-liquides	122
Conclusions et perspectives	141
Les entreprises françaises et étrangères impliquées dans les traitements biologiques des déchets	144

## INTRODUCTION

L'étude réalisée pour le compte de l'Association RECORD se divise en trois grandes parties.

- les principaux axes de recherches et développements des biotechnologies appliquées au traitement des déchets. Cette approche est présentée par M. JAUZEIN de l'Institut de Recherches Hydrologiques

- les biotechnologies appliquées au traitement des déchets aux Etats-Unis, étude présentée par M. BERNON

- les biotechnologies appliquées au traitement des déchets en Europe, étude présentée par l'Université de Technologie de Compiègne - J.M. LEBEAULT et A. PAUSS.

### Dans une première étape

L'étude a été réalisée à partir d'un recensement des entreprises françaises impliquées dans les traitements biologiques des déchets via le Kompass France en utilisant les mots clés suivants

Code :	85-400	Entretien et Nettoyage de Bâtiments et de Locaux
catégorie :	30	travaux dangereux
Code :	85-420	Assainissement, Stérilisation, Désinfection
catégories :	08	entreprises pour la destruction de tous produits chimiques et toxiques
	11	décontamination des sites pollués
Code	85-600	Nettoyage de Conduits et Réservoirs, Traitement des Eaux
catégories :	31	traitement des eaux résiduaires d'usines (entreprises de)
	32	traitement des eaux résiduaires de teintureries (entreprises de)
	36	traitement des eaux de papeteries
	40	traitement des boues (entreprises de)
Code :	85-700	Collecte et Traitement des Ordures et des Déchets Industriels
catégories :	06	entreprises d'enlèvements des déchets industriels
	10	traitement des déchets industriels
	11	traitement des déchets d'hydrocarbures
	20	traitement de boue d'épuration et de déchets organiques

Sur le plan européen, la tenue à Francfort du salon du génie chimique a permis de recenser les entreprises européennes impliquées dans les traitements biologiques de l'air, l'eau, des sites pollués et des déchets.

### **Le rapport est divisé en 10 parties**

La première partie présente les connaissances nécessaires à la compréhension de la mise en oeuvre des microorganismes dans l'élimination des déchets.

La deuxième partie présente les acteurs, microorganismes et enzymes.

La troisième partie présente le traitement des sols.

La quatrième partie, le traitement de l'air.

La cinquième partie, le traitement des eaux industrielles par méthanisation.

La sixième partie, le traitement des déchets par compostage.

La septième partie, la méthanisation des effluents industriels.

La huitième partie présente la valorisation de déchets organiques semi-liquides.

La neuvième partie présente les conclusions et perspectives.

La dixième partie présente les sociétés françaises et étrangères impliquées dans les traitements biologiques de déchets.

## PRODUCTION D'ENERGIE DANS LES SYSTEMES BIOLOGIQUES

"Il existe parmi les microorganismes, et plus particulièrement parmi les bactéries, une remarquable diversité de types physiologiques se différenciant entre eux par la nature des facteurs nutritifs requis, par la nature des substrats métabolisés et par les conditions physico-chimiques compatibles avec leur vie" (Senez).

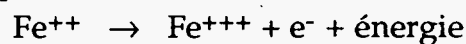
La synthèse de la matière vivante est un processus endothermique nécessitant une source d'énergie.

L'énergie nécessaire aux microorganismes peut être fournie soit par la lumière (organismes phototrophes), soit par l'oxydation de molécules chimiques (organismes chimiotrophes).

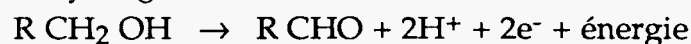
Les organismes phototrophes : la photosynthèse qui permet aux plantes de tirer leur énergie de la lumière, intervient également chez les algues vertes, les Cyanophycées et quelques espèces bactériennes. Les pigments chlorophylliens varient selon la nature de l'organisme phototrophe. Chez les plantes, algues Cyanophycées, la substance donatrice de protons et d'électrons est l'eau ; il y a donc libération de O<sub>2</sub>. Chez les bactéries, il n'y a jamais libération d'oxygène, le donneur de protons peut être un composé minéral comme H<sub>2</sub>S chez les Thiobacteriaceae et les Chlorobacteriaceae (organismes photolithotrophes ou photoautotrophes), ou un composé organique comme l'acide succinique, chez les Athiobacteriaceae (organismes photoorganotrophes ou photohétérotrophes), la plupart des bactéries photosynthétiques peuvent utiliser l'hydrogène moléculaire.

Les organismes chimiotrophes : ils utilisent l'énergie dégagée au cours de réactions chimiques d'oxydation. Les réactions d'oxydation peuvent s'effectuer de différentes façons :

- par perte d'électron :



- par deshydrogénation :



- par hydratation-deshydrogénation :



- par décarboxylation-deshydrogénation :



Seuls certains groupes bactériens organismes chimiolithotrophes peuvent tirer de l'énergie de substances minérales.

$\text{NH}_4^+$	→	$\text{NO}_2^-$	<i>Nitrosomonas</i>
$\text{NO}_2^-$	→	$\text{NO}_3^-$	<i>Nitrobacter</i>
$\text{H}_2\text{S}$	→	S	<i>Beggiatoa</i>
S	→	$\text{SO}_4^{2-}$	<i>Thiobacillus</i>
$\text{H}_2$	→	$\text{H}^+$	<i>Hydrogenomonas</i>
$\text{Fe}^{2+}$	→	$\text{Fe}^{3+}$	<i>Ferrobacillus</i>
$\text{CH}_4$	→	$\text{CO}_2$	<i>Methanomonas</i>
CO	→	$\text{CO}_2$	<i>Hydrogenomonas</i>

Le tableau suivant donne la nomenclature des organismes d'après la source d'énergie utilisée pour la croissance.

A. **PHOTOTROPHES** : énergie procurée par une réaction photo-chimique (chlorophylle).

1° *Photo-lithotrophes* : croissance exigeant l'apport exogène de donateurs d'électrons *minéraux*.

2° *Photo-organotrophes* : croissance exigeant l'apport exogène de donateurs d'électrons *organiques*.

B. **CHIMIOTROPHES** : énergie exclusivement procurée par des réactions d'oxydation chimiques, non-lumineuses.

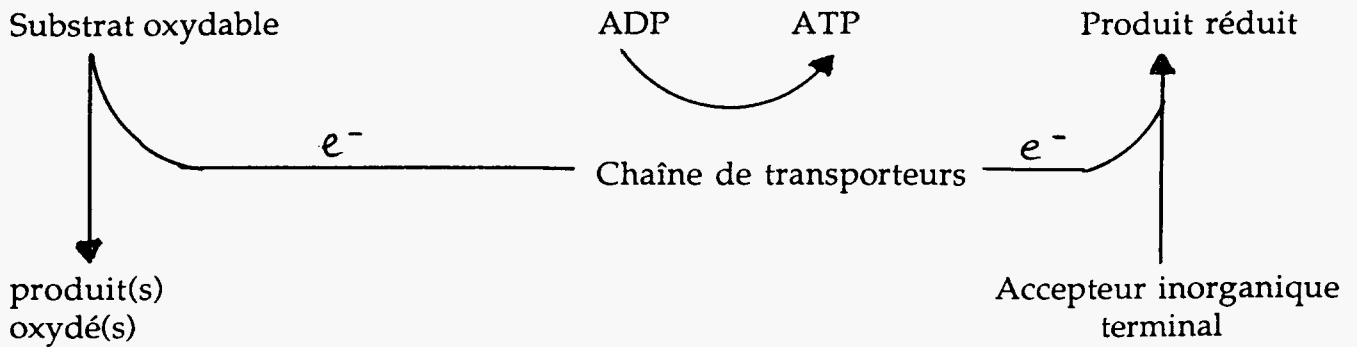
1° *Chimio-lithotrophes* : croissance dépendant de l'oxydation de substances exogènes *minérales*.

2° *Chimio-organotrophes* : croissance dépendant de l'oxydation de substances exogènes *organiques*.

C. **PARATROPHES** : énergie exclusivement fournie par une cellule-hôte



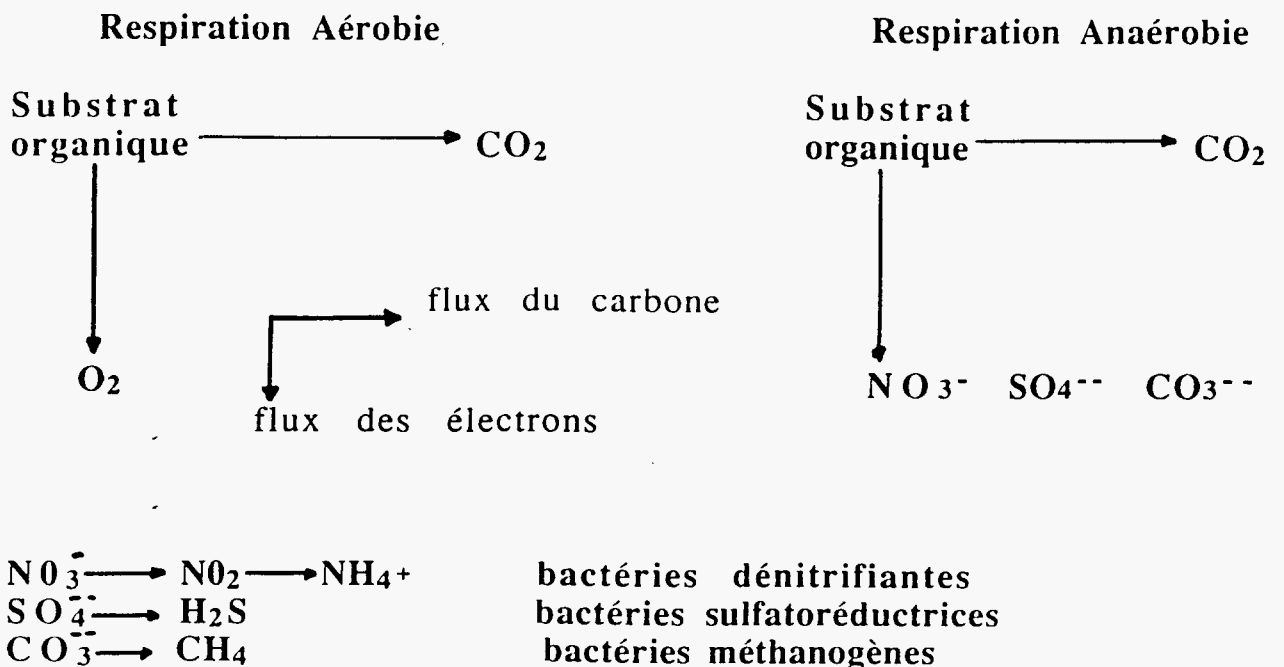
Au cours de la respiration la production d'énergie réalisée par la synthèse de l'ATP à partir de l'ADP se fait principalement en associant avec le transfert d'électrons, provenant d'un substrat oxydables, une chaîne de transporteurs d'électrons liés à un accepteur final minéral.



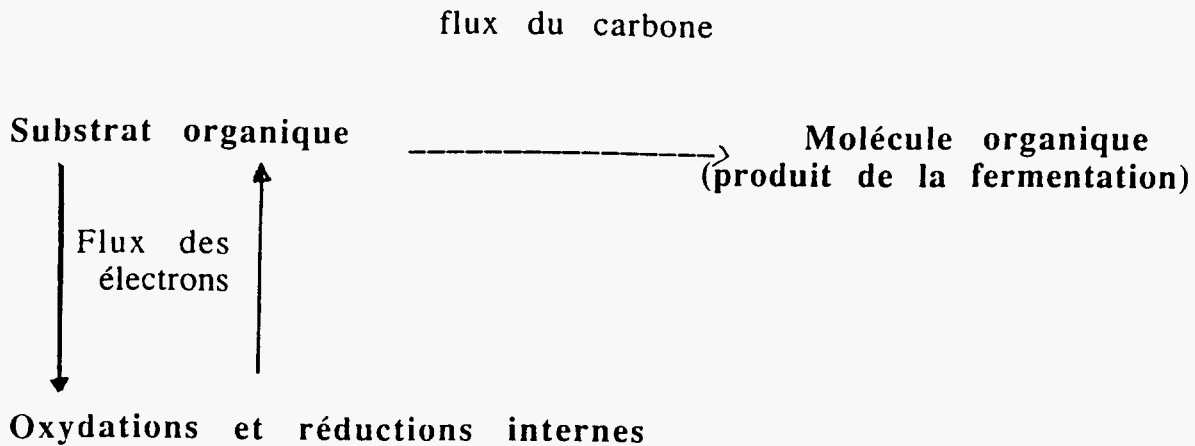
Certains microorganismes effectuent une respiration anaérobie dans laquelle l'accepteur habituel (l'oxygène) est remplacé par un autre composé inorganique réductible en général  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{--}$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ .

La respiration bactérienne doit donc être définie comme "un processus d'oxydo-réduction générateur d'ATP, où le donneur d'électrons est soit organique soit inorganique et l'accepteur d'électrons est inorganique".

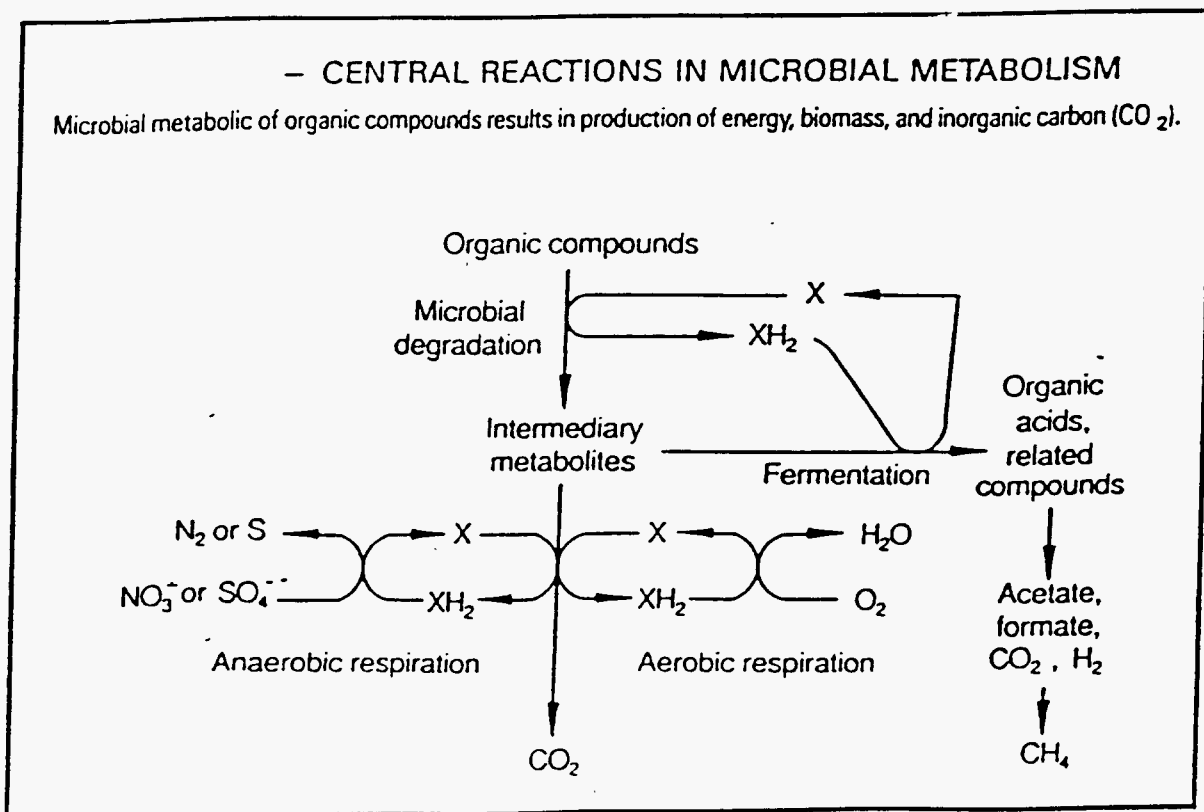
- Les figures suivantes résument les différentes situations.



## FERMENTATION

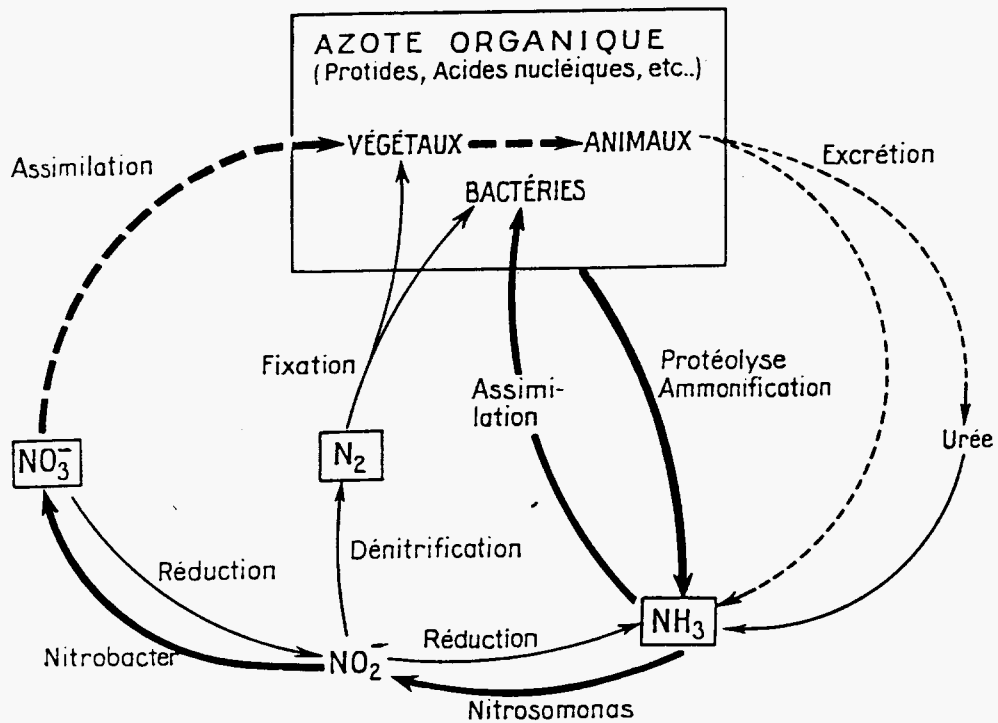


L'intégration des mécanismes producteurs d'énergie dans le métabolisme général est divisé dans le schéma suivant :



Parmi les composés organiques volatils on trouve également des produits azotés, soufrés, il est donc important de connaître les cycles de l'azote et du soufre.

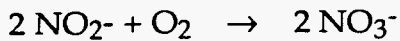
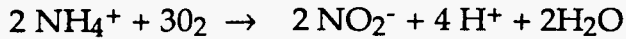
Le cycle de l'azote est décrit dans le schéma suivant :



Les flèches en traits pleins représentent les processus spécifiquement microbiens.

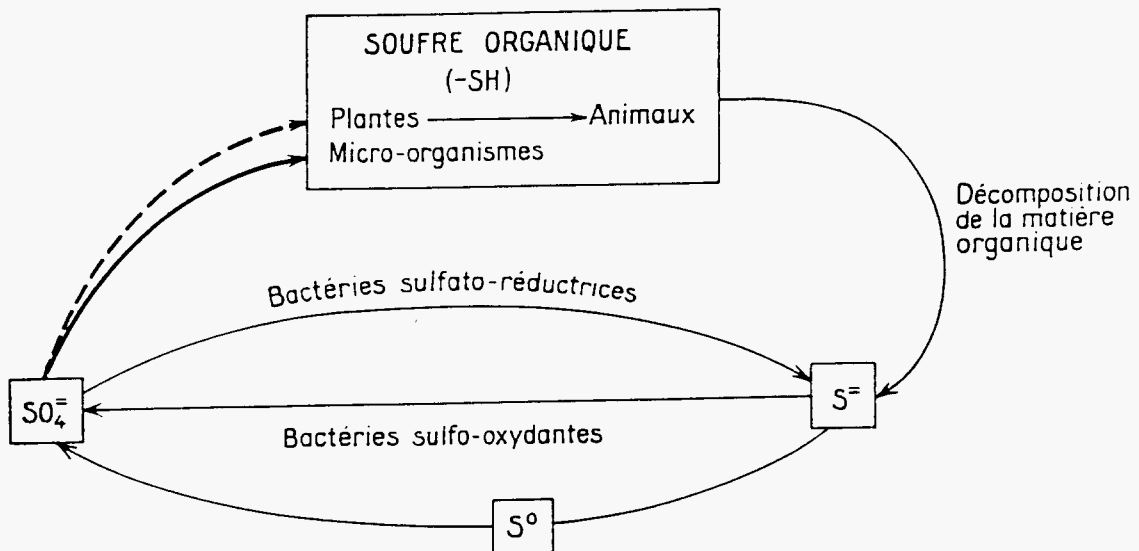
L'azote organique de la matière vivante reminéralisé conduit à la production de  $\text{NH}_4^+$  ; cet azote peut être soit assimilé pour produire de l'azote organique, soit transformé en nitrite, nitrate par nitrification puis en azote.

Les microorganismes actifs sont deux groupes de bactéries aérobies autotrophes dont les représentants les plus importants sont les nitrosomonas et les nitrobacters. L'azote contenu dans les ions ammonium est d'abord oxydé en nitrite puis en nitrate avant d'être transformé en azote.



pour qu'ait lieu cette réaction, la présence de donneur d'hydrogène, c'est-à-dire de substances oxydables est nécessaire.

## LE CYCLE DU SOUFRE



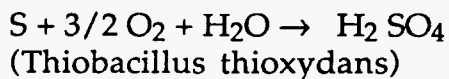
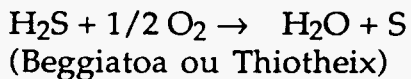
La décomposition de la matière organique par les microorganismes libère le soufre sous forme d'hydrogène sulfuré. Celui-ci peut être directement assimilé par les microorganismes. Cependant le soufre sulfure est rapidement oxydé chimiquement par l'oxygène atmosphérique et biologiquement par une grande variété de bactéries sulfo-oxydantes.

En général c'est donc sous forme oxydée et en particulier sous forme de sulfate que l'on trouve l'élément soufre et c'est sous cette forme qu'il est généralement assimilé.

Ces transformations biologiques du soufre conduisent à un cycle.

L'oxydation du soufre sulfure en sulfate par les bactéries sulfo-oxydantes peut comporter ou non, suivant l'organisme considéré, la formation intermédiaire de soufre élémentaire.

Exemple :



Activités métaboliques des Thiobacilles

Espèces	Substrats	Bilans métaboliques	$\Delta F^{\circ'}_{2980}$ (pH 7) (kilocal. /mole)
<i>T. thioparus</i> et toutes les autres espèces du genre	thiosulfate	$\text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 2,5 \text{O}_2$ $\rightarrow 2 \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}^+$	— 253,6
	sulfures	$\text{SH}_2 + 2 \text{O}_2$ $\rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}^+$	— 186,7
<i>T. thiooxydans</i>	soufre	$\text{S}^0 + 1,5 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $\rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}^+$	— 137,6
<i>T. denitrificans</i>	thiosulfate (anérobiose)	$6 \text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 10 \text{NO}_3^-$ $\rightarrow 12 \text{SO}_4^{2-} + 5 \text{N}_2 + 2 \text{H}^+$	— 188,6
<i>T. thiocyanooxydans</i>	thiocyanate	$\text{CNS}^- + 2 \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$ $\rightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{NH}_4^+ + \text{CO}_2$	— 220,0
<i>T. ferrooxydans</i>	fer-ferreux	$\text{Fe}^{++} + \text{H}^+ + 0,25 \text{O}_2$ $\rightarrow \text{Fe}^{+++} + 0,5 \text{H}_2\text{O}$	— 10,9

## LES BACTERIES SULFATO REDUCTRICES

Les bactéries sulfato réductrices sont ubiquitaires et toujours présentes en nombre plus ou moins important dans le sol, les sédiments marins, et l'eau douce.

Lorsqu'elles trouvent des conditions favorables c'est-à-dire un milieu anérobie contenant des sulfates et un substrat, elles peuvent produire des quantités considérable d' $H_2S$  dont elles tolèrent elles-mêmes des concentrations allant jusqu'à plusieurs grammes par litre, mais qui est par contre extrêmement toxique à l'égard de la plupart des autres bactéries.

L'activité des bactéries sulfo-oxydantes elles aussi ubiquitaires protègent la faune et la flore contre l' $H_2S$  formé en le métabolisant.

La transformation du  $SO_4^-$  en  $H_2S$  est donnée à titre d'exemple pour desulfovibrio.

### *Bilans métaboliques et énergétiques de la réduction du sulfate par Desulfovibrio.*

Substrat		$\Delta F'^{\circ}$ (pH 7) (kilocalories)
pyruvate	$CH_3-CO-COOH + H_2O \rightarrow CH_3-COOH + CO_2 + 2 H$	— 32,2
	$2 H + 0,25 SO_4 = \rightarrow 0,25 S = + H_2O$	+ 9,5
	<i>somme :</i> pyruvate + 0,25 sulfate $\rightarrow$ acétate + $CO_2$ + 0,25 $H_2S$	— 22,7
lactate	$CH_3-CHOH-COOH + H_2O \rightarrow CH_3-COOH + CO_2 + 4H$	— 41,9
	$4 H + 0,5 SO_4 = \rightarrow 0,5 S = + 2 H_2O$	+ 19,0
	<i>somme :</i> lactate + 0,5 sulfate $\rightarrow$ acétate + $CO_2$ + 0,5 $H_2S$ + $H_2O$	— 22,9
hydrogène	$H_2 \rightarrow 2 H$	— 18,9
	$2 H + 0,25 SO_4 = \rightarrow 0,25 S = + H_2O$	+ 9,5
	<i>somme :</i> hydrogène $\rightarrow$ 0,25 $H_2S$ + $H_2O$	— 9,4

Les groupes physiologiques des bactéries chimiolithotrophes sont donnés dans le tableau suivant :

A. Groupes utilisant l'O<sub>2</sub> comme accepteur terminal

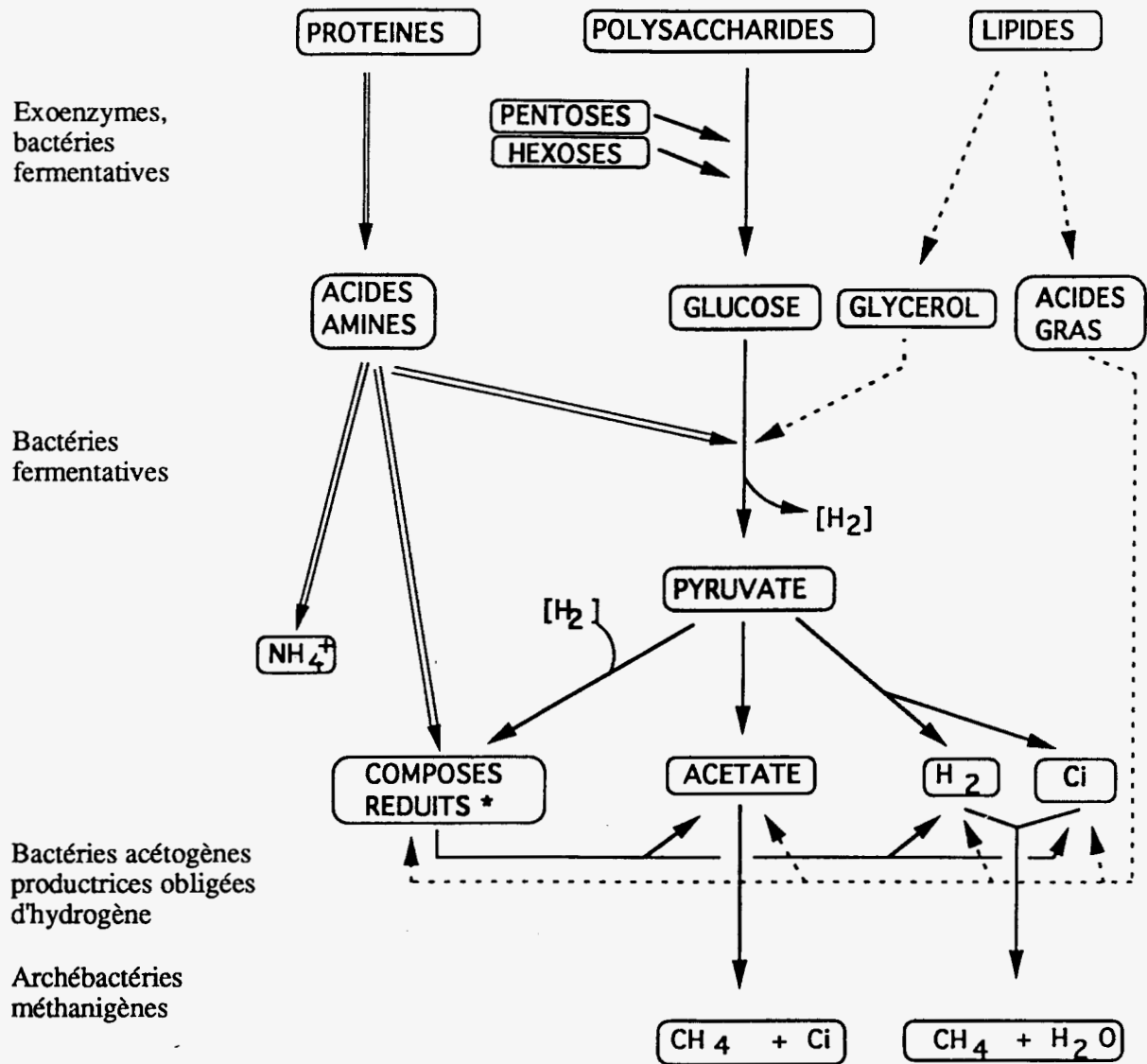
Nom du groupe physiologique	Noms génériques	Oxydation(s) effectuée(s)	Hétérotrophie facultative
Bactéries oxydant l'hydrogène	autrefois placées dans un genre <i>Hydrogenomonas</i> mais actuellement dans les genres : <i>Pseudomonas</i> <i>Alcaligenes Paracoccus</i>	H <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O	Universelle : un grand nombre de substrats organiques utilisables
Bactéries oxydant l'ammoniac	<i>Nitrosomonas</i> <i>Nitrosolobus</i> <i>Nitrosocystis</i> , etc.	NH <sub>3</sub> → NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Rare et restreinte, ou absente
Bactéries oxydant le nitrite	<i>Nitrobacter</i> <i>Nitrococcus</i> , etc.	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> → NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Rare et restreinte, ou absente
Bactéries oxydant le soufre et ses dérivés (Sulfobactéries)	<i>Thiobacillus</i> , <i>Beggiatoa</i> , <i>Thiothrix</i>	$\left. \begin{array}{l} \text{H}_2\text{S} \\ \text{S} \\ \text{S}_2\text{O}_3 \end{array} \right\} \rightarrow \text{SO}_4^=$	Variable à l'intérieur du groupe
Bactéries oxydant le fer (Ferro-bactéries)	<i>Thiobacillus ferroxidans</i> <i>Gallionella</i>	Fe <sup>++</sup> → Fe <sup>+++</sup>	Absente

B. Lithotrophes anaérobies strictes

Bactéries oxydant l'hydrogène et produisant du méthane	<i>Methanobacterium</i> <i>Methanococcus</i> , <i>Methanosarcina</i>	H <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O couplé avec CO <sub>2</sub> → CH <sub>4</sub>	Variable, mais les substrats organiques utilisables sont peu nombreux (acétate, composés à 1 C)
--	--	---	---

## METHANISATION

Compte tenu de l'importance de la méthanisation dans les dégradations anaérobies des déchets, il est bon d'en rappeler le mécanisme.



\* Acides propionique, lactique, butyrique & valérique, éthanol



## COUPLAGE ENERGETIQUE

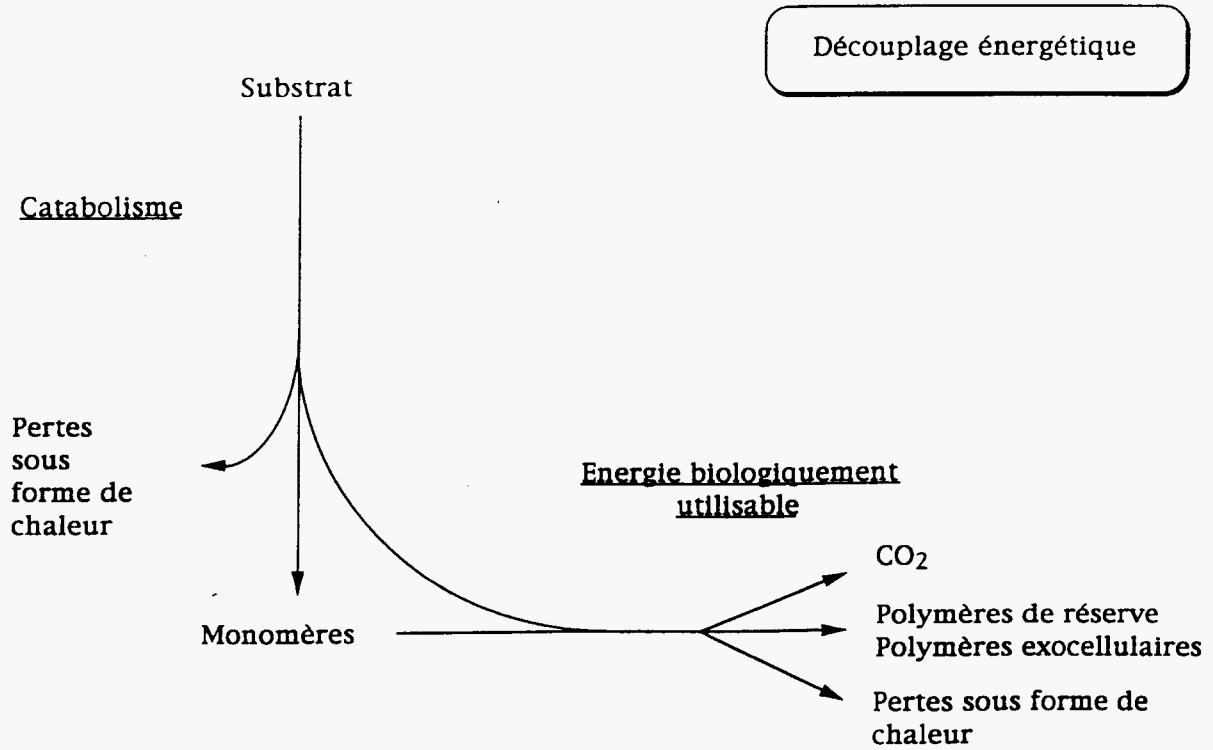
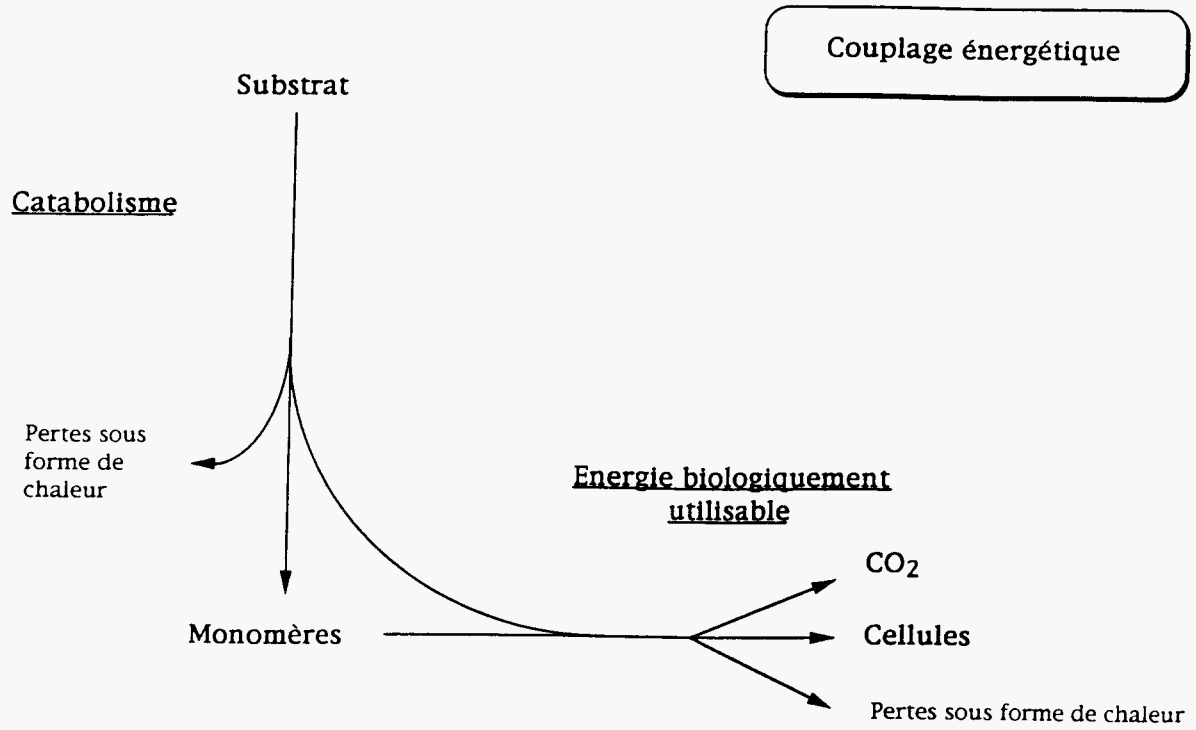
Du point de vue énergétique, un organisme en croissance est un système dans lequel l'énergie produite par les réactions cataboliques (liées à la dégradation d'un substrat) est transférée à la chaîne des réactions anaboliques (synthèses des molécules et macromolécules cellulaires).

Conformément au second principe de la thermodynamique une partie seulement de l'énergie produite par les réactions cataboliques est utilisable une partie étant perdue sous forme de chaleur.

Lorsque l'on recherche une bonne croissance microbienne, on s'efforce de travailler dans des conditions de "couplage énergétique" optimales, il faudra donc satisfaire les demandes de la cellule en chacun de ses constituants. La cellule est peut être un des meilleurs exemples de travail à "flux tendu".

Il existe cependant des conditions dans lesquelles se produit un découplage énergétique, il suffit de carencer le milieu en tel ou tel substrat azote, phosphate, ou autres minéraux pour que la cellule se mette à oxyder le substrat et à le minéraliser avec pour seul profit la production d'énergie ou à l'accumulation de macromolécules.

Les situations de couplage et découplage énergétique sont décrites dans les schémas suivants :



Le découplage énergétique correspond à une minéralisation accélérée du substrat avec une production minimale de biomasse.

On comprendra ainsi que :

- si l'on veut obtenir une "biomasse" importante dans un réacteur, il faudra apporter tous les éléments nécessaires à la cellule. Il y a croissance des cellules et en même temps oxydation des substrats pour produire l'énergie nécessaire ;

- l'on peut travailler également dans des conditions, carencées en substrats minéraux, qui conduisent à la minéralisation des substrats.

L'art du traitement consistera donc à optimiser la vitesse et le rendement de la minéralisation du substrat en minimisant la production de biomasse, qui devra elle même être traitée par la suite.

**COMPOSITION DE LA "BIOMASSE" ( $C_{\alpha}H_{\beta} O_{\gamma} N_{\theta}$ ) cendres  
(% du poids sec)**

	<b>Bactéries</b>	<b>Levures</b>	<b>Champignons</b>
Carbone	46-52	46-52	45-55
Azote	10-14	6-8,5	04,7
Hydrogène	7-9	7-9	7-9
Oxygène	28-32	28-32	28-32
Cendres	4-10	4-10	4-10
Phosphore	2-3	0,4-4,5	0,8-2,6
Soufre	0,2-1	0,1-0,5	0,01-0,24
Potassium	1,0-4,5	0,2-2,5	1,0-4,0
Magnésium	0,1-0,5	0,1-0,3	0,1-0,5
Sodium	0,5-1,0	0,02-0,5	0,01-0,1
Calcium	0,01-1,1	0,1-1,4	0,1-0,3
Fer	0,02-0,2	0,1-0,2	0,01-0,5

(Cuivre, Manganèse, Molybdène ....pour mémoire)

La résistance à la biodégradation peut avoir des causes chimiques physico-chimiques liées aux propriétés de la molécule, des causes environnementales ou biologiques.

## MOLECULES RECALCITRANTES A LA BIODEGRADATION

### Causes chimiques

- poids moléculaire, structure, charge,
- nature, nombre, position des substituants

### Causes physico-chimiques

- solubilité
- aptitude à former ou non des émulsions
- état physique inadapté (solide liquide gazeux)
- aptitude à s'adsorber sur des surfaces
- aptitude à former des liaisons ioniques ou covalentes avec les supports

### Causes environnementales

- concentration trop faible, trop grande, trop variable
- température, pH, Aw, potentiel redox, force ionique non adaptés
- absence de nutriments
- absence de co-substrats
- présence d'inhibiteurs

### Causes biologiques

- absence de la flore appropriée
- absence d'enzymes exocellulaires ou d'agents émulsifiants
- incapacité des microorganismes à métaboliser le produit en l'état par suite :
  - . impossibilité d'induire les enzymes
  - . impossibilité d'induire les systèmes transporteurs
  - . production d'intermédiaires métaboliques terminaux toxiques

Les effets et la nature des substituants sur la biodégradabilité sont donnés dans le tableau suivant :

### INFLUENCE DE LA STRUCTURE SUR LA BIODEGRADABILITE

Type de composés ou substituants	Plus facilement dégradable	Moins facilement dégradable
Hydrocarbures	Alcanes à faible masse moléculaire (<C12) Alcanes linéaires Hydrocarbures paraffiniques Structures mono et bicycliques	Alcanes à forte masse moléculaire Alcanes ramifiés Hydrocarbures aromatiques Structures polycycliques
Substituants	- OH - COOH - NH <sub>2</sub> - OCH <sub>3</sub>	- F - Cl - NO <sub>2</sub> - CF <sub>3</sub> - SO <sub>3</sub> H
Hydrocarbures aliphatiques chlorés	- Cl branché à plus de 6 atomes de carbone à partir carbone terminal	- Cl branché à 6 atomes de carbone ou moins du carbone terminal

## LES SOUCHES

Sur le plan biochimique la majorité des souches utilisées dans le traitement des déchets et la biodégradation, sont chimiotrophes et souvent chimio-organotrophes.

Sur le plan cinétique les souches sont caractérisées

- par le taux de croissance  $\mu$  ( $\text{h}^{-1}$ )
- par la constante d'affinité des cellules pour le substrat  $K_s$  ( $\text{mg l}^{-1}$ )
- par le rendement de croissance  $Y_{x/s}$  (biomasse produite par gramme de substrat consommé)
- par l'énergie de maintenance  $m$  (gramme de substrat consommé par gramme de cellule et par heure).
- par  $Y_G$  rendement de croissance

$$\frac{1}{Y_{x/s}} = \frac{1}{Y_G} + \frac{m}{\mu}$$

- par la vitesse de spécifique de consommation de substrat (gramme de substrat métabolisé par gramme de cellules et par heure).

Deux types de populations peuvent survivent :

- . Les souches à taux de croissance élevé  $\mu$
- . les souches à forte affinité pour le substrat.

Les techniques de conduite de réacteur permettent de mettre à profit l'une ou l'autre des populations.

Le problème le plus souvent posé est le suivant : faut-il utiliser les souches déjà présentes sur le site ou apporter des souches qui auront été sélectionnées dans un autre environnement ?

Il est difficile de répondre à cette question et la réponse dépend largement du type de traitement envisagé.

Dès l'instant où le processus de biodégradation fait appel dans une étape d'une "biodégradation en réacteur", le plus souvent ce réacteur estensemencé. Il peut êtreensemencé à partir de boues de station d'épuration ou de souches sélectionnées pour leur aptitude à biodégrader les molécules considérées. Le choix dépendra des critères d'épuration retenus.

Il existe un marché de souches spécifiques sauvages ou mutantes. Souvent, le mélange de souches est additionné d'éléments nutritifs spécifiques et d'enzymes aidant à la biodégradation.

D'une façon générale, tant que l'on conservera l'habitude de mélanger les "différents substrats" avant de les biodégrader, tant que l'on analysera l'efficacité de la biodégradation en termes de DB05 ou de DCO, l'utilisation de souches sélectionnées perd de son intérêt, la sélection basée sur la spécialisation des boues activées est suffisante, par contre dès l'instant où l'on cherchera à déterminer la présence ou non d'une molécule spécifique dans un rejet alors il faudra envisager un traitement en amont de la station d'épuration dans des bioréacteurs avec des souches spécifiques dégradant le substrat considéré.

Les traitements en bioréacteur contrôlé conduiront à l'utilisation de souches spécifiques.

Les traitements sur le site de pollution, marée noire, biodégradation des composés toxiques dans le sol impliqueront le plus souvent un simple apport de nutriments.

Quoiqu'il en soit on peut aujourd'hui se procurer des "souches" additionnées ou non de nutriments, spécialisées dans la biodégradation des composés spécifiques.

Des exemples de fournisseurs sont donnés en annexe.

L'évolution des normes appliquées aux eaux usées industrielles conduit à envisager le traitement des composés récalcitrants en amont, de la station d'épuration, directement à la sortie des ateliers.

Dans ces conditions le traitement de ces composés récalcitrants peut se faire en réacteur contrôlé avec des cultures microbiennes mixtes adaptées aux polluants à traiter.

Les applications sont encore rares. Cependant, des références existent en particulier pour :

- traitement des s-triazines  
Hogrefe et al - Conservat Recyl, 1985, 8-85-90
- traitement du manométhylsulfate  
Ghisalba O - Experienta, 1983, 39-1247-57
- d'ammonium quaternain alkylé  
Ghisalba O and Küenzi M - Experienta, 1983, 39-1257-63
- de la morpholine  
Penaud F, Nonus M, Barat M and Lebeault J.M. - Récents Progrès en Génie des Procédés, 1991, 5, 1-4

Cette expérience a été réalisée en collaboration entre la société ORIL de BOLBEC et l'Université de Technologie de Compiègne, et a conduit à la réalisation d'une installation industrielle.

Si de tels traitements se font aujourd'hui avec des cultures mixtes, il est important pour l'avenir d'évaluer les souches multipotentes qui pourraient être construites à partir des souches constitutives de la culture mixte.

L'utilisation de souches améliorées génétiquement par mutation ou transfert de gènes est déjà pratiquée par la production de métabolites. D'autres utilisations particulièrement dans la biodégradation des composés xénobiotiques peuvent être envisagées. De telles souches ont déjà été construites et utilisées en laboratoire, leur dissémination pose des problèmes qui dépassent le cadre de cette étude.

De nombreux gènes dégradatifs clonés dans différents vecteurs génétiques phages, plasmides ou cosmides existent. Ces fragments génomiques clonés peuvent servir de sondes pour le repérage dans l'environnement, par hybridation moléculaire, de gènes homologues, portés par d'autres souches. Avec d'autres plasmides conjugatifs, à spectre d'hôte large, ils sont utilisables pour le transfert de gènes entre souches et donc pour l'amélioration de souches bactériennes, par modification de voies métaboliques. Ces techniques sont susceptibles de donner rapidement une indication sur les capacités génétiques de certaines souches, elles peuvent aussi aider, au départ des recherches, au repérage de souches possédant l'information génétique souhaitée.

Un autre volet de la caractérisation génétique des souches est la recherche de plasmides dans les souches isolées ainsi que l'expression génomique ou plasmidique des gènes impliqués dans les voies métaboliques. La présence de plasmides dans des souches nouvellement isolées, et la preuve de leur implication dans les voies étudiées, seraient d'un grand intérêt pour faciliter l'étude et les remaniements des gènes.

La liste des sociétés proposant des souches est donnée dans les annexes suivantes.





## BIOTECHNOLOGIE POUR LES REJETS INDUSTRIELS

TBA propose des bactéries mutantes spécialisées pour dégrader des substrats de rejets chimiques considérés comme non biodégradables.

Cette nouvelle gamme de cultures bactériennes à haute résistance aux produits chimiques, permettra de résoudre les problèmes de surcharge des stations d'épuration et réduira considérablement l'oxygénation du traitement aérobie.

Utilisées seules ou combinées à notre programme existant, ces nouvelles bactéries permettront un rendement maximum d'épuration de la station tout en réduisant les frais d'exploitation.

Capables de dégrader de très forte concentration de produits chimiques tels que : phénol, crésol, benzène, hydrocarbure, solvants chlorés, huiles solubles, lignine, dérivés soufrés, tensio actifs non ioniques, anioniques et même cationiques, cyanate et dérivés cyanurés.

Ces bactéries permettront ainsi de résoudre dans les quelques jours les problèmes jusqu'ici restés insolubles, d'engorgement dans les stations d'épuration.

---

études laboratoire  
assistance technique en atelier, sur chantiers

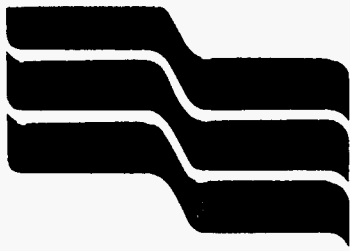
---

# Les Produits BIOLÉN

**Département Biotechnologie :**

**27950 SAINT-MARCEL - Téléphone : 32.21.13.60 - Télécopie : 32.51.43.24**

Effluents industriels		Types d'industries
BIOLÉN IC 10	Hydrocarbures halogénés, hydrocarbures aromatiques, styrène, dichloro-éthane, crésols, formaldéhyde, acides organiques...	Industries chimiques.
BIOLÉN IP 20	Phénols et dérivés.	Raffineries de pétrole Industries Chimiques Cokeries.
BIOLÉN IG 30	Huiles, graisses, hydrocarbures naphténiqes, styrène.	Industries agro-alimentaires Industries pétrochimiques.
BIOLÉN IT 40	Tensio-actifs non ioniques, anioniques, cationiques.	Industries chimiques Industries textiles Industries pétrochimiques.
BIOLÉN IL 50	Résidus riches en cellulose. Décoloration des eaux résiduaires issues du procédé Kraft.	Papeteries Industries agro-alimentaires
BIOLÉN IC 60	Hydrocarbures chlorés.	Industries électroniques Centrales électriques.
BIOLÉN IP 70	Hydrocarbures chlorés - Dérivés phénoliques.	Industries de traitement du bois
BIOLÉN IS 80	Dérivés organo-soufrés. Huiles - graisses	Abattoirs -Tanneries - Laiteries Industries chimiques.
BIOLÉN IC 90	Cyanures et dérivés.	Industries chimiques - Sidérurgie.
BIOLÉN IH 95	Traitement des eaux à basse température. Nombreux composants chimiques : détergents, émulsifiants, hydrocarbures...	Industries chimiques Industries textiles.
BIOLÉN IN 100	Nitrification Élimination de l'azote	Industries agro-alimentaires Industries chimiques et pétrochimiques.
<b>EFFLUENTS MUNICIPAUX</b>		
BIOLÉN M 110	Graisses - Mauvaises odeurs Réduction des coûts d'entretien.	Stations municipales Fosses à graisses - Canalisations
BIOLÉN M 111	Excès de graisses et de sulfures dans les canalisations	Traitement en ligne.
BIOLÉN M 112	Réduction de la DBO 5 et DCO. Dégradation des mousses, des huiles et des graisses.	Stations municipales.
BIOLÉN M 113	Traitement des effluents industriels les plus courants.	Stations municipales recevant des effluents industriels. Efficacité à basse température.
<b>DIVERS</b>		
BIOLÉN ACTIVE	Activateur biologique des stations d'épuration.	Tous types d'effluents.
BIOLÉN ELARHYD	Amélioration de la décanation des boues. Diminution des odeurs. Ensemencement bactérien et activation de la biomasse naturelle. Traitement des pollutions des vases organiques et mauvaises odeurs. Lutte contre les phénomènes d'eutrophisation.	Stations d'épuration. Tous types d'industrie Plans d'eau, canaux, rivières Lagunes industrielles.
BIOLÉN BIOPACK	Élimination des graisses et mauvaises odeurs. Apporte un ensemencement renforcé dans les cas difficiles.	Collecteurs d'égoûts Bacs à graisse
BIOLÉN PE 1106	Dégradation des hydrocarbures	Soils pollués.
<b>AGRICULTURE - ELEVAGE</b>		
BIOLÉN DC BIOLÉN PRO	Traitement des lisiers, des litières - Fabrication de compost	Activités agricoles et para-agricoles.
BIOLÉN AQUAFARM	Élimination de l'azote et de la pollution carbonée	Aquaculture



# ERI "Biotechnology in Action"® ENVIRONMENTAL REMEDIATION, INC.

## MICROBE MASTERS®, INC. ADAPTED BACTERIAL PRODUCTS

Microbe Masters, Inc., an affiliate of Environmental Remediation, Inc., specializes in the development of adapted bacterial cultures for use in wastewater treatment and hazardous waste remediation. The adapted bacteria used in Microbe Masters, Inc. products are not genetically engineered, and have been subjected to stringent antibiotic testing. These bacteria have been chosen for their ability to enhance biodegradation of common industrial wastewater and contaminants frequently found in hazardous waste.



*Fermentation Unit for Culture Manufacturing*

## BLENDED BACTERIAL PRODUCTS

Microbe Masters, Inc. products are blends of bacterial cultures specially selected for their ability to address specific problems common to various industrial wastewaters. Products are available for treatment of waste streams associated with petrochemical, resin and textile chemicals industries; refining; pulp and paper production; food processing; wine production; poultry processing; creosote applications; and municipal waste stream treatment. Land treatment products are available containing necessary nutrients and surfactants to speed biodegradation. Microbe Masters, Inc. can also provide applications and engineering assistance for the use of these products for bioaugmentation and suggestions for improving operation of wastewater treatment systems to optimize biological degradation of wastes.



*Dry Commercial Bacteria*

## IMMOBILIZED BACTERIA

Immobilized bacterial cultures are available for the treatment of source streams, contaminated ground water and strong wastes. These products contain organisms which have been immobilized on diatomaceous earth medium. Each bead provides several square meters of surface area which has been colonized by the introduced bacteria. Most immobilized culture products contain large numbers of highly purified organisms which have been specially isolated for their ability to degrade specific chemicals.

## SPECIAL CULTURES

Services are available for the isolation and development of bacterial cultures specific to problem constituents of waste streams. These services may also be used to isolate and strengthen organisms selected from sites targeted for biological remediation. Cultures developed during these activities can be grown in Microbe Masters, Inc. manufacturing facilities as liquid products or on dry carriers for application in hazardous waste closures. Additionally, these organisms can be provided on immobilized carriers for use with this technology.

## MICROBE MASTERS<sup>®</sup>, INC. BACTERIAL PRODUCTS

### HAZARDOUS WASTE REMEDIATION

Micro Pro <sup>®</sup> "Super Cee"	PCP, Polynuclear Aromatics, creosote constituents
Micro Pro <sup>®</sup> "NOW BAC"	Weathered oily waste, paraffins, nonhazardous oilfield waste
Micro Pro <sup>®</sup> Detoxifier Series	Soil applications, specially formulated

### INDUSTRIAL APPLICATIONS

Micro Pro <sup>®</sup> "A"	Cyanates, specific phenols
Micro Pro <sup>®</sup> "D"	Phenol, hydrogen sulfide, solvents, chlorinated hydrocarbons
Micro Pro <sup>®</sup> "DP"	Black liquor, tall oil, pine soaps, starch, cellulose
Micro Pro <sup>®</sup> "E"	Ammonia removal (nitrification)
Micro Pro <sup>®</sup> "F"	Detergents, ethoxylated hydrocarbons, non-ionic and cationic surfactants
Micro Pro <sup>®</sup> "G"	Refinery oil and grease, animal fats and grease, naphthalene, polynuclear aromatics
Micro Pro <sup>®</sup> "H"	Enhances biodegradation in cold weather

The above is only a partial list of the products Microbe Masters has available. For more information regarding these and other products please write or call:

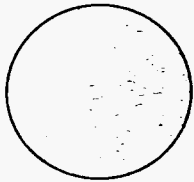


For more information please contact:

Environmental Remediation, Inc.  
 P.O. Box 45212-210  
 Baton Rouge, LA 70895  
 (504) 665-1903

# The correct Advanced Bio Culture formulation for your specific need.

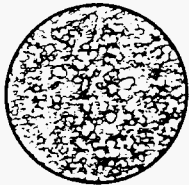
Solmar's economical "off-the-shelf" bioremediation formulations are ready for immediate delivery.



**AN-106** Improves the performance of anaerobic systems.

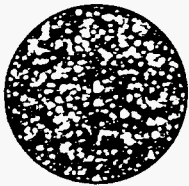
Aids digestion to eliminate bothersome organics in septic systems, Imhoff tanks, digesters and anaerobic lagoons. Restores percolation in leach

fields and seepage pits. Reduces sludge volumes and controls odors. Is particularly effective with anaerobic treatment of domestic wastes containing heavy amounts of salad oils, detergents and grease.



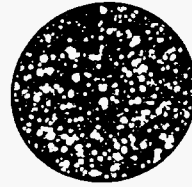
**C-102** Treats high concentrations of carbohydrates, starch wastes and aliphatic chemical wastes such as acrylics, vinyl acetates and a variety of solvents. Beneficial to canning companies, soft-drink bottlers, manu-

facturers of corn products, starches, glue products, and chemicals. Particularly effective in enhancing settleability.



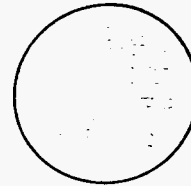
**I-107** The most versatile of Solmar's formulations. Consumes many of the components found in industrial wastestreams.

Treats product waste containing detergents, various petroleum and petrochemical derivatives, as well as protein and lipid structures. Treats pulp, paper and forest products in wastewaters and allows users to comply with waste regulations even during winter months.



**L-103** Treats wastewater with a very high lipid content, such as animal, fish and vegetable oils.

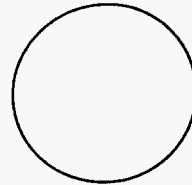
Improves performance of wastewater-treatment systems such as lagoons, activated sludge systems, trickling filters and oxidation ditches. Degrades gasolene, kerosene, diesel, and many lightweight mineral oils and many petrochemical products.



**L-104** Combats heavy tars, oils, coal tars, and organic sludges in wastestreams, tanks and landfills. Particularly effective in degrading diesel fuel, bunker oil and crude oil. Treats wastes containing phenols

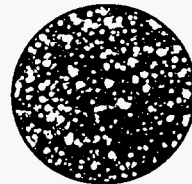
and other aromatic chemical structures.

Degrades diverse organics (including coke waste and wood preservative wastes (such as creosote and pentachlorophenol) associated with railroad tie and telephone facilities, refinery bottoms and asphaltics.



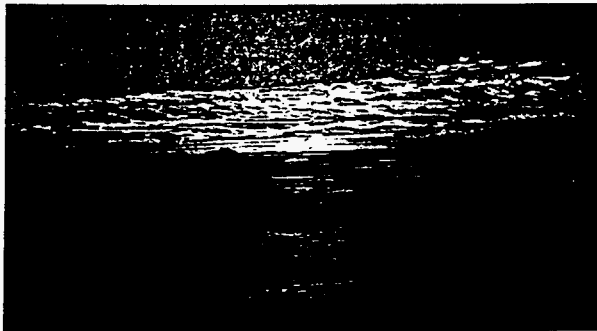
**M-101** Designed for applications in sewage-treatment plants and collection lines. Product of choice for municipal wastewater treatment.

Has capability of handling a wide array of wastes including heavy metal wastes, paint, oil, grease, sludge loadings, cosmetics, salad oils and petroleum derivatives and other incoming industrial wastes. Controls malodors and hydrogen sulfide emissions. Improves treatment efficiency while lowering sludge volume. Effective in pre-treatment and in-line treatment of wastes.



**P-105** Treats industrial wastewater with exceptionally high protein, fat and fat contents. Processes high-protein wastes generated by dairy processing and meat packing and processing companies.

Decomposes nitrogenous compounds generated by petrochemical firms. Forms excellent flocs.



Solmar—working with you for a cleaner world.

## Insist on Solmar. It's the natural choice.



SOLMAR CORP.

625 West Katella Avenue • Suite 5 • Orange • California • 92667 • 714-538-0881

© Copyright, 1989 Solmar Corp. Printed in U.S.A.

# les Biotechnologies appliquées

## I. LES PRODUITS ET LES DOMAINES D'APPLICATION

CODABIO est une société associée à TBA spécialisée dans la fabrication de produits biologiques destinés à la dépollution.

Les principaux domaines d'application sont :

- Lacs- lagunes- rivières
- Sols pollués, nappes phréatiques (produits toxiques)
- Eaux usées industrielles
- Réseaux et canalisations
- Nettoyage des surfaces souillées

## II- LES TECHNIQUES PARTICULIERES

Dans chaque secteur CODABIO a mis au point de nombreux process d'applications qui rendent très souvent spécifiques des modes d'emploi validés avec le concours des partenaires concernés : industriels, prestataires de service, organismes de contrôle.

A titre d'exemple au niveau des sols :

- Traitement des surfaces
- Land- farming
- Injection- recyclage- filtration BIO
- Injection in situ combiné H2O O2 Souches Nutriments

## III- LA COOPERATION EN MATIERE DE DEPOLLUTION DE SOLS

- La configuration géographique " propre à l'environnement " implique pratiquement des études au cas par cas.

- La précision dans l'analyse comme la rigueur dans l'application sont directement liées aux résultats.

- La sélection des souches et leur mise en position de travail imposent une coopération permanente entre la partie BIO et la partie mécanique.

- CODABIO travaille dans ce cadre avec la Société SERPOL depuis plus de deux ans et il a pu être vérifié que toute pollution par rejets d'éléments nocifs se traite dans un rapport qualité/prix performant lorsque sont judicieusement associés les traitements mécaniques et physico-chimiques avec la biologie.

- Par ailleurs CODABIO travaille en étroite collaboration avec les Organismes Scientifiques en matière de Recherches, avec des Bureaux d'Engineering, des Sociétés d'Application et des Laboratoires spécialisés dans l'analyse et le contrôle des résultats (voir tableau annexe).

**LES TECHNIQUES - LES SECTEURS -  
LES PRODUITS**

REFERENCES	SECTEURS	BACTERIES LYOPHILISEES: A	BACTERIES FIXEES B	DERIVES ENZYMATIQUES: C
1	Soils Toxiques-Pollution Accidentelle			
2	Eau potable-Filtration			
3	Lacs-Rivières-Plans d'eau-Lagunages			
4	Agriculture-Ordures ménagères			
5	Stations d'épurations (urbaines, industrielles) Pré-Traitement			X
6	Réseaux de canalisations			X
7	Lisiers animaliers			X
8	Rejets industriels			
9	Bacs à graisses-Epuration zones de stockage			
10	W.C Fosses septiques			X
11	Nettoyage-Dépollution			X

- En B.F-produits (B)

- Des Micro-Organismes plus résistants PH 10
- Surfaces développées importantes
- Blocage métaux lourds
- Rapport qualité/prix optimisé



# BIOCATALYSTS

Main Avenue  
Treforest Industrial Estate  
Pontypridd CF37 5UT Wales  
Telephone: +44(0) 443 843712  
Fax: +44(0) 443 841214  
Telex: 497126 BIOCAT G

## **COMBIZYME — Shock Load Treatment for Aerobic Effluent Plants**

- \* A COST EFFECTIVE TREATMENT FOR SHOCK LOADING.
- \* STIMULATES REMOVAL OF INCREASED BOD.
- \* REDUCES LEVELS OF BOD AND TOTAL SOLIDS IN THE FINAL DISCHARGE.

### **EASY TO USE**

Combizyme is a blend of hydrolytic enzymes, nutrients and non-pathogenic bacteria.

Micro-organisms in an effluent plant work most efficiently when they receive a constant balanced supply of effluent. Shock loading can temporarily stall the action of the bacteria, causing the discharge to be above consent which can result in severe penalties being incurred.

Combizyme is specifically formulated to boost the removal of BOD following shock load conditions by rapidly accelerating the hydrolysis of fat, protein and carbohydrate in the effluent. BOD removal by the effluent plant is directly proportional to the level of hydrolysis within the plant. Combizyme increases the level of hydrolysis of large molecules and supplies a source of nutrients to stimulate healthy growth of micro-organisms.

Once shock loading occurs Combizyme should be added to the effluent at the earliest available point, such as the balance tank. The amount of Combizyme to be added depends on the extent of the shock loading. Treatment should continue for at least 3 days following the shock load to enable the plant to recover fully. If shock load conditions persist Combizyme treatment should be continued.



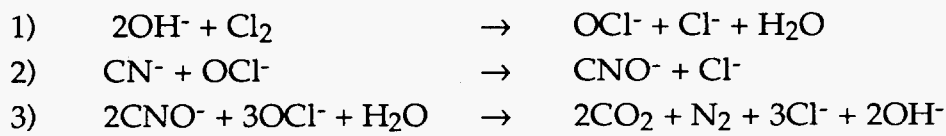
## LES TRAITEMENTS ENZYMATIQUES

D'une façon générale, les enzymes sont utilisées comme "additifs" ou plus exactement, comme "aides technologiques" dans certains traitements, en particulier dans :

- la désodorisation,
- l'accélération de la biodégradation des graisses,
- le traitement des effluents contenant des microorganismes pathogènes.

Les enzymes les plus souvent utilisées sont les protéases, lipases, amylases.

Il existe cependant un cas particulier où l'enzyme est utilisée directement dans l'élimination d'un composé. L'élimination des cyanures peut se faire par voie enzymatique. Traditionnellement, le traitement des cyanures se fait suivant le processus donné ci-dessous :

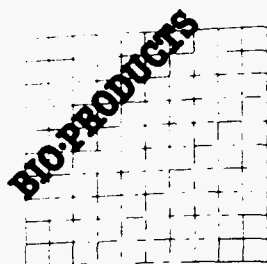


ICI a isolé d'un champignon une enzyme, la cyanide hydratase, qui catalyse la réaction :



L'optimum de température se situe entre 30 et 35°C. L'optimum de pH est à 8,5. La concentration optimale de cyanure est de 5000 ppm.

Les nitriles peuvent être traités après un traitement alcalin. Le procédé est décrit en annexe.



# ICI CYANIDE DETOXIFICATION PROCESS CYANIDE HYDRATASE

---

## ICI CYANIDE HYDRATASE, features of the product:-

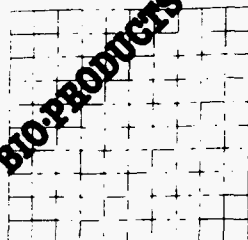
- BIOCATALYST (ENZYME)
- DERIVED FROM A FUNGUS PRODUCED BY FERMENTATION
- POWDER, PELLET OR SOLUTION FORM; TAILORED TO APPLICATION
- HIGH ACTIVITY; 1 KG CAN TREAT UP TO 50 KG  $CN^-$ ; 5000 PPM to < 10 PPM IN 6 HOURS, < 1 PPM IF REQUIRED
- RANGE OF APPLICATIONS
- CHEMISTRY:  
 $HCN + H_2O \rightarrow HCONH_2 \rightarrow NH_3 + CO_2$
- FOR OPTIMAL PERFORMANCE CONTROL TEMP AND pH AT 30 - 35°C, 8 - 8.5 RESPECTIVELY
- MAY NEED TO DILUTE EFFLUENT;  
10,000 ppm max. level,  
5,000 ppm optimum
- SOME METAL-CYANIDE COMPLEXES ARE TREATED; ALTHOUGH STRONG COMPLEXES e.g. Fe and Cu ARE NOT TREATED, FREE CYANIDE CAN BE TREATED IN THEIR PRESENCE.
- ORGANIC CYANIDES (NITRILES) CAN BE TREATED AFTER ALKALI PRE-TREATMENT.

## ICI CYANIDE HYDRATASE is an effective means of Cyanide detoxification which offers:-

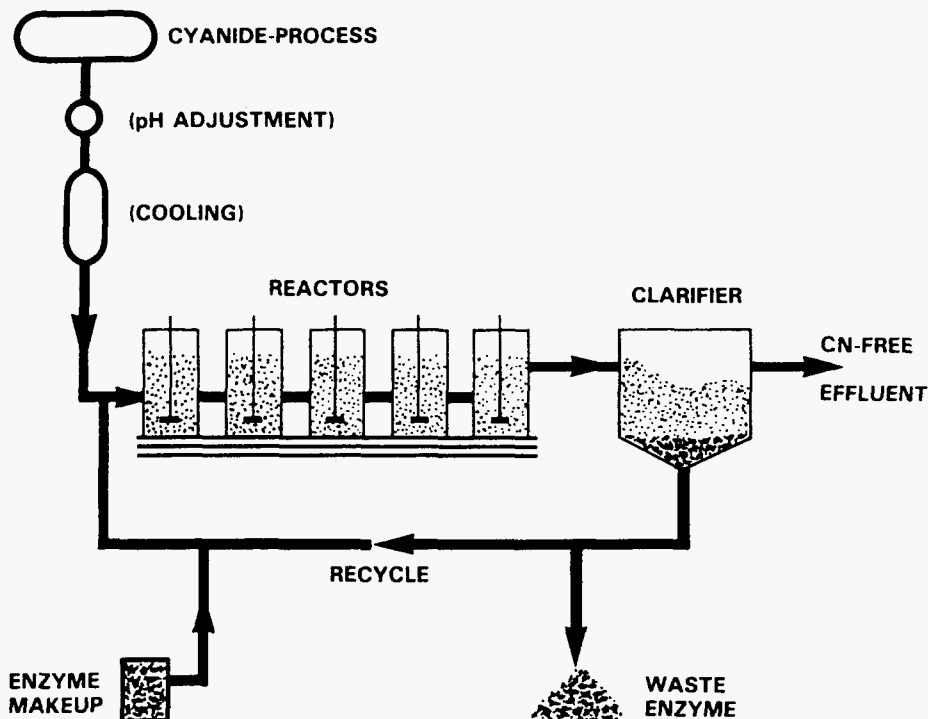
- A REDUCED HAZARDOUS CHEMICAL BURDEN ON THE ENVIRONMENT
- A VERSATILE AND SAFE PRODUCT TO HANDLE AND USE
- ATTRACTIVE ECONOMICS COMPARED TO CONVENTIONAL TREATMENT METHODS



BIO-PRODUCTS



# REPRESENTATION OF A TYPICAL CONTINUOUS TREATMENT OPTION



The cyanide detoxification enzyme can be used in a range of applications and systems.

In its simplest form, powdered product can be added to batch reactors containing cyanide from a variety of sources. Examples include effluent collection tanks or sumps, or reactors from which the required chemical has been recovered, with the by-product or excess cyanide that remains, being treated before discharge. Another example involves the use of the enzyme to destroy the residual cyanide fraction of acetone cyanodrin, following shipment and discharge of the chemical.

Other forms of the product can be used for continuous treatment purposes.

The diagram outlines one such option where effluent, suitably adjusted for pH and temperature where necessary, is continuously passed through a series of reactors. Enzyme loading can be varied depending on the effluent cyanide concentration and required residence time through the system. Recycle of enzyme can maximise its useful life.



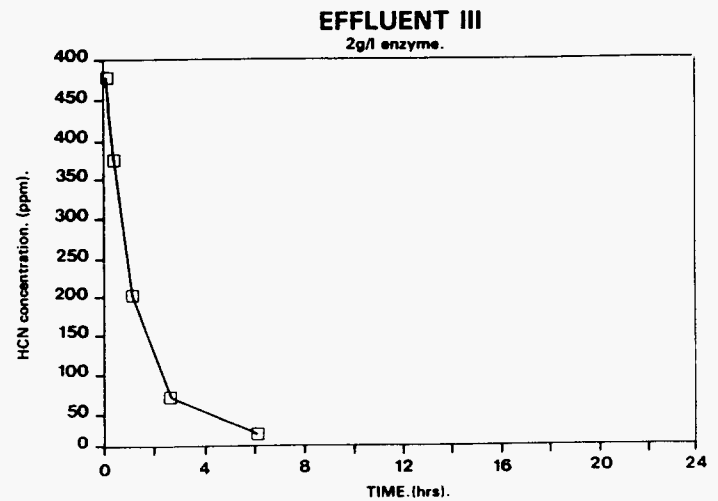
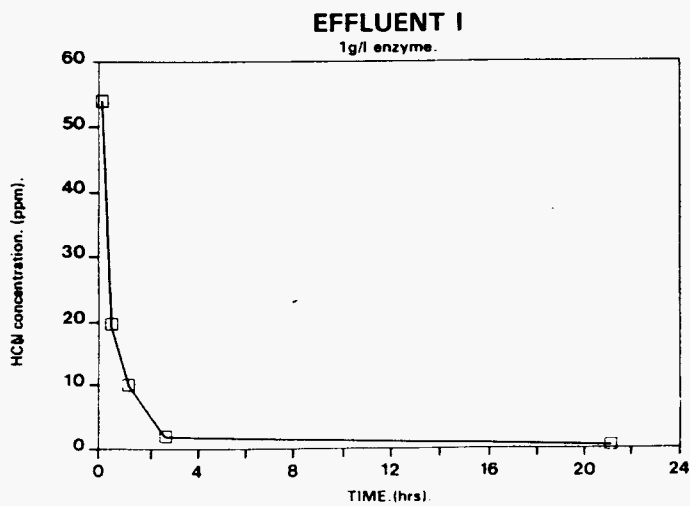
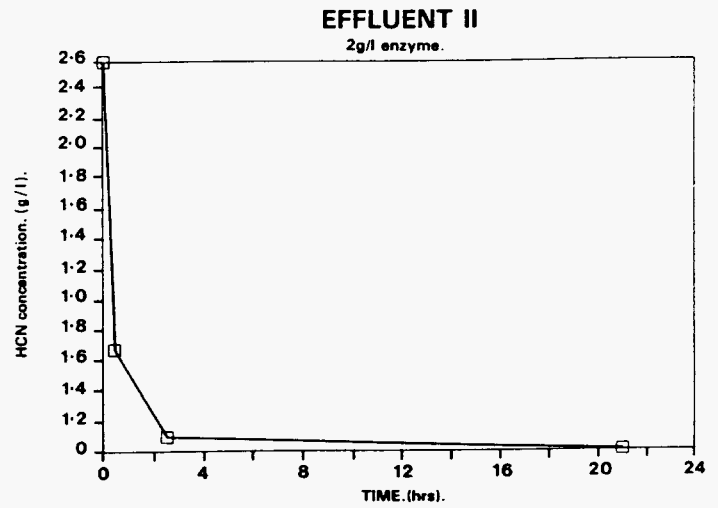
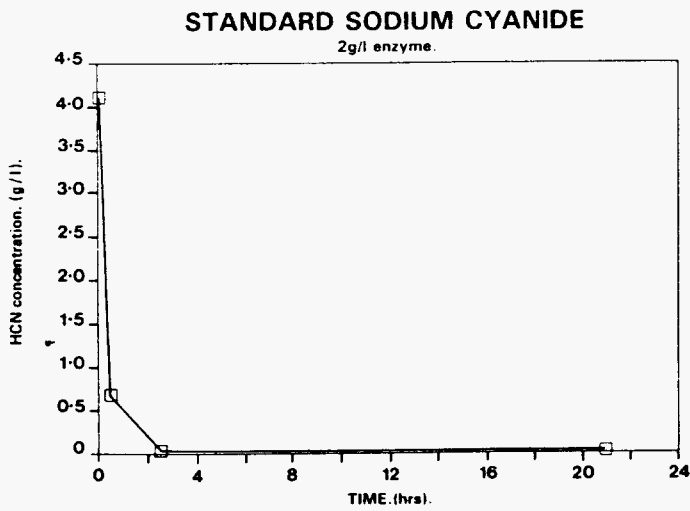
**BIO-PRODUCTS**

### Example batch treatment results:

Detoxification of cyanide bearing wastes by batch treatment with cyanide hydratase. Standard sodium cyanide, a solution of sodium cyanide in buffer at pH 8.5.

Effluents I and II, waste streams from a cyanide manufacturing plant, adjusted to pH 8-9.

Effluent III, waste stream from a speciality organic chemical manufacturing process, adjusted to pH 8-9.



Des exemples d'enzymes utilisées comme "aides technologiques" dans la dépollution sont donnés dans l'annexe suivante :



Main Avenue  
Treforest Industrial Estate  
Pontypridd CF37 5UR Wales  
Telephone: +44(0) 443 843712  
Fax: +44(0) 443 841214  
Telex: 497126 BIOCAT G

*Biocatalysts has developed a range of enzyme products that will enhance the performance of aerobic waste treatment plants and can increase their handling capacity without the need for costly modification. Where the waste effluent is essentially composed of natural products these preparations will enable the plant to operate at higher throughputs and recover more rapidly from shock loading. Based on very carefully selected enzymes with high activity, and containing a balanced microbe population, these products rapidly and effectively modify wastes into forms that the native microbial flora of the system can easily digest. Biocatalysts products differ from those based solely on sensitive specialised microbes for their action, these fragile microbes are either rapidly diluted out or they are rapidly competed out of existence. Grease traps and highly fatty wastes require a separate specialised treatment for which Biocatalysts has developed products of exceptional performance. These digest the fats and oils so that they are dispersed and become completely consumed by microbes in the effluent system.*

## ENVIRONMENTALS - EFFLUENT TREATMENT

*The products can be applied to the outlet that feeds the grease traps or the waste system and provide a simple and effective method for keeping drains and grease traps free flowing.*

*Concern is frequently expressed that wastes should not carry pathogenic organisms such as Herpes, Hepatitis and HIV viruses and many types of harmful bacteria. Treatment of raw sewage or infected wastes at source, would eliminate the contamination before discharge into coastal waters and hence contribute to cleaner water and beaches. A unique natural enzymic product has been developed that is strongly anti-bacterial and also anti-viral. Treatment of sinks, toilets and drains at Hospitals, Prisons, Laboratories, Abattoirs and Specialist Institutions with this product attacks the problem at source. The action is completely biological and is more effective, avoiding the use of strong acids or alkali.*

### PRODUCTS

COMBIZYME 23P	for regular and sustained improvement in performance of aerobic treatment systems.
COMBIZYME 61P	for emergency and shock load use.
COMBIZYME 209P COMBIZYME 253L	for the control and treatment of fatty wastes from restaurants and food factories.
PROMOD™198L	unique, biological control of pathogenic wastes by simple treatment at source. Removes the risk from downstream treatment.

# PRODUCT RANGE

The current range of products in these application areas, together with their pack sizes is correct at the revision date indicated above.

## MALODOUR REMOVAL

<b>Application</b>	Rapid removal of unpleasant smells	<b>Name</b>	Odourway
<b>Principal Activity</b>	Selected Enzymes	<b>Form</b>	Liquid
<b>Function/benefit</b>	Rapid Digestion of natural polymeric wastes. Elimination of microbes that generate unpleasant smells	<b>Pack Size</b>	25 & 220kg
		<b>Code</b>	O074L/O073L/O075L

## MALODOUR REMOVAL

<b>Application</b>	Rapid removal of unpleasant smells	<b>Name</b>	COMBIZYME 5P
<b>Principal Activity</b>	Selected enzymes and harmless microbes	<b>Form</b>	Powder
<b>Function/benefit</b>	Rapid Digestion of natural polymeric wastes. Elimination of microbes that generate unpleasant smells	<b>Pack Size</b>	5 & 25 Kg
		<b>Code</b>	C005P

## GENERAL WASTE WATER

<b>Application</b>	Treatment of aerobic effluent plants	<b>Name</b>	COMBIZYME 23P
<b>Principal Activity</b>	Selected range of lipases proteases, carbohydrases	<b>Form</b>	Powder
<b>Function/benefit</b>	Rapid digestion of natural polymeric wastes. Production of easily digested breakdown products	<b>Pack Size</b>	25 Kg
		<b>Code</b>	C023P

## FATS AND GREASE TRAPS

<b>Application</b>	Clearance of fat/grease traps, preventing blockage	<b>Name</b>	COMBIZYME 209P
<b>Principal Activity</b>	Blended lipases, & esterases	<b>Form</b>	Powder
<b>Function/benefit</b>	Digestion & solubilisation of fat/grease for improved flow rate through grease trap	<b>Pack Size</b>	25 Kg
		<b>Code</b>	C209P

## SHOCK LOAD WASTE WATER

<b>Application</b>	Start up of shocked aerobic effluent plants	<b>Name</b>	COMBIZYME 61P
<b>Principal Activity</b>	Complex activity, high lipase & protease content	<b>Form</b>	Powder
<b>Function/benefit</b>	Rapid digestion of excess biopolymers for adjustment of nutrition to micro-flora	<b>Pack Size</b>	Pail of 3x2 Kg bags
		<b>Code</b>	C061P

## FATS AND GREASE TRAPS

<b>Application</b>	Clearance of fat/grease traps, preventing blockage	<b>Name</b>	COMBIZYME 253L
<b>Principal Activity</b>	Blended lipases, & proteases	<b>Form</b>	Liquid
<b>Function/benefit</b>	Digestion & solubilisation of fat/grease for improved flow rate through grease trap	<b>Pack Size</b>	25 Kg
		<b>Code</b>	C253L

## PATHOGENIC WASTES

<b>Application</b>	Clearance of wastes from drains, sinks & sluices	<b>Name</b>	COMBIZYME 198L
<b>Principal Activity</b>	Selected enzymes with anti-viral/bacterial action	<b>Form</b>	Liquid
<b>Function/benefit</b>	Enzymic digestion of waste improving flow and reducing infectivity - environmentally safe.	<b>Pack Size</b>	0.5, 5 & 25 Kg
		<b>Code</b>	C198L



*Biocatalysts team can develop customised products for a wide variety of specialised natural waste materials.*

*Generally it is impractical to treat waste waters with enzymes if there is no holding time, aeration or settlement system installed.*

*However we are always interested to have your enquiries, and will endeavour to assist or recommend help wherever possible.*

*Our contract service activity provides support for new water treatment projects to ensure design economy together with the application of the optimum biological methods.*

Remarquons également que des "enzymes" peuvent être utilisées comme "aides technologiques" dans différents procédés et en particulier, dans l'industrie papetière. L'utilisation d'enzymes se traduit alors par la suppression de certains rejets toxiques.

Des exemples dans l'industrie en papier.

<b>Selected Applications of Biotechnology in Pulp &amp; Manufacturing</b>	
<i>Process Stage</i>	<i>Applicable Bioprocesses</i>
Raw materials pretreatment	De-pitching: degradation of pitch using fungal lipases.
Pulp production	Biopulping/Biomechanical pulping: pretreatment with lignin-degrading fungi.
Fiber modification	Various enzymatic treatments primarily using hemicellulases or cellulases to improve fiber's properties and handling, e.g., enhance beating, remove fines, increase flexibility, accelerate digestion, decrease vessel picking (tropical hardwood pulps), restore bonding to secondary fiber.
Bleaching	Biobleaching: pretreatment with fungal ligninases, xylanases, or peroxidases to remove lignin-associated chromophores.
Wastepaper recycling	De-inking: use of lipases and cellulases to remove vegetable oil-based inks.  Fiber modification: use of cellulases, hemicellulases, and glucanases to increase drainability of pulp, restore bonding and increase freeness of fibers.
Waste stream management	Effluent treatment: Decolorization using lignin-degrading enzymes; degradation of chlorinated aromatics.  By-product bioconversions: production of ethanol and single cell protein from cellulose or spent sulfite liquors; conversion of tall oil sterols to C <sub>19</sub> steroids.

## DECONTAMINATION MICROBIOLOGIQUE DES SOLS

La microbiologie du sol a surtout été étudiée dans le cadre des interactions plantes-microorganismes pour la fixation de l'azote ou pour la fixation des minéraux et l'enrichissement en matières organiques.

La capacité des sols à dégrader des composés xénobiotiques ou dangereux n'a été utilisée que plus récemment. En Europe, ce sont surtout les pays comme l'Allemagne et la Hollande qui sont les plus actifs dans ce domaine.

Le constat est simple en Allemagne : 2000 accidents par an conduisent à la contamination du sol par des substances dangereuses qui compromettent la qualité de l'eau. Ce sont 70 000 sites pollués répertoriés dans l'ex République Fédérale Allemande sans compter ceux de l'ex République Démocratique Allemande où la situation est beaucoup plus alarmante.

La décontamination n'est donc pas seulement un challenge écologique mais aussi un marché important où les procédés physiques ou chimiques et biologiques seront en compétition.

Les techniques microbiologiques se sont avérées efficace à grande échelle dans les traitements des sols par le gasoil (75 % des contaminations répertoriées).

Des composés plus complexes tels que les PCB, les hydrocarbures polyaromatiques peuvent être aussi dégradés. Toutes les techniques proposées sont basées sur le fait que certaines bactéries et certains champignons sont capables de dégrader ces composés en gaz carbonique, eau et sels minéraux. En théorie, après un traitement biologique, le sol peut retrouver sa vocation initiale agricole ou autre.

De nombreuses sociétés spécialisées dans la décontamination des sols, existent. Si les méthodes de traitement diffèrent, la méthodologie d'approche reste identique.

La première étape consiste à évaluer les "dégâts". Quelle est l'ampleur de la pollution ? En surface ? en profondeur. ? Quels sont les dangers immédiats ? Quelles sont les données géologiques et hydrologiques du site ?

La deuxième étape est critique. L'analyse en laboratoire permet d'analyser la nature de la pollution. En même temps des "microorganismes" sont isolés à partir du site contaminé, sont testés pour déterminer leur capacité biodégradative. Dans certains cas, sur des sites à réhabiliter, les microorganismes ont déjà commencé la dégradation. L'isolement de ces souches, la caractérisation des demandes nutritionnelles permettra de déterminer quels sont les nutriments qui devront être ajoutés pour accélérer le développement de ces souches.



La vitesse et le degré de dégradation des polluants dépend de nombreux paramètres qui doivent être optimisés, citons en particulier :

- la concentration et la nature des polluants,
- les interactions entre les différents polluants,
- les nutriments (sources d'azote, phosphate, minérales),
- l'accepteur d'électrons (oxygène, nitrate ...),
- l'humidité (l'activité de l'eau joue un rôle essentiel dans la biodégradation),
- la température,
- la structure du sol.

La troisième étape permet de préciser la technique. La biodégradation doit-elle se faire "in situ", "sur le site" ou en dehors du site ?

**Traitement "in situ"** : c'est la technologie de choix :

- lorsque la contamination est peu profonde, le sol peut être enrichi en microorganismes et en nutriments, éventuellement retourné mécaniquement pour favoriser le transfert d'oxygène, l'eau résultant du traitement est épurée dans un bioréacteur ;

- lorsque le sol à dépolluer n'est pas accessible (occupation par des constructions) ou lorsque la contamination est très profonde et a déjà atteint la nappe phréatique.

Dans les traitements "in situ" la nature de l'accepteur d'électrons joue un rôle important. Peuvent être utilisés l'oxygène, l'eau oxygénée ou les nitrates.

**Traitement "sur le site"** : après excavation, le sol est traité sur le site par des technologies appropriées :

- en bioréacteurs,
- en "andains", en "tas".

Pour ce faire, le sol contaminé est homogénéisé, enrichi en produits améliorant sa structure (paille broyée) ; le sol est arrosé, enrichi en nutriments et microorganismes (éventuellement), mis en forme soit en andains, soit en tas.

Le sol est retourné régulièrement pour assurer un bon transfert d'oxygène. Comme la température joue un rôle important ; on essaie autant que faire se peut de la contrôler (les tas ou les andains étant recouverts).

**Traitement en dehors du site** : plusieurs industriels proposent dans le cadre de "centres de traitement de déchets" de traiter les sols pollués par des techniques mettant en oeuvre des réacteurs plus efficaces et parfois en combinant traitement des sols, des eaux et des gaz.

Les coûts de transport sont élevés mais l'efficacité des équipements permet parfois d'accélérer le processus de biodégradation et donc de réduire les coûts de traitement.

La quatrième étape consiste dans le suivi du processus qui prend en général pour plusieurs mois (in situ ou sur le site), le suivi analytique permettant d'évaluer :

- la disparition des polluants,
- l'apparition éventuelle de nouvelles molécules,
- les cinétiques de biodégradation permettent de vérifier les performances des souches par rapport à leurs capacités biodégradatives (évaluées en laboratoire) afin de corriger éventuellement les apports de nutriments.

La dépollution des sols doit également être associée au "landfarming" :

- à l'épuration par des combinaisons plantes/microorganismes,
- au traitement des eaux souterraines.

### **Le "landfarming"**

Cette méthode de traitement est simple et peu onéreuse. Le sol contaminé est épandu sur un site spécialement aménagé, la dégradation microbienne est stimulée par la culture de différentes espèces végétales et par l'addition de nutriments. Le traitement sur site est parfois possible. Il dépend de la nature des sols, des conditions géologiques, hydrologiques.

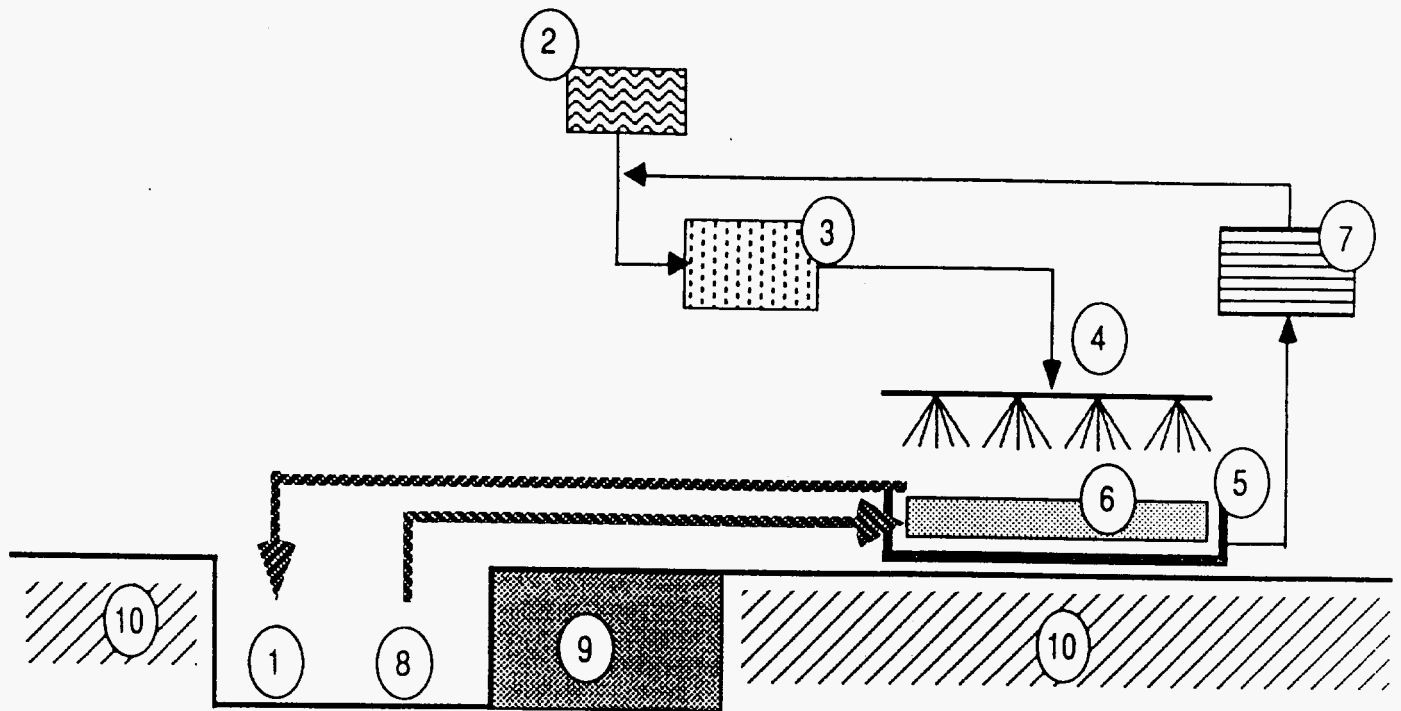
Cette technique ne permet pas d'éliminer tous les contaminants. Des concentrations résiduelles non négligeables restent souvent détectables. Des expériences sur la désorption ont montré que la vitesse de désorption d'un contaminant pouvait être corrélée avec sa solubilité dans l'eau et que l'utilisation de détergent permettait d'améliorer cette solubilité. Le landfarming doit être associé à une technique permettant d'améliorer la disponibilité des polluants utilisés comme substrat par les microorganismes.

### **L'épuration combinée plantes/microorganismes**

Cette technique peut être mise à profit efficacement dans des "marais" artificiels pour traiter des effluents industriels.

## Le traitement combiné sol/eaux souterraines

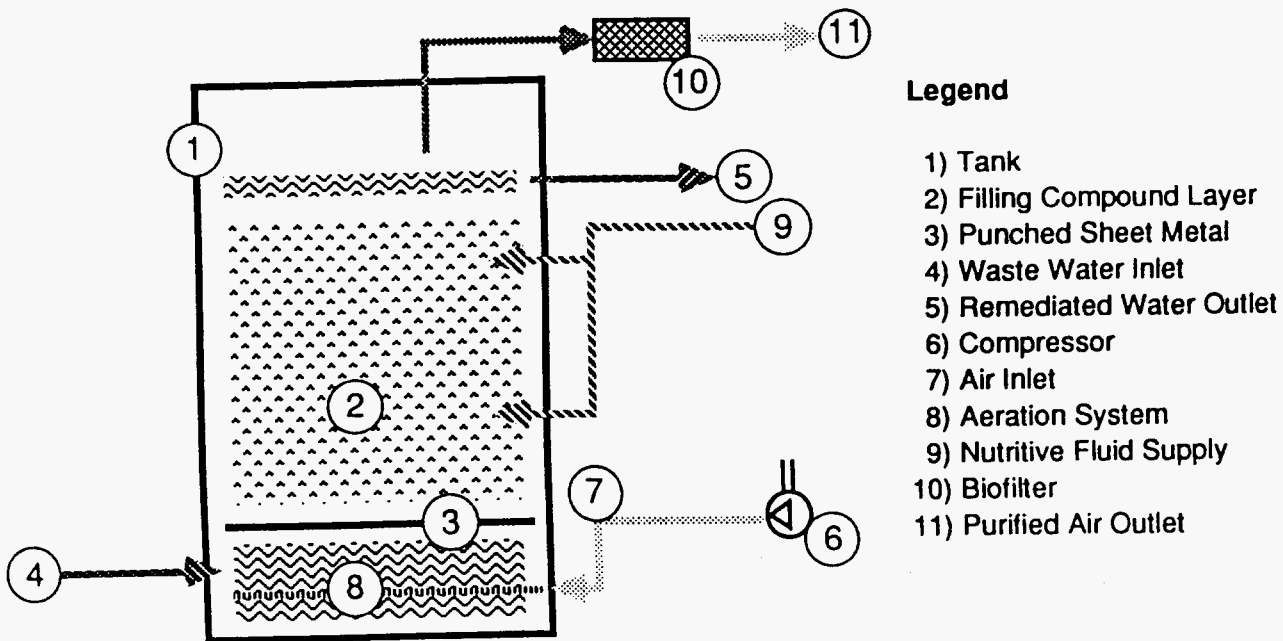
Lorsque la nappe phréatique est contaminée à partir du sol, un traitement combiné sol/eaux souterraines s'impose.



### Legend

- |                         |                                |
|-------------------------|--------------------------------|
| 1) Purified soil return | 6) Contaminated soil excavated |
| 2) Water                | 7) Leachate recycling          |
| 3) Bioreactor           | 8) Excavation                  |
| 4) Spray system         | 9) Contaminated soil           |
| 5) Sealed storage site  | 10) Soil surface               |

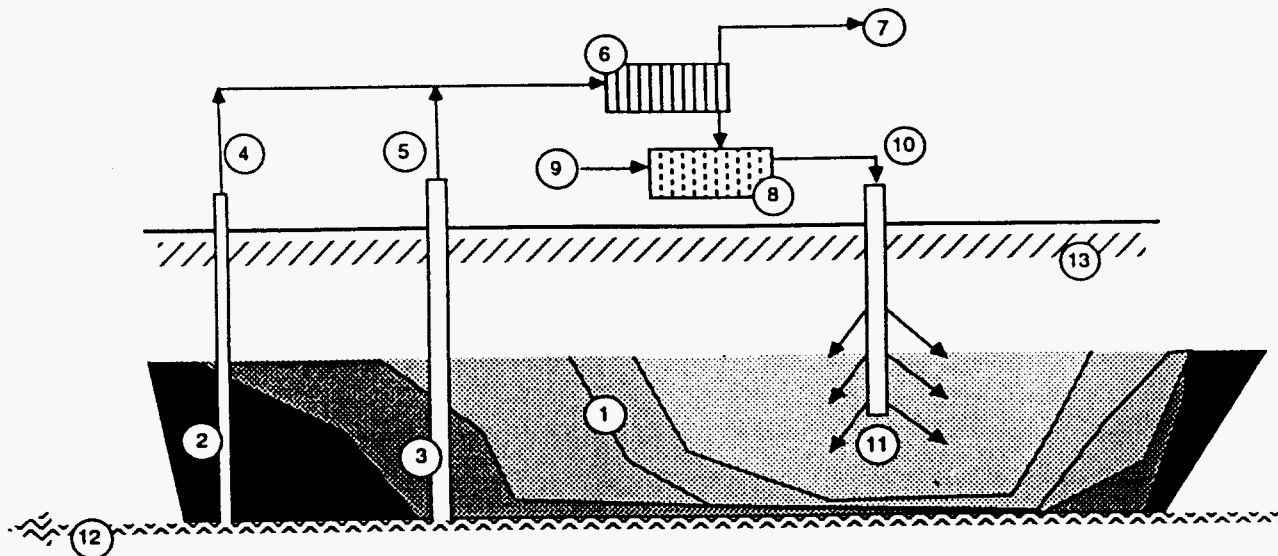
Traitement des sols "sur le site"



**Legend**

- 1) Tank
- 2) Filling Compound Layer
- 3) Punched Sheet Metal
- 4) Waste Water Inlet
- 5) Remediated Water Outlet
- 6) Compressor
- 7) Air Inlet
- 8) Aeration System
- 9) Nutritive Fluid Supply
- 10) Biofilter
- 11) Purified Air Outlet

Traitement sur le site en bioréacteur



**Legend**

- |                       |                                      |
|-----------------------|--------------------------------------|
| 1) Contaminated Soil  | 8) Bioreactor                        |
| 2/3) Depression wells | 9) Oxygen supply                     |
| 4/5) Pump             | 10) Water containing micro-organisms |
| 6) Oil separator      | 11) Infiltration well                |
| 7) Oil                | 12) Groundwater                      |
|                       | 13) Soil surface                     |

Traitement combiné sol/eaux souterraines

## "LES REACTEURS"

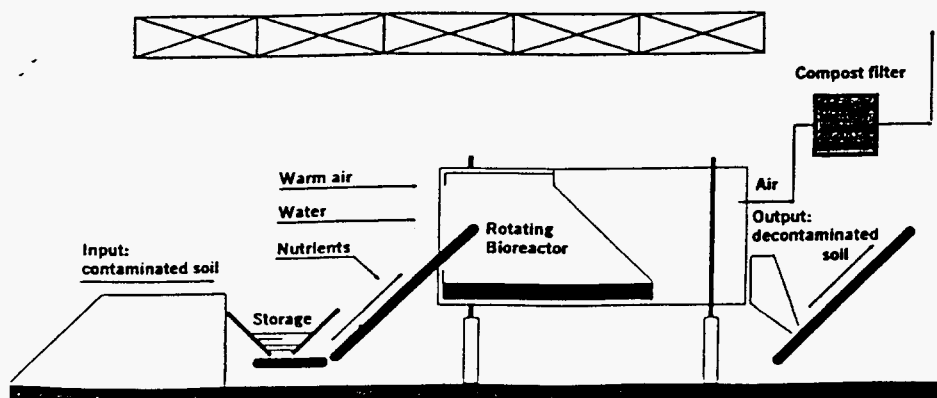
A côté de traitement en "andains" ou un tas, des réacteurs plus élaborés peuvent être utilisés.

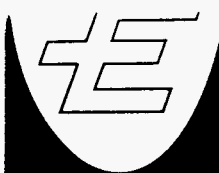
La Société EIMCO a développé un bioréacteur permettant de travailler avec des concentrations en matières sèches comprises entre 20 et 50 %. Ce réacteur combine les effets de l'agitation mécanique avec les effets "air-lift" l'air ne sert pas uniquement de source d'oxygène pour l'oxydation, mais il permet de maintenir les particules solides en suspension et d'assurer ainsi un excellent contact entre les différentes phases liquide/solide/gazeuse.

D'autres sociétés utilisent des réacteurs rotatifs genre four à ciment permettant un mélange efficace et un traitement rapide.



FIGURE 1. The bioreactor.



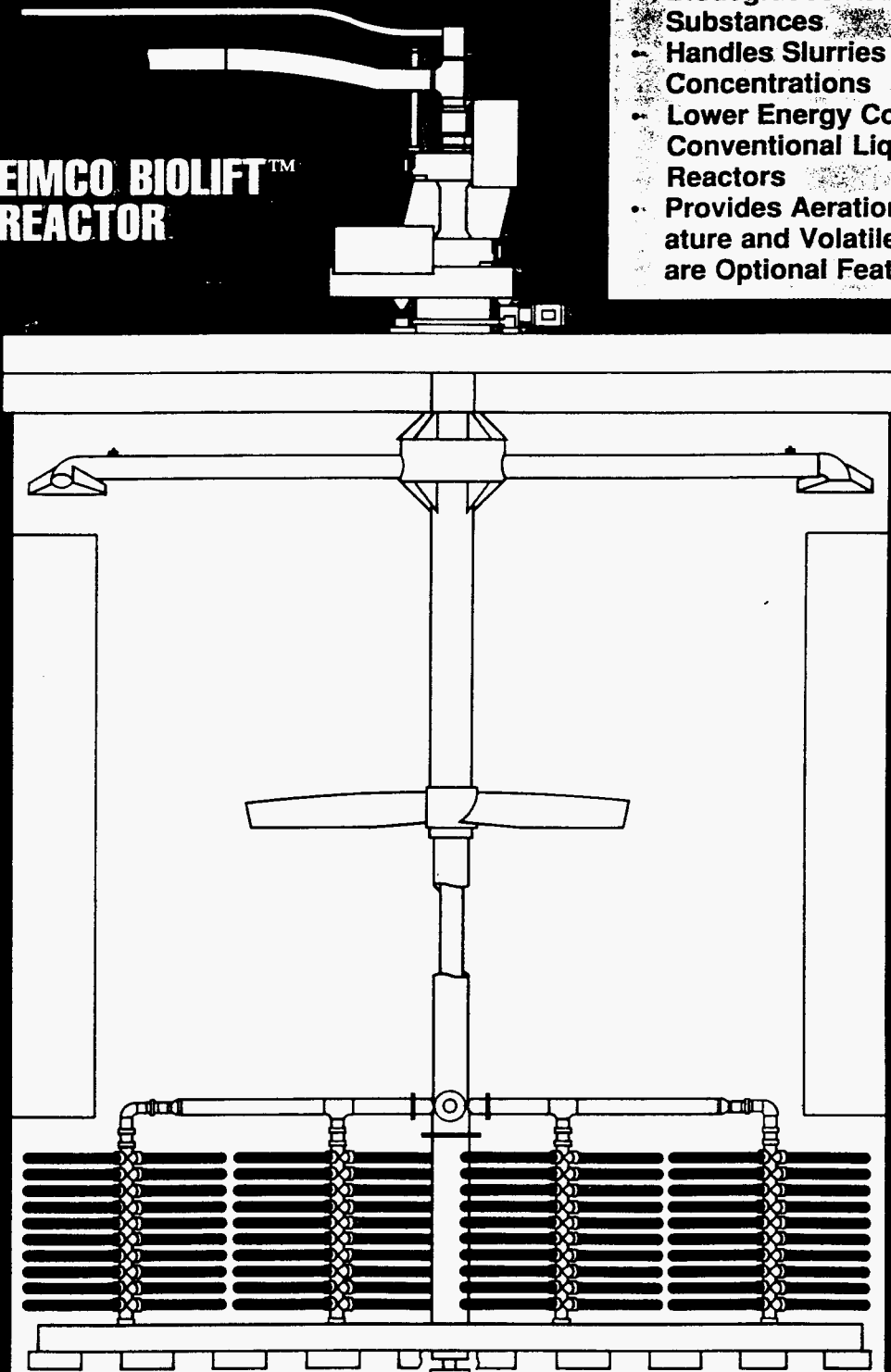


# EIMCO

# BIOLIFT REACTOR

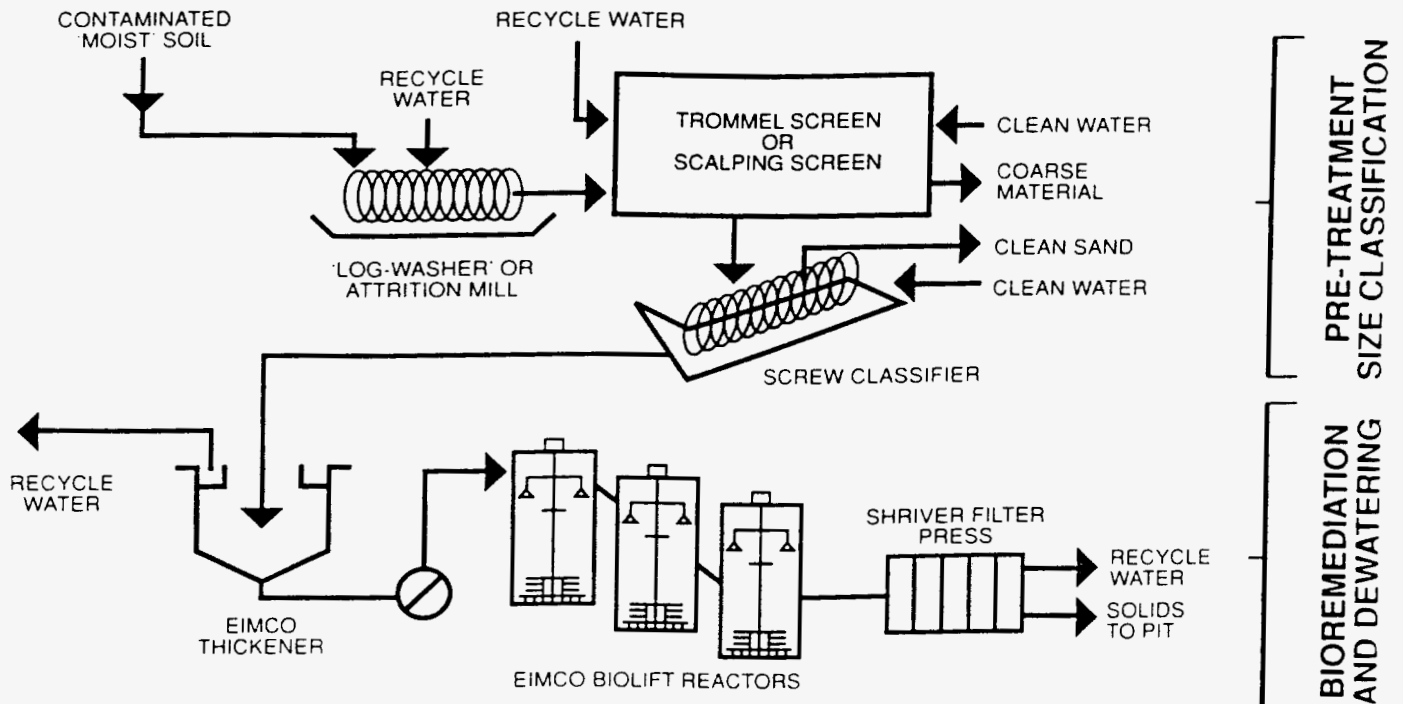
Cost Effective Equipment for Bio-Remediation of Hazardous Waste

**EIMCO BIOLIFT™  
REACTOR**

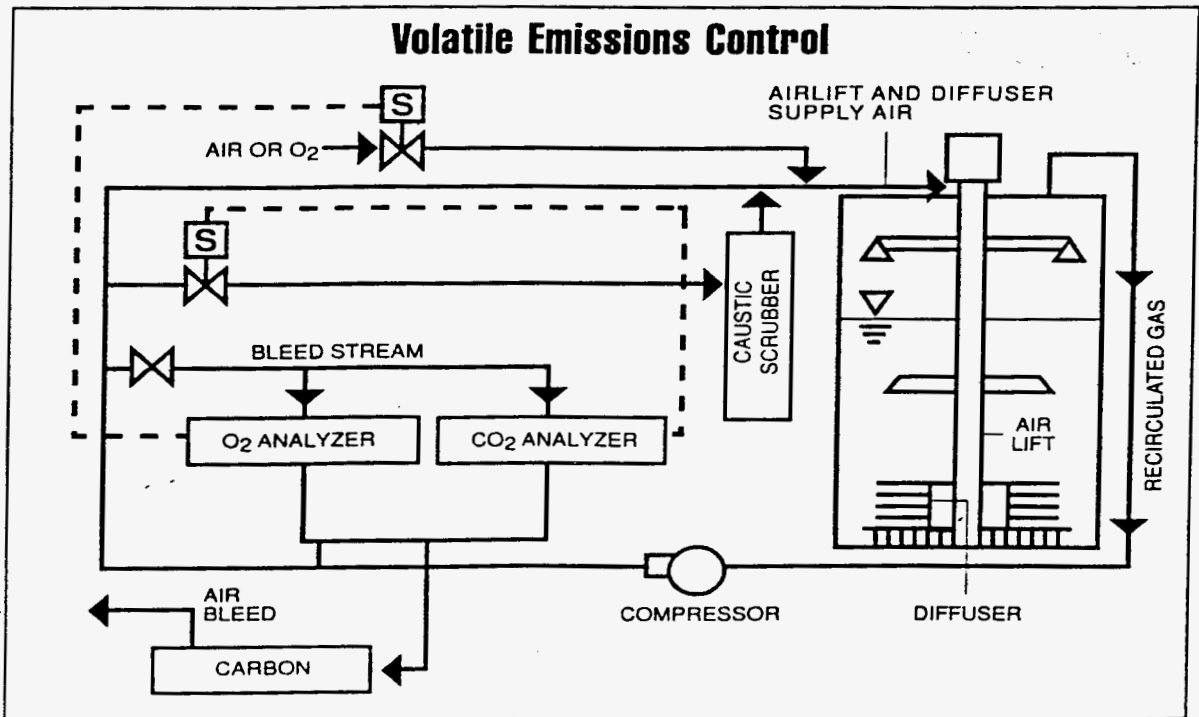


- Biodegrades Hazardous Organic Substances
- Handles Slurries of 30 - 50 wt% Solids Concentrations
- Lower Energy Consumption than Conventional Liquid/Solids Contact Reactors
- Provides Aeration and Mixing. Temperature and Volatile Emissions Control are Optional Features

### Bioremediation Flow Sheet



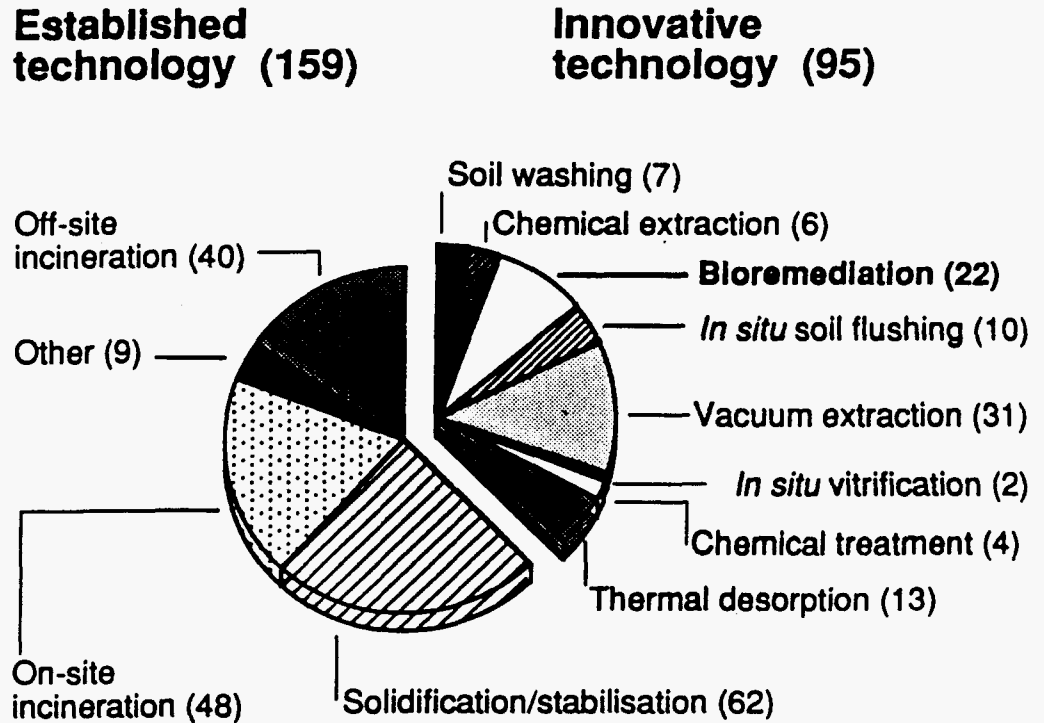
### Volatile Emissions Control



## LES TECHNOLOGIES ET LES COUTS

L'évolution des technologies appliquées au traitement des sols est donnée dans la figure suivante.

Le rôle des biotechnologies est grandissant.



Established and innovative technologies in use at Superfund sites, jan 1991. The 254 process examples here (number shown in brackets) have been used at 211 sites.

Les coûts sont donnés dans le tableau suivant.



### SUCCESSFUL PROJECTS WIN NEW CONVERTS

Contaminants	Process	Soil quantity	% Reduction	Time needed	Cost
<b>PAH</b>	onsite	7,000 m <sup>3</sup>	92%	2 years	N/A
	onsite	4,000 m.t.	99%	7 months	\$207/m <sup>3</sup>
<b>PCB</b>	onsite	400 m.t.	66%	6 months	\$265/m <sup>3</sup>
<b>ethylamine</b>	onsite	240 m.t.	98%	3 months	\$276/m <sup>3</sup>
<b>crude oil</b>	onsite	2,000 m <sup>3</sup>	95%	< 6 months	N/A
<b>diesel, gas</b>	onsite	8,000 yd <sup>3</sup>	99%	4 months	\$34/yd <sup>3</sup>
<b>Jet fuel</b>	onsite	10,000 m.t.	71%	2 months	\$178/m <sup>3</sup>
<b>PCP, creosote</b>	onsite	30,000 tons	58%	3 months	N/A
<b>2,4-D, MCPA</b>	slurry	750 yd <sup>3</sup>	98%	13 days	N/A
	onsite	12,000 yd <sup>3</sup>	94%	3 months	N/A
<b>petrochemicals</b>	insitu	2,000 yd <sup>3</sup>	96%	5 months	N/A
<b>gasoline</b>	onsite	2,100 yd <sup>3</sup>	98%	2 months	\$60/yd <sup>3</sup>

Data supplied by: Groundwater Technology, Ecova, and Umweltschutz Nord

Above are only some of the fullscale Industrial bioremediation projects that have been successfully completed in Europe and the U.S.

L'étude comparative des coûts avec les techniques traditionnelles permet de montrer l'avantage des techniques biologiques :

	Coût par tonne
Décharge	120 à 140 \$ + taxes + transport
Incinération sur le site	150 - 400 \$
Fixation stabilisation	100 - 200 \$
Biodégradation	15 - 70 \$

## LES SOCIETES

Company	Location	State of Development	Soil Treatment	Groundwater Treatment	In-Situ Treatment	On-Site and/or Off-Site Treatment
A. Alexander KG GmbH u. Co. <sup>(a)</sup>	Berlin					
Anakat, Institut für Biotechnologie	Berlin	Full-Scale Demonstration	X		X	X
Argus Umweltbiotechnologie GmbH	Berlin	Industrial-Scale Demonstration	X		X	X
B & R Ingenieurgesellschaft für Baustoff-Recycling und Umwelttechnik mbH <sup>(a)</sup>	Düsseldorf					
b-d-s Boden- und Deponie-Sanierungs GmbH <sup>(a)</sup>	München					
Bauer Spezialtiefbau GmbH	Schrobenhausen	Full-Scale Demonstration	X			X
Bilfinger u. Berger Bau AG <sup>(a)</sup>	Mannheim					
Biodetox Gesellschaft zur biologischen Schadstoffentsorgung GmbH	Alsen/b. Bückebug	Industrial-Scale	X	X	X	X
Bonnenberg & Drescher	Aldenhoven	Pilot Plant	X		X	
BTB, Bartels Technik & Bau GmbH <sup>(a)</sup>	Berlin					
Degussa AG	Hanau	Research at Laboratory	X		X	
Dekon, Dekontaminations-gesellschaft mbH <sup>(a)</sup>	Dortmund					
Detlef Hegemann Engineering GmbH <sup>(a)</sup>	Bremen					
Deutsche Shell	Hamburg	Pilot Projects (Shell Bioreg)	X			X
Ecosystem-Gruppe	Meerbusch	Research	X	X	X	

Company	Location	State of Development	Soil Treatment	Groundwater Treatment	In-Situ Treatment	On-Site and/or Off-Site Treatment
Erd- und Grundbauinstitut der Rein-Ruhr Ingenieurgesellschaft mbH <sup>(a)</sup>	Dortmund					
Este GmbH	Hamburg	Full-Scale Demonstration (Shell Bioreg)	X	X		X
Fraunhofer Institut für Grenzflächen und Bioverfahrenstechnik	Stuttgart	Biodegradation of Explosives				
Frühbis GmbH u. Co. KG <sup>(a)</sup>	Edenkoben/Weinstr.					
GBF, Gesellschaft für Biotechnologische Forschung MbH	Braunschweig		X		X	
GMA, Gesellschaft für Müll und Abfallbeseitigung mbH u. Co. KG <sup>(a)</sup>	Schortens					
Groth u. Co.	Pinneberg	Full-Scale Demonstration	X	X		X
Herost Umwelttechnik		Pilot Scale		X		X
Hochtief AG	Essen	Laboratory & Industrial Scale	X		X	X
Industrie Abwasser Technik Kurt Lissner GmbH u. Co. <sup>(a)</sup>	Ganderkesee					
Institut für Molekularbiologie und Analytik GmbH	Zeppelinheim	Field Demonstration Completed	X		X	
Jastram-Werke GmbH KG <sup>(a)</sup>	Hamburg					
Kloekner Decotec GmbH	Duisburg	Full-Scale Demonstration	X	X	X	X
Kolsch GmbH <sup>(a)</sup>	Siegen					

(a) These companies offer microbiological processes, but detailed information has not been collected.

Company	Location	State of Development	Soil Treatment	Groundwater Treatment	In-Situ Treatment	On-Site and/or Off-Site Treatment
Leichtweiss-Institut für Wasserbau c/o TU Braunschweig <sup>(a)</sup>	Braunschweig					
LFU, Labor für Umweltanalytik GmbH	Berlin	Full-Scale Demonstration	X		X	
Linde AG	Hollriegelskreuth	Research & Field Demonstration	X	X	X	X
Lurgi GmbH <sup>(a)</sup>	Frankfurt					
K. Massholder <sup>(a)</sup>	Heidelberg					
Messer Griesheim GmbH	Krefeld	Test Field Completed	X		X	
Philipp Holzmann AG	Düsseldorf	Pilot Study & Field (Shell Bioreg)	X	X	X	X
Preussag AG	Hannover	Laboratory & Pilot Studies	X		X	X
Probiotec GmbH <sup>(a)</sup>	Düren-Gürzenich					
RAG, Ruhrkohle Umwelttechnik GmbH <sup>(a)</sup>	Essen					
Rethman Städtereinigung GmbH	Selm	Pilot Project	X			X
Richard Buchen GmbH <sup>(a)</sup>	Köln					
Fa. Sanexen Industrieentsorgung GmbH <sup>(a)</sup>	Duisburg					
Santec GmbH	Berlin	Pilot Test	X		X	
Senator Projekt Service GmbH	Düsseldorf	Demonstration Full-Scale Project (GDS Process)	X	X		

Company	Location	State of Development	Soil Treatment	Groundwater Treatment	In-Situ Treatment	On-Site and/or Off-Site Treatment
Sorbios, Verfahrenstechnische Geräte und Systeme GmbH	Berlin	Laboratory	X		X	
TGU Technologieberatung Grundwasser und Umwelt GmbH	Koblenz	Field Tests	X	X	X	
Thyssen Engineering GmbH	Essen	Development at Demonstration Scale	X			X
TÜV Stuttgart e.V. <sup>(a)</sup>	Filderstadt					
Umweltschutz Nord GmbH	Ganderkesee	Full-Scale Demonstration Projects	X	X	X	X
Fa. L. Weiss GmbH u. Co. <sup>(a)</sup>	Crailsheim					
Xenex Gesellschaft	Iserlohn		X		X	

(a) These companies offer microbiological processes, but detailed information has not been collected.

Company	Location	State of Development	Soil Treatment	Groundwater Treatment	In-Situ Treatment	On-Site and/or Off-Site Treatment
Delft Geotechnics	Delft	Experimental Field Project Completed	X	X	X	
Bodemsanering Nederland BV	Weert		X			X
Ecotechniek BV	Utrecht	Research	X			X
Heidemij Uitvoering Mijetechniek	Hertogenbosch	Developed Technology	X			X
Heijmans Milieutechniek	Rosmalen	Purification of Gases from Soil Treatment				X
HWZ-Bodemsanering	Gouda	Research	X		X	
Mourik Groot-Ammers	Groot-Ammers	Full-Scale Demonstration	X	X	X	X
De Ruiter Milieutechnologie	Halfweg & Zwvanenburg	Full-Scale Demonstration	X		X	
DSM Research BV	Geleen	Laboratory Research	X		X	
Witteveen & Bos-Consulting Engineers	Deventer	Production Scale Trials	X			X
TAUW Infra Consult BV	Deventer	Full-Scale Demonstration	X		X	
Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiene (RIVM)	Bilthoven	Clean Up on Demonstration Scale	X	X	X	
TNO	Delft	Clean up on Demonstration Scale	X	X	X	
Ecolyse	Groningen	Small-Scale Demonstration	X	X	X	
Iwaco	Groningen	Clean Up on Demonstration Scale	X	X	X	

Company	Location	State of Development	Soil Treatment	Groundwater Treatment	In-Situ Treatment	On-Site and/or Off-Site Treatment
Castalia	Genova, Italy	Pilot Project	X			X
Biotecnologica I.F.P.	Broni, Italy	Research				
	Rueil-Malmaison, France	Research	X	X		
Cobadio	Vienne, France	Production of Bacteria	X		X	
Geoclean <sup>(a)</sup>	France					
BRGM + Elf	Orleans, France	Research Demonstration Project	X			
Water Resources Research Center	Budapest, Hungary		X			
A.S. Biol Jordens Kalundborg <sup>(a)</sup>	Denmark					
Biocentras	Vilnius, Lithuania	Full-Scale Demonstration	X		X	
NEO VAC	Crissier, Switzerland		X	X		X
Biotreatment Ltd. (subsidiary of Biotal)	U.K.		X	X		X
Groundwater Technology Int., Ltd.	Epsom, U.K.	Industrial-Scale Remediation	X	X	X	
Land Restoration Systems	Slough, U.K.	Experimental Installation in Operation	X	X	X	X
Biotal Ltd.	Cardiff, Wales	Development of Microbial Products				

La situation française est résumée dans l'article ci-dessous :

## Les friches industrielles peu rentables

● La France doit aujourd'hui gérer plus de 20 000 hectares de friches industrielles : terrils, carrières, anciennes usines de la sidérurgie et de la métallurgie, stations services désaffectées, etc. Techniquement, la réhabilitation de ces sites (destruction des bâtiments et dépollution des sols) ne pose pas de problèmes réels : lavage mécanique à l'eau (procédé de l'allemand Lurgi), décontamination par voie biologique (technologies utilisées par les sociétés Imbach, Ate et Esys), extraction thermique et incinération (procédé X-Trax de Waste Management) et combinaison de traitements thermiques et thermodynamiques (technologie développée par Pec-Sie du groupe EMC), etc. Mais la technique trouve ses limites dans l'intérêt financier de telles opérations. Les coûts et les charges qui s'ensuivent (le seul coût de réhabilitation d'un sol dé-



Plus de 20 000 hectares de friches restent à réhabiliter.

passe souvent les 3 millions de francs) est sans commune mesure avec les gains qui peuvent en résulter. Le groupe Lafarge-Coppée a achevé récemment deux opérations exemplaires, en région parisienne, à Limay (un lo-

tissement a remplacé une cimenterie) et à Villemomble (un Castorama a vu le jour sur une ancienne carrière de gypse). Mais on se situe à chaque fois dans des zones urbaines denses où la valeur marchande des terrains est

élevée. Ailleurs, dans le Nord-Pas-de-Calais et en Lorraine, la situation est plus précaire. L'Etat (dans le Nord, la plupart des friches lui appartiennent par l'intermédiaire des Houillères du Bassin du Nord et du Pas-de-Calais), les collectivités locales et les acteurs économiques n'accepteront de se lancer qu'à prix nul (le prix de vente des terrains réhabilités étant égal au coût des travaux). Mais il ne sera pas possible de multiplier à l'infini les bases de loisirs et les zones artisanales.

Et la nouvelle loi sur les déchets qui sera prochainement promulguée n'apporte rien de nouveau. Elle précise que l'acheteur d'un terrain pollué peut obliger le vendeur à le remettre en état, à la seule condition que les frais occasionnés ne soit pas disproportionnés par rapport au prix de vente. Un coup pour rien...

**IMBACH**B I O L O G I C A L  
S E R V I C E S**IBS France** S.a.r.l. - 20, rue Traversière - 92230 Gennevilliers

Tél.: (1) 47.33.61.69 - Télécopie: (1) 47.33.09.04

L I S T E   D E S   I N T E R V E N T I O N SR E A L I S E E S   P A R   L E   G R O U P E   I B SE N   F R A N C EI - P O L L U T I O N S   A C C I D E N T E L L E S1 - P O L L U T I O N   P A R   H Y D R O C A R B U R E S .. Société HSO - DAMAZAN (47) - Distributeur d'hydrocarbures.Déversement de 250 m<sup>3</sup> de super, fuel et gazole dans le sol  
autour des cuves de stockage.

Traitement du sol.

Juin 1991.

. Stockage d'hydrocarbures à ROMANS (26).Fuite de 10 m<sup>3</sup> de super sans plomb à partir d'une cuve de  
stockage enterrée.

Traitement du sol.

Octobre 1991.

Spécialiste de l'application des micro-organismes à la protection de l'environnement.

---

**IBS France** S.a.r.l. est une Société du Groupe IMBACH, spécialiste mondial de la réduction des dommages.



2 - POLLUTION PAR PRODUITS CHIMIQUES.

. Scierie Ferdinand BRAUN - HEILIGENBERG (67).

Déversement de produits de traitement du bois dans un ruisseau.

Traitement du lit du ruisseau après confinement du sol sur membrane imperméable : élimination du polluant pentachlorophénol dans 500 m<sup>3</sup> de sédiments.

Juin 1991.

. Transporteur LANGLADE - WOIPPY (57).

Déversement de 12 tonnes d'acrylate d'éthyle sur voie ferrée et sol avoisinant.

Traitement du sol et de la nappe phréatique.

Novembre 1991.

# TRAITEMENT DE SOL POLLUE PAR SOLVANT CHIMIQUE

---



Préparation du confinement avant pose de membrane imperméable.

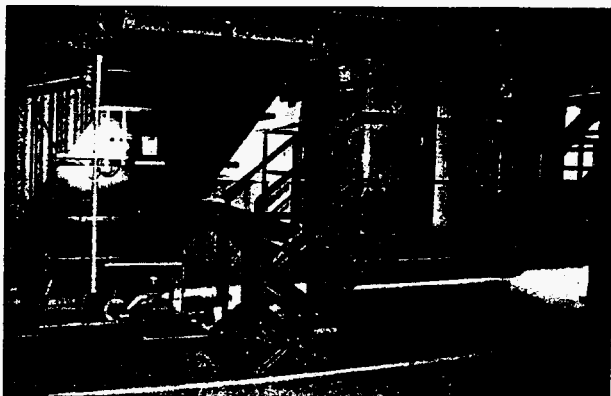


Traitement du sol par couches successives avec arrosage et recyclage après passage dans un fermenteur.

## TECHNIQUES D'AUJOURD'HUI

97 % A 99,3 % D'EFFICACITÉ POUR ETRE EN PHASE AVEC LA LÉGISLATION

# Assainissement des sols pollués



### LE CAS À TRAITER :

**Une ancienne carrière désaffectée, ayant servi, durant près de vingt ans, au dépôt de déchets domestiques et industriels divers (déblais, boues de galvanisation, déchets fortement chargés en hydrocarbures chlorés, huiles usagées contenant des solvants, terre souillée par des huiles usagées etc...).**

Cette décharge non autorisée, d'une surface de 2 ha environ, fut par la suite recouverte d'une fine couche de sable et de terre, puis vendue par parcelles destinées à la construction de pavillons de vacances. Mais les sondages effectués ont mis très vite en évidence une phase huileuse mobile, de 50 cm environ, surnageant à la surface de la nappe.

L'ampleur de la pollution nécessitait une intervention rapide. Les premières analyses ont permis de noter des concentrations de 11 250 ppm de solvants chlorés à l'endroit le plus touché et ont révélé la présence d'une multitude de polluants, plus de 1 000 substances au total. La zone contaminée atteignait 9 m de profondeur par endroit.

### LA SOLUTION TECHNIQUE :

Afin de limiter l'extension de la zone polluée et par conséquent les frais de traitement, la première mesure prise par la municipalité a été d'enterrer un mur circulaire, de 780 m de long, à double paroi, pour contrôler l'étanchéité de façon

permanente.

Néanmoins, l'importance du problème nécessitait la mise en œuvre d'une combinaison de procédés physico-chimiques et biologiques.

Après divers analyses et essais en laboratoire, KERAMCHEMIE a installé un pilote sur site pour déterminer les paramètres de fonctionnement et définir le traitement optimal.

Ce traitement se décompose en 11 étapes regroupées sous une halle de 450 m<sup>2</sup>.

L'eau de la nappe est pompée par l'intermédiaire de 32 forages et, selon qu'elle contient ou non des huiles, dirigée vers l'une ou l'autre des deux cuves de stockage. Le débit global dépasse 200 m<sup>3</sup> par jour. Les huiles libres qui surnagent sont soutirées régulièrement par surverse. Les matières en suspension, (principalement des hydroxydes sur lesquels s'adsorbent certaines huiles) sont traitées par ajout d'un flocculant. Après passages successifs dans un bassin de floculation, un séparateur lamellaire, un épaisseur et un filtre-pressé, on obtient des boues à 30% de siccité, chargées en polluants et suffisamment compactes pour faciliter la mise en décharge ou l'incinération.

L'eau qui s'écoule du séparateur à contre-courant est ramenée à l'alcalinité nécessaire, afin de provoquer l'oxydation du fer bivalent soluble et la précipitation des hydroxydes ferriques dans l'étape de lavage suivante. Parallèlement s'opère l'élimination des solvants chlorés volatils. L'eau circule dans deux colonnes à

garnissage montées en série, à contre-courant de l'air de stripage. La teneur résiduelle en solvants chlorés de l'eau ainsi traitée est réduite à environ

50 µg/l. Les boues d'hydroxydes sont floculées par dosage de polyélectrolyte, séparées sur un décanteur lamellaire et un épaisseur, puis déshydratées avec les boues activées excédentaires du traitement biologique sur un deuxième filtre-pressé. Les gâteau de pressage obtenus sont peu chargés en polluants. L'eau en sortie de ce deuxième séparateur lamellaire passe dans une troisième tour à garnissage qui abaisse encore sensiblement sa teneur en solvants chlorés. L'air de stripage est préalablement chauffé et passe ensuite dans la colonne 2. La teneur de cette eau en matières organiques est abaissée par voie biologique. Trois bassins sont placés en série pour éliminer les matières organiques facilement ou difficilement biodégradables. L'azote et le phosphore nécessaires au bon rendement de la culture bactérienne sont apportés sous forme de sels dissous.

Un filtre à sable et un filtre à charbon actif final jouent un rôle préventif : ils doivent encasser les éventuels dysfonctionnements de l'installation amont.

Un bassin final contrôle la qualité de l'eau traitée. En cas de problème, celle-ci est renvoyée en tête de l'installation pour retraitement.

L'air de ventilation des cuves de stockage en amont des colonnes de stripage est épuré

avec l'air de stripage sur deux filtres à charbon actif, fonctionnant en alternance.

### LES RÉSULTATS :

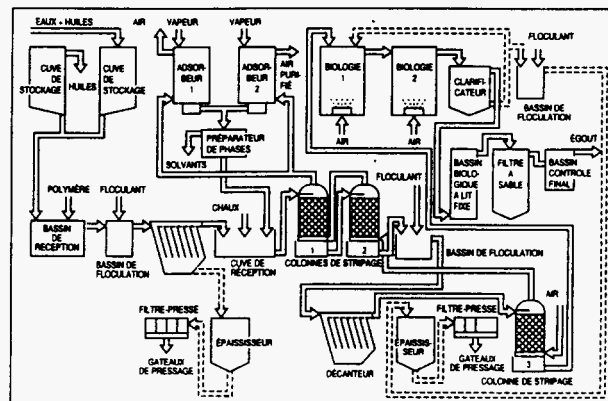
Un volume de 30 à 40 litres/jour de solvants est ainsi éliminé du sol. L'installation, (qui représente un investissement de 45 millions de francs environ) devra fonctionner en continu pendant au moins 5 ans, pour achever l'assainissement de la zone polluée.

Les performances obtenues et prouvées pour le traitement des différents polluants sont de l'ordre de 97% à 99,3%, ce qui est largement suffisant pour entrer dans le cadre de la législation.

### EFFICACITÉ DU TRAITEMENT

Polluant	% d'efficacité
dichlorométhane	99,2
1. 1 - dichloréthane	97,5
chloroforme	99,2
1. 1. 1 - trichloréthane	99,18
tétrachlorométhane	97,5
trichloréthylène	99,3
1. 1. 2 - trichloréthane	97,5
1. 3 - dichloropropane	97,5
perchloréthylène	98,9
1. 1. 1. 2 - tétrachloréthane	97,5
1. 1. 2. 2 - tétrachloréthane	97,5
trans-1. 2 - dichloréthylène	97,5
cis - 1. 2 - dichloréthylène	99,2
1. 2 - dichlorobenzol	97,5
1. 4 - dichlorobenzol	97,5

Une réalisation de KCH\*,  
membre du groupe  
GOLDSCHMIDT-  
KERAMCHEMIE-BEUGIN



\* Représentée par BEUGIN INDUSTRIE - B.P. 35 - La Comté 62150 HOUDAIN - Tél. : 21.47.47.00 - Fax : 21.41.59.00

SPÉCIAL ECO-INDUSTRIES - L'USINE NOUVELLE - 1992

Publicité Rédactionnelle

# DETOX INDUSTRIES, INC.

*Helping Mother Nature clean the world*

## WHO IS DETOX?

DETOX INDUSTRIES, INC. (DETOX) is a Texas corporation specializing in the on-site remediation of hazardous and toxic materials through biodegradation. Detox is the only company in the U.S. which has received an EPA Regional Approval under the Toxic Substances Control Act (TSCA) to biodegrade PCBs and can apply its technology to most other organic contaminants with proven efficiency. Detox's processes are applied to sludges or soils in either on-site batch processes or in-situ at costs usually less expensive than other disposal technologies.



*Detox Industries' corporate office in Sugar Land TX.*

## TECHNOLOGY DESCRIPTION

Biodegradation is the Earth's natural process of conversion of organic matter into environmentally safe byproducts of water and carbon dioxide or methane gas. Detox has isolated a host of nature's harmless (non-pathogenic) microorganisms that are

grown to its specifications. These microbes are applied directly to contaminated materials upon which the microorganisms feed. The result is the metabolization of the organic contaminant in the treated matrix to harmless byproduct. The microorganisms then die out as their food source (the contaminant) diminishes. Detox has developed its process to treat organic wastes that are generally too refractory (molecularly resistant) to biodegrade satisfactorily in nature without the extra help provided by Detox. PCBs are only one of many such difficult chlorine based compounds to biodegrade. Other chlorine-substituted compounds like PCP (Pentachlorophenol), chlordane and DDT are also difficult to degrade. Each of these environmentally difficult contaminants is susceptible to Detox's extraordinary process.

## DETOX PROCESS BIODEGRADES:

- Polychlorinated Biphenyls (PCBs)
- Pentachlorophenol (PCPs)
- Creosote
- Oil
- Phenolics
- Polynuclear Hydrocarbons
- Chlordane
- Myrex
- DDT

## DETOX PROCESS IMPLEMENTATION

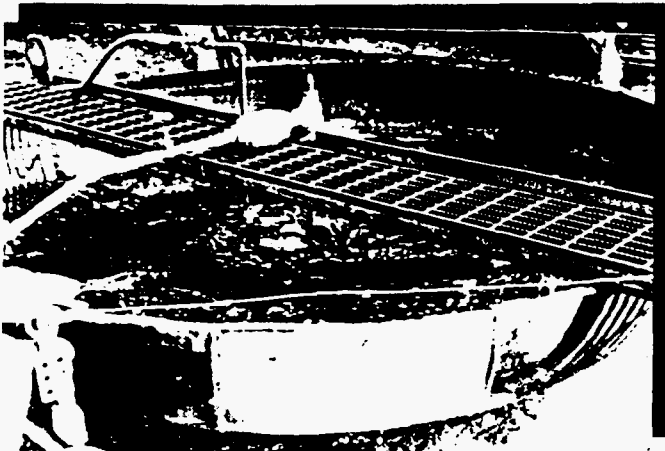
**In-situ** is a soil treatment process carried out by excavating, mixing and blending soil, sludge and microbes in staged depths of three to five feet, depending on waste site soil characteristics. Microbe colony counts are

maintained at optimum environmental conditions with intermittent additions of proprietary additives as necessary. Total remediation normally takes place in approximately three to six months from the date of initial inoculation.

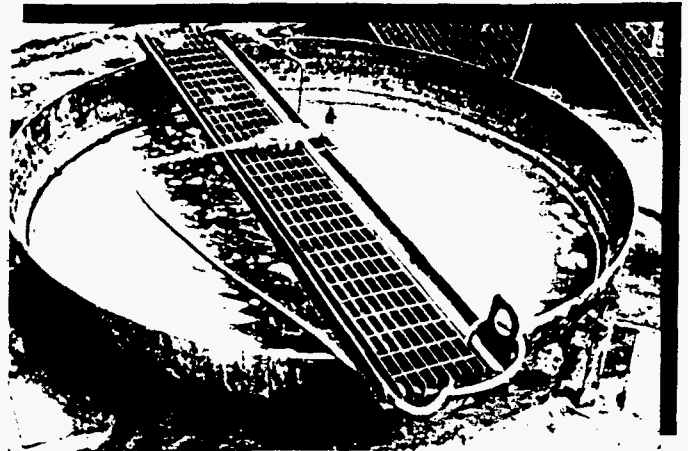
**On site batch processing** is accomplished by building a containment vessel on site out of steel or fiberglass and charging the vessel with contaminated matrix, microbes and water. The high solids mixture is slurred continuously at a pre-determined rate and process variables monitored and adjusted by skilled technicians until target levels of remediation are achieved, usually within three to six months.

## TSCA APPROVAL OF DETOX'S PCB DESTRUCTION PROCESS

Section (6) (e) of the Toxic Substances Control Act (TSCA) requires EPA to control the disposal of PCBs. Regulations promulgated by the EPA to implement TSCA provide that disposal of PCBs shall be by methods approved by the Regional Administrator of any region in which the method is to be used. In 1983, Detox applied for approval of its PCB Biological Destruction Process as an alternative destruction technology under TSCA. After proving its process viability in bench (laboratory) tests, Detox demonstrated the effectiveness of its process in a pilot study which employed a simple open vessel (simulating a sludge pit) to mix PCB contaminated sludge with Detox microbes. EPA approval was granted in 1984.



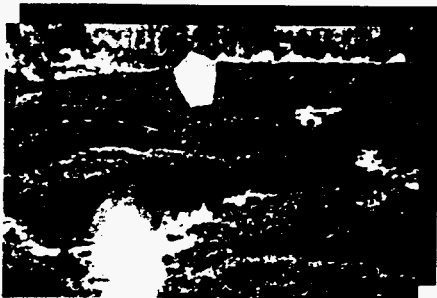
*Open bioreactor containing sludge, contaminated with 2000 ppm PCB's at beginning of demonstration*



*Water and sediment remaining after biotreatment to level of <4 ppm PCB's*

## PCP CONTAMINATED SITE

Approximately 14,000 cubic yards of soil highly contaminated (>2900 ppm) with pentachlorophenol (PCP) in Conroe, Texas, was removed to a specially designated area for disposal. Detox's predecessor firm was contacted to develop a biological system to biodegrade the PCP. Soil samples were taken and a bench study analysis initiated to determine the biological system to be used. Because of the size of the project, the biodegradation was done in sections. As each section became detoxified, test samples were analyzed by an independent third party laboratory and the results were submitted to the Texas Department of Water Resources (TDWR) for evaluation. The project was completed in four months at approximately 20% of the cost of transporting the contaminated soil to a secure landfill. The TDWR sampled and tested the area for final site closure with results showing PCP reduction to less than 1 ppm.



Truckloads of soil contaminated with 2900 ppm of PCP.



View of soil after biotreatment to less than 1 ppm of PCP.



Open treatment tank containing waste oil contaminated with 46 ppm of PCB's (Aroclor 1260).



Bioprocessed waste oil after treatment to less than 1 ppm PCB's.

## PCB CONTAMINATED OIL PROJECT

At Texas A&M University, it was discovered that approximately 15,000 gallons of waste oil in a 25,000 gallon closed tank located at the fire fighting school campus contained an average of 46 ppm of PCBs (Aroclor 1260).

The University signed an agreement with Detox to biodegrade the PCBs contained in the oil through the use of its proprietary method of using specially-adapted, naturally-occurring microorganisms to degrade the PCBs.

After two months of treatment by Detox, the PCBs were reduced to less than 1 ppm.

## PCP CONTAMINATED SOIL PROJECT

Detox entered into an agreement with a company in Houston, Texas, for the decontamination of an approximate two-acre parcel of land on the site of its former wood treating operation. The contaminants, pentachlorophenol (PCP) and creosote, had been determined to have seeped into the soil at depths of approximately 12 feet in certain sections with contamination levels as high as 56,250 ppm of PCP and 162,000 ppm of Phenanthrene.

Detox began full application of its treatment process and after 3 months had achieved approximately 85% degradation on over 19,000 cubic yards of contaminated soil.



Soil contaminated with PCP-creosote prior to treatment.



Detoxified site after in-situ biodegradation.

FOR FURTHER INFORMATION  
CONTACT DIRECTOR OF MARKETING

DETOX INDUSTRIES, INC.

12919 DAIRY ASHFORD  
SUGAR LAND, TEXAS 77478  
(713) 240-0892

© 1989

ALKO LTD  
 Biotechnology  
 SF-05200 Rajamäki  
 Finland  
 Telephone: +358-0-29021  
 Telex: 15155 alkor sf  
 Telefax: +358-0-290 2236

## Bioremediation of chloroaromatic - contaminated soil

### Facts and Figures

*Alko Ltd*  
 Established 1932  
 Turnover 1988 USD 1000 million  
 Employees 1988 4000

*Alko Ltd, Biotechnology Division*  
 Established 1986  
 Turnover 1988 USD 10 million  
 Employees 60  
 Key contact  
 Kari Edelmann, Director



Contaminated soil is excavated for bioremediation

### Company and products in brief

Alko Ltd, a company which is owned by the State of Finland, is primarily responsible for the production, import, export and sales of alcoholic beverages and industrial ethyl alcohol in Finland.

The Alko Ltd Biotechnology Division produces and markets biotechnological products from its two production plants - the yeast plant and the biotechnical plant.

### Products include:

- enzymes
- baker's yeast
- selenium, chromium and zinc-enriched yeasts
- specialty fodder yeasts
- microbes and processes for
  - bioremediation of soil contaminated with chloro-organics
  - biodegradation of chlorinated phenolic compounds in ground and waste water

- bioremediation of oil-polluted soil.

### Bioremediation of chloroaromatic contaminated soil

Technical chlorophenol-based fungicides are used at sawmills to prevent blue staining of timber and lumber. Some of the chlorophenol drips into the soil during treatment, transport and storage of the treated wood. Chlorophenols are not degraded microbiologically in soil because of unfavourable environmental conditions and the lack of degrading microbes. This leads to heavy accumulation of chlorophenols in sawmill soil.

### The process

Bioremediation is based on the activity of polychlorophenol mineralizing bacteria. These bacteria are originally isolated from the soil and are therefore well adapted to the soil environment.

There are two methods for on-site

- bioremediation of chlorophenol-contaminated soil:

- Windrow composting - a batch process where contaminated soil mixed with chlorophenol-mineralizing bacteria is treated in a heap.
- Use of a drum composter - a continuous-flow system with mixing and moving mechanisms.

### Benefits of the process

- Natural composting process where non-manipulated soil bacteria are used
- Total mineralization of the contaminants; no toxic products, leaching or smell during treatment
- On-site process; no transport costs; low maintenance costs during the process
- High concentrations (up to 10,000 ppm) can be treated; low (< 1 ppm) final concentration is reached.

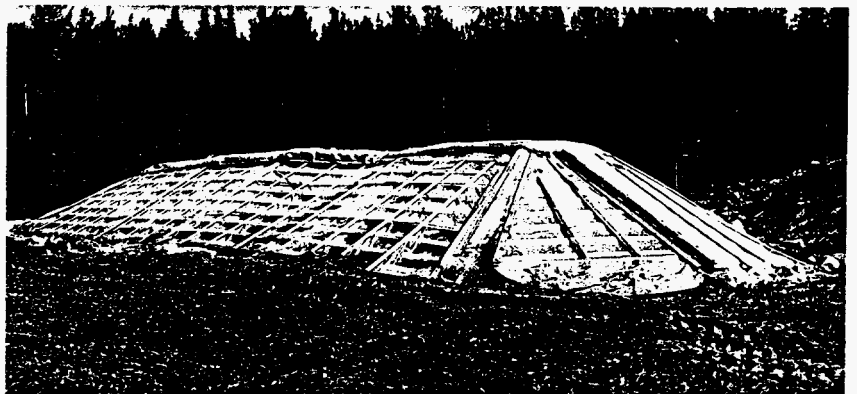
<i>Results of windrow composting</i>			
Sawmill	Volume m <sup>3</sup>	Date	Chlorophenols mg/kg d wt
Enso-Gutzeit, Heinola	50	June 1984	215
		Oct. 1984	38
		Oct. 1985	16
		Oct. 1987	0.3
Pohjan Saha Oy Jyväskylän mlk.	300	Aug. 1985	9000
		July 1986	2200
		Sept. 1987	1500
		May 1989	900
Kymmene, Kaukas Lappeenranta	200	Dec. 1986	450
		May 1987	360
		May 1989	50

*Colonies of chlorophenol mineralizing bacteria on an agar plate*

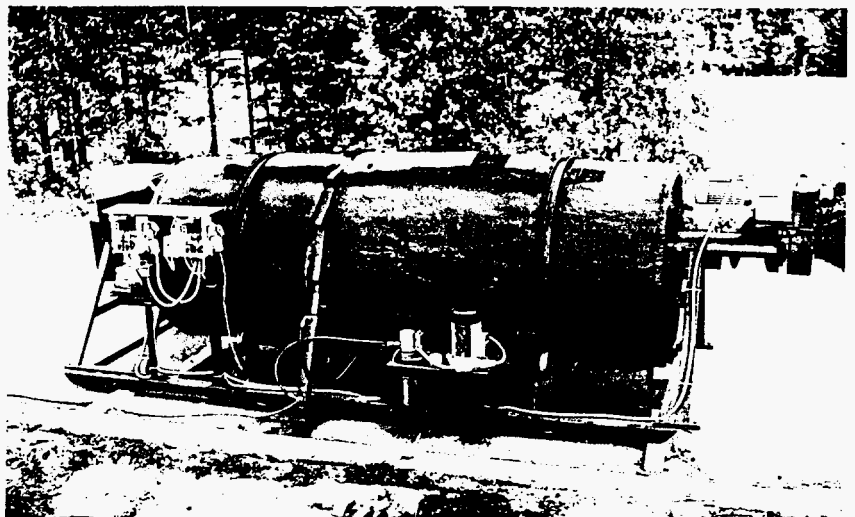


*Contaminated soil in a windrow*

*The windrow is covered by plastic to prevent leaching of chlorophenols*



*A drum composter for soil bioremediation*



## On-Site Treatment

# Bioreclamation

In situ bioreclamation is an efficient and cost-effective technology for the decontamination of both soil and ground water. International Technology Corporation (IT) has special expertise in the application of this proven method for the subsurface treatment of sites contaminated with a variety of petroleum hydrocarbons and other organic compounds.

When bioreclamation is chosen as a treatment technique, IT utilizes bacteria indigenous to the subsurface environment to degrade substances that have contaminated the soil and ground water. Nutrients, such as oxygen, nitrogen and phosphorus, are added to the contaminated region to stimulate the growth of those bacteria capable of degrading many organic contaminants. The bacteria ultimately convert the hazardous compounds to the harmless inorganic materials, carbon dioxide and water. Once the bacteria have degraded the contaminants to an acceptable level, nutrient addition is discontinued, and biological activity returns to its original state.

Bioreclamation allows simultaneous degradation of contaminants in both soil and ground water, and the increased biological activity involved in the process often enables contaminants to be washed from soil to water, where they can be captured and treated at the surface. With this technology, IT makes available an environmentally sound solution to subsurface contamination that involves a minimal expense of time and capital.

The enhancement of natural degradation is appropriate when aerobically degradable contaminants are present and an aggressive, in situ treatment is desired. IT can apply bioreclamation at sites contaminated with petroleum products, including



On-site staff adjust nutrient storage and delivery equipment to maintain appropriate injection of nutrients.

gasoline, diesel and jet fuel, and other organic substances such as simple and aromatic hydrocarbons, alcohols, ketones, aldehydes, organic acids, esters and simple amines. Our complete range of services in this area include site assessment, system design, engineering, start-up and operation.

### Assessing Problems, Designing Solutions

Effective bioreclamation requires the characterization of a site's microbiology, hydrogeology and chemistry. IT-conducted site assessments begin with the

identification of the contaminant(s), their properties and the extent of contamination. Soil and ground water samples are collected and analyzed to determine whether the types of bacteria required for degradation of the contaminant(s) are present. IT's hydrogeologists define ground water movement and soil permeability.

If a site assessment reveals that bioreclamation is a viable decontamination approach, IT can begin system design — the development of a proper nutrient formulation and circulation system for the site.



IT gives special attention to the development of appropriate nutrient solutions. Our nutrient formulations generally contain ammonium chloride as a source of nitrogen, a blend of simple and complex phosphate salts to facilitate transport of inorganic phosphorus, a dilute solution of hydrogen peroxide to supply oxygen, and trace minerals as required for the site. The circulation system is designed by a team of hydrogeologists, microbiologists, chemists and engineers. Data on horizontal and vertical movement of water through the contaminated soil are studied to determine how effectively the nutrient-enriched water will move through the subsurface environment. After cost and time estimates are calculated to compare the feasibility of bioreclamation to that of other treatment methods, IT's engineers integrate the bioreclamation process into the overall remediation plans and work with the client to obtain appropriate regulatory approvals.

#### The Process

Project start-up begins with the delivery and installation of the nutrient delivery system, which is piped into the ground water injection system. Our nutrient delivery systems are reliable, modular, skid-mounted, portable and fully enclosed to provide weather and security protection. IT offers initial consultation, on-site assistance and field test kits as well as training of on-site personnel in the safe handling of equipment and nutrients.

When the nutrient delivery system is in place, ground water is recovered downgradient of the contaminated region, and nutrients are mixed into the recovered water at the surface.



Ground water monitoring is an important part of any IT in situ bioreclamation project including this one involving jet fuel remediation.

Alternatively, recovered ground water may be treated at the surface and disposed off-site, with fresh water used for the introduction of microbial nutrients. The nutrient-enriched water is then injected into the subsurface upstream of the contamination. This process ensures that bacteria in the contaminated region are continuously provided with nutrients to support their growth and metabolic activities. Careful monitoring of bacterial response during the initial period of accelerated microbial activity maintains a proper balance of nutrients.

#### Quality Through Completion

IT provides continued support to help see the project through to completion. As data from the continually monitored site indicate a need for adjustments to

optimize the contaminant consumption rate, IT quickly responds. Frequent communication with on-site staff and routine reports on remediation status ensure close management at every step of the way. Once contamination has been reduced to an acceptable level, IT will remove equipment and unused nutrients, review results of remediation efforts and issue a final report.

#### IT's Special Treatment

When IT manages your on-site treatment problem, you have the support of a national network of multidisciplinary professionals. The combination of their skills and IT's concept-to-completion approach to environmental management is your assurance of expert problem-solving during every phase of a project.



For more information please contact:  
**International Technology Corporation**  
**Corporate Headquarters**  
 23456 Hawthorne Boulevard  
 Torrance, CA 90505  
 (213) 378-9933

**Regional Office**  
 165 Fieldcrest Avenue  
 Edison, NJ 08837  
 (201) 225-5620  
 (201) 225-2000



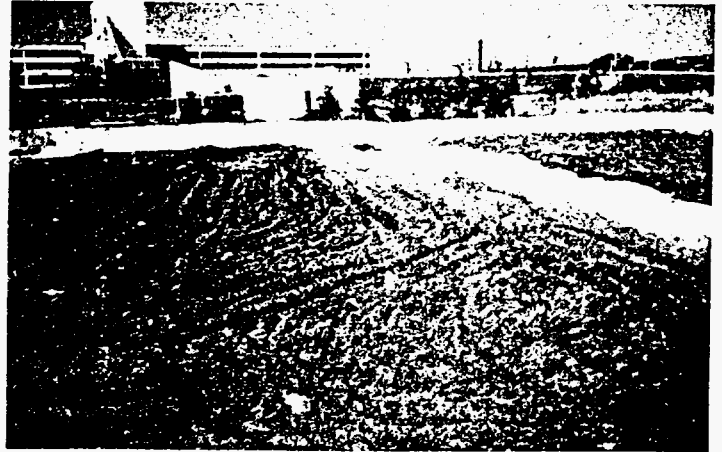
# ERI "Biotechnology in Action"®

## ENVIRONMENTAL REMEDIATION, INC.

### SOIL BIODEGRADATION

Remediation of contaminated soils presents a major challenge to business, scientists, and regulators. The Superfund Amendments and Reauthorization Act of 1986 demonstrated preference to remedial technologies which significantly reduce the volume, toxicity, or mobility of hazardous materials on site. This Act has laid the groundwork for allowing remediation of solid and hazardous waste sites containing soils through bioremediation, or combinations of biotreatment and more conventional physical methods.

Environmental Remediation, Inc. is a leader in the development of technologies involving the biological degradation of hazardous wastes found in soils. A number of biological remediation technologies have been used in demonstration or in full-scale on contaminated soils. Although in-situ treatment by stimulation of the naturally occurring bacterial population has been widely used, this process is usually slow. ERI has developed technologies which utilize commercially enhanced bacterial products and specially designed waste handling procedures to reduce the degradation time.



*Soil Biodegradation Field Demonstration/Day 3*

### APPLICATION

#### INTRODUCTION

A Fortune 500 chemical company had a 30,000 cubic yard surface impoundment classified by the Louisiana Department of Environmental Quality as a RCRA facility. The principal constituents were aromatic chemicals including phenol, cumene, acetophenone, benzene, benzyl alcohol, tars, vinyl chloride, and styrene. A bioremediation closure was designed using excavation and above-ground treatment in biological closure unit (BCU). The soil residual was treated to specified postclosure limits and will be placed in the original impoundment and capped.

#### LABORATORY SIMULATION AND FIELD CLOSURE DESIGN

The closure plan was developed after six months of bench-scale piloting and five months of field demonstration work treating 20 cubic yards of soil. A seed culture was developed using organisms adapted to the wastes at the site. Microbe Masters, Inc., an ERI affiliate, manufactured liquid inoculum which was sprayed onto the contaminated soil during the closure.

An EPA precedent was used to construct the



*Soil Biodegradation Field Demonstration/Day 40*

temporary closure facility without TSD permits. Its construction featured 80 mil HDPE liners and a leak detection system. Aeration was achieved through weekly tilling of the site, and moisture was maintained using a sprinkler system developed for this closure. The contaminated soil was treated in lifts composed of a maximum of 12" of soil per lift. Phenol levels of less than 10.0 mg/kg were used to determine reloading events. New lifts were added and mixed with seeded materials from the previous lift to decrease acclimation time required before full scale biodegradation proceeded.

During the field demonstration phase, air monitoring showed low potential for hydrocarbon release outside the BCU. High ring levees, moisture control covers, and masking were used to control emissions. Air monitoring stations were placed inside the BCU at the decontamination pad and outside the BCU. No detectable hydrocarbons were noted outside the BCU throughout the closure activities.

## RESULTS

Below is a table illustrating biodegradation times for each lift:

Lift #	Initial Phenol/ppm	Soil Volume/cy.	Time in days to attain <10mg/kg phenol
1	137.3	3000	78 days
2	24.3	3500	7 days
3	15.2	3500	14 days
4	13.0	4800	10 days
5	35.0	3800	10 days

## CONCLUSIONS

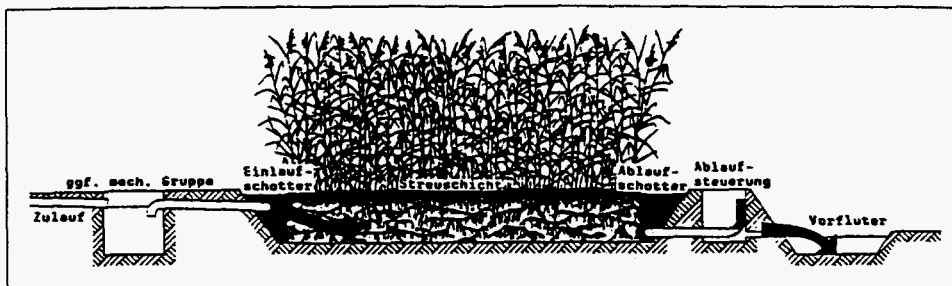
Soil with heavy phenol contamination was remediated under RCRA regulatory programs. Adapted bacterial cultures were used to speed the process of biodegradation. ATP analyses performed on samples taken prior to the addition of bacteria showed  $2.4 \times 10^3$  organisms/ml of soil preparation. After the addition of bacteria, these numbers rose to  $1.0 \times 10^6$  organisms/ml, and additional bacteria were added to maintain that level.

Phenol degradation rate varied depending on its concentration in the soil, and temperatures during the closure affected degradation time. Temperatures during lifts 3 and 4 were 5-15°C colder than other lifts. All lifts were closed well before scheduled completion. The absence of notable air emissions surrounding the site throughout the closure indicates that the material was biodegraded and not volatilized.



For more information please contact:

Environmental Remediation, Inc.  
 P.O. Box 45212-210  
 Baton Rouge, LA 70895  
 (504) 665-1903



## KLÄRTEICHTECHNIK

### Biologischer Abbau persistenter Schadstoffe

Schadstoffe, die bisher als nicht abbaubar galten, können biologisch aus dem Abwasser entfernt werden, wie z.B. polycyclische Aromaten (Benzpyren), chlororganische Verbindungen (PCB, HCH, DDT), sulfonierete Aromaten (Reaktivfarbstoffe), stickstoffhaltige Aromaten (Nitrobenzol) und anorganische Schwefelverbindungen (Sulfat, Sulfid).

Dies wird erreicht, wenn Filterung, chemische Fällung und biologischer Abbau nicht hintereinander geschaltet sind, sondern gleichzeitig und verzahnt innerhalb einer Klärstufe ablaufen. Die gegenseitige Unterstützung der Prozesse ist auch kostensenkend. Hierzu werden die komplexen Strukturen und Regelkreisläufe der Natur genutzt – durch Errichtung eines künstlichen Ökosystems.

Wesentliche Vorteile der Base-tech-Anlage: anpassungsfähig an unterschiedliche Betriebsbedingungen, geringer Steuerungsaufwand, dadurch betriebssicher, bedienungsfreundlich, wartungsarm und daher besonders wirtschaftlich. Einsatzgebiete dieser Anlage sind Abwässer oder Teilabwässerströme aus Textil- und Lederveredelungsbetrieben, Druckereien, Lackierbetrieben, Papierfabriken, Brauereien, Kellereien, chemischer und pharmazeutischer Industrie oder Deponiesickerwässer.

Die Abwasserreinigungsanlagen sind für Konzentrationen von wenigen mg/l bis zu 20 000 mg CSB/l und 4 000 mg Stickstoff/l geeignet und werden für Abwasserdurchsätze von ca. 1 m<sup>3</sup>/d bis zu mehreren 10 000 m<sup>3</sup>/d gebaut.

BASE-TECH

317

**BASETECH**

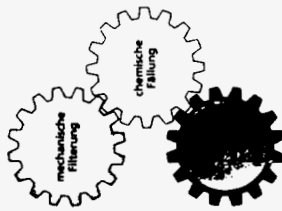
Dr.-Ing. Margarita Winter  
Lilienthalstraße 7-25  
3500 Kassel  
Telefon (0561) 544 10  
Telefax (0561) 573829

# BASETECH

# Die überzeugenden Vorteile



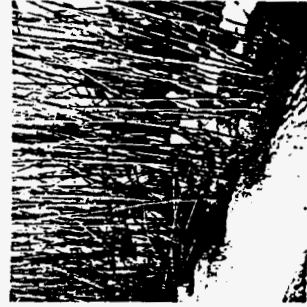
BASE TECH-Anlagen schließen mechanische Filtration, chemische Fällung und biologischen Abbau in einer Klärstufe zusammen. Diese Verzahnung sorgt für effektive Reinigung und senkt die Kosten.



- › Sie zeigen ungewöhnlich hohe Prozessstabilität; eine Bemessung, die auf winterliche Verhältnisse ausgelegt ist, garantiert eine ganzjährige Klärleistung.
- › Sie produzieren keine Klärschlämme, die teuer entsorgt werden müssen.



Ökotechnische Kläranlagen werden harmonisch in ihre Umgebung eingebunden.



- › Es entstehen meist keine Kosten für Energie, für chemische Zusätze, für elektronische Steuerung — BASE TECH-Anlagen arbeiten »vollautomatisch« wie die Natur.
- › Lange Standzeiten (über 50 Jahre) und verschleißfreies Arbeiten durch Selbstregeneration gewährleisten ebenfalls geringe Betriebs- und Wartungskosten.
- › Übrigens: Mit BASE TECH-Anlagen können auch viele Industrieschlämme entwässert und vererdet werden.

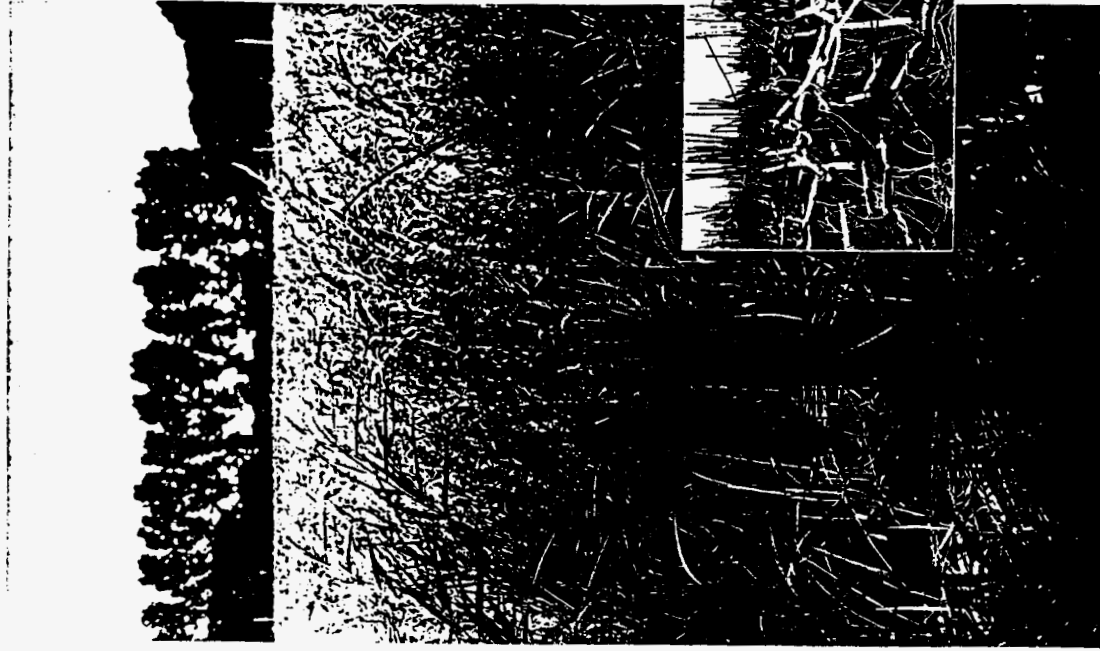


**BASE TECH**

...damit Sie in Ihren Abwasserproblemen nicht untergehen.

# Klare Verhältnisse

durch ökotechnische Abwasserreinigung



Eine ökotechnische Kläranlage in Betrieb.

**BASE TECH**

...damit Sie in Ihren Abwasserproblemen nicht untergehen.

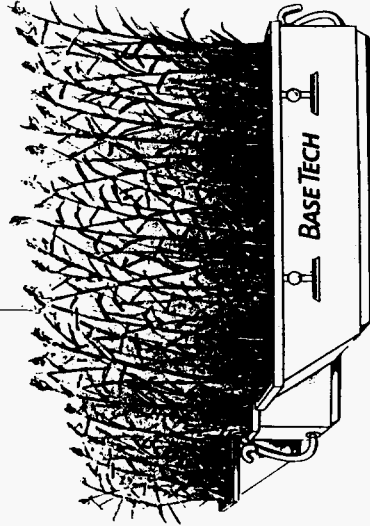
# Die individuelle Planung

**Einmalgestaltete Anlagen, die sich an Ihre Bedürfnisse anpassen.**

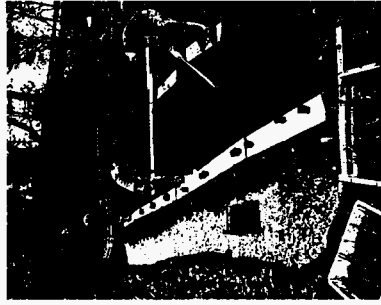


Im Rahmen unserer auf den speziellen Bedarfsfall zugeschnittenen Planung bieten wir Ihnen:

- Analyse Ihres Abwassers.
- Pflanzen- und Bodentests, damit optimale Voraussetzungen geschaffen und später optimale Ergebnisse erzielt werden.
- Praxistest vor Ort mit mobilen Pilotanlagen, begleitet von unserem Labor-Fahrzeug und unterstützt durch unser leistungsfähiges Umweltlabor.



Einbringen des speziellen Bodens auf die Dichtungsfolle

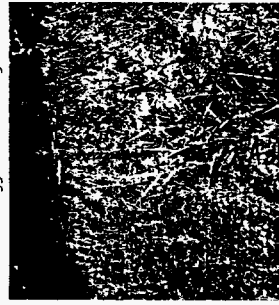


Bepflanzen einer Neuanlage

- Lieferung von sofort einsatzfähigen Kompaktanlagen für kleinere Abwassermengen oder Teilabwasserströme.
- Genehmigungplanung, Ausschreibung und Bauaufsicht bei größeren Vorhaben.
- Betreuung der Anlage in der Einführphase, damit sich das Reinigungsbiotop nach Ihren und unseren Vorgaben entwickelt.

Die langjährigen positiven Betriebserfahrungen basieren auf jahrzehntelanger Forschungs- und Entwicklungsarbeit.

Eine soeben fertiggestellte Kläranlage



# Sauberes Wasser ist kostbar.

**Wir stellen Ihren Beitrag für die Zukunft sicher.**



## Unser Leistungsangebot:

- Analyse und Begutachtung von Schadensfällen
- Umweltgerechte Optimierung Ihres Betriebes
- Umweltverträglichkeitsprüfungen
- Komplett-Entsorgungsanlagen für Abwasser, Schlamm, Altlasten
- Entwicklung betriebspezifischer Lösungen
- Beratung bei der finanziellen Förderung umwelttechnischer Investitionen

BASE TECH bietet Ihnen chemische Beurteilung, biologische Konzeption und ingenieurtechnische Umsetzung aus einer Hand und klärt so Ihren Fall im Gesamtzusammenhang.

BASE TECH  
Dr.-Ing. Margarita Winter  
Lilienthalstraße 7-25  
D-3500 Kassel  
Telefon (0561) 54410  
Telefax (0561) 54898

**BASE TECH**

...damit Sie in Ihren Abwasserproblemen nicht untergehen.

**BASE TECH**

...damit Sie in Ihren Abwasserproblemen nicht untergehen

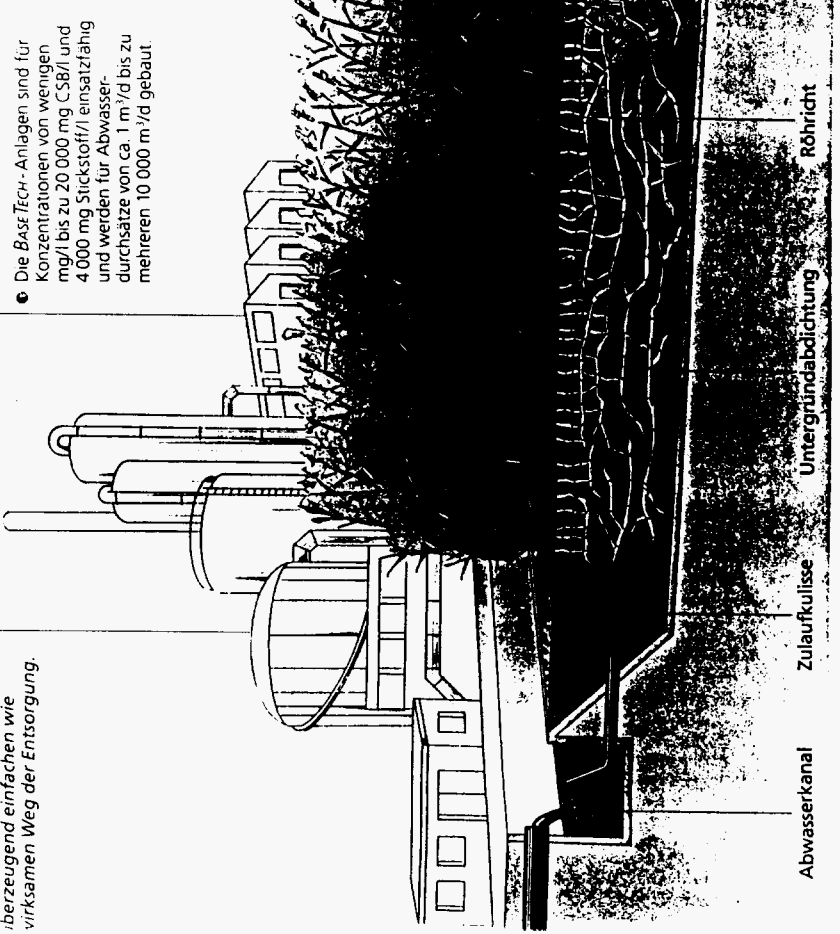
# Das konsequente Verfahren

Argument



- Zum Beispiel bei Abwasserbelastungen, die herkömmlichen Klärverfahren Schwierigkeiten bereiten.
  - Zum Beispiel bei Unternehmen, die ihre Abwassergebühren senken möchten.
  - Zum Beispiel für räumlich abgelegene Abwasserproduzenten wie Mülldeponien.
- Unser Verfahren ist geeignet für Abwässer oder Teilabwasserströme aus der
- Nahrungsmittelproduktion
  - Mineralölverarbeitung
  - Chemischen Industrie
  - Textilveredlung
  - Papierindustrie
  - Metallverarbeitung
- und aus vielen weiteren Bereichen
- Die Base Tech - Anlagen sind für Konzentrationen von wenigen mg/l bis zu 20 000 mg CSB/l und 4 000 mg Stickstoff/l einsatzfähig und werden für Abwasserdurchsätze von ca. 1 m<sup>3</sup>/d bis zu mehreren 10 000 m<sup>3</sup>/d gebaut.

**Sie haben Abwasserprobleme?**  
Wir bieten Ihnen einen überzeugend einfachen wie wirksamen Weg der Entsorgung.



# Die ökotechnische Entsorgung

Argument



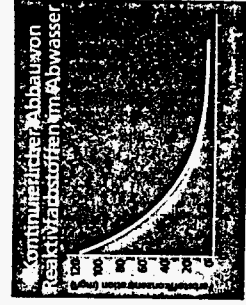
Das Base Tech-Verfahren baut auf der biochemischen Leistungsfähigkeit eines durchwurzelten Bodens auf.

Dieser kann Schadstoffe festhalten, konzentrieren und aktivieren, so daß sie für den Abbau durch Bakterien und Pilze zugänglich werden.

Das Wurzelsystem versorgt die Mikroben mit Sauerstoff und sichert die Wasserleitfähigkeit des Bodens.

100 mal mehr spezialisierte Mikrobenarten als bei herkömmlichen Klärverfahren können sich hier auf die unterschiedlichsten Abwasserarten einstellen.

So schafft das Base Tech-Verfahren die günstigsten Voraussetzungen auch für die Entfernung von Problemstoffen, zum Beispiel:



- schwerabbaubare Organika wie chlorierte Kohlenwasserstoffe, polyzyklische, stickstoff- oder schwefelhaltige Aromaten, Reaktivfarbstoffe u. a.
- Schwefelverbindungen wie Sulfid und Sulfat
- Stickstoffverbindungen wie Ammonium und Nitrat
- Phosphat
- Schwermetalle
- pathogene Keime (Krankheitserreger).

## TRAITEMENT DES EFFLUENTS GAZEUX

Les émissions de produits dans l'atmosphère peuvent avoir différentes origines: naturelles ou biogéniques, par exemple les produits de décomposition et de minéralisation de la matière organique ; antropogéniques, résultantes d'activités industrielles.

La diversité des molécules émises est grande mais souvent les nuisances olfactives proviennent de dérivés hydrocarbonés et de composés azotes et soufrés.

Du fait de leur diversité, les composés odorants ne peuvent être présentés de manière exhaustive. Le tableau 1 donne quelques exemples de produits odorants émis par les industries chimiques et pétrochimiques.

Le tableau suivant présente les composés soufrés le plus souvent rejetés dans l'air, les seuils de perception en mg/m<sup>3</sup> ou en vpm (cm<sup>3</sup> de polluant par m<sup>3</sup> de gaz).

Industrie	Sources d'odeurs	Nature des odeurs
Raffineries	Gaz et systèmes de récupération de gaz	SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> , hydrocarbures acides organiques, aldéhydes et mercaptans
	Catalyse des fluides	SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , aldéhydes, hydrocarbures
	Chaudières	SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, aldéhydes, hydrocarbures
Industrie Chimique	Production d'engrais et de phosphates	NH <sub>3</sub> , aldéhydes, SO <sub>2</sub>
	Acide Phosphorique	SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, aldéhydes et autres odorants
	Soude	NH <sub>3</sub>
Inorganique	Acides nitrique, sulfurique et chaux	NH <sub>3</sub> , aldéhydes, SO <sub>2</sub>
Industrie Chimique Organique	Chimie organique	Mercaptans, NH <sub>3</sub> , hydrocarbures, SO <sub>2</sub> , acides organiques et autres odorants
	Peintures	NH <sub>3</sub> , hydrocarbures, SO <sub>2</sub> , aldéhydes, acides organiques et autres odorants
	Plastiques	NH <sub>3</sub> , hydrocarbures, SO <sub>2</sub> , aldéhydes, acides organiques
	Caoutchoucs	NH <sub>3</sub> , hydrocarbures, SO <sub>2</sub> , aldéhydes, acides organiques
	Savons, détergents	NH <sub>3</sub> , hydrocarbures, SO <sub>2</sub> , aldéhydes, acides organiques et autres colorants
	Textiles	NH <sub>3</sub> , hydrocarbures, SO <sub>2</sub> , aldéhydes, acides organiques et autres colorants

Tableau 1 : Exemples de produits odorants dans les industries chimiques et pétrochimiques



Polluant	Formule	Seuil de perception	
		mg. m <sup>-3</sup>	vpm
Allyl disulfure	H <sub>2</sub> C = CH. CH <sub>2</sub> - S H <sub>2</sub> C = CH. CH <sub>2</sub> - S	1 . 10 <sup>-4</sup>	6 . 10 <sup>-5</sup>
Allyl mercaptan	H <sub>2</sub> CHCH <sub>2</sub> SH	5 . 10 <sup>-5</sup>	1,5 . 10 <sup>-4</sup>
Disulfure de carbone *	CS <sub>2</sub>	7,7 (20)	23 (60)
Diméthyl sulfure	H <sub>3</sub> C - S - CH <sub>3</sub>	2 . 10 <sup>-2</sup>	5,1 . 10 <sup>-2</sup>
Ethyl mercaptan	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> SH	1,6 . 10 <sup>-5</sup> (10)	4 . 10 <sup>-5</sup> (25)
Ethyl sulfure	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> S C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	2,5 . 10 <sup>-4</sup>	9,2 . 10 <sup>-4</sup>
Hydrogène sulfuré	H - SH	1,1 . 10 <sup>-3</sup> (10)	1,5 . 10 <sup>-3</sup> (15)
Methyl mercaptan	H <sub>3</sub> C SH	1,1 . 10 <sup>-3</sup> (10)	2,2 . 10 <sup>-3</sup> (20)
Propyl mercaptan	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> SH	7,5 . 10 <sup>-5</sup>	2,3 . 10 <sup>-4</sup>
Sulfure dioxyde	SO <sub>2</sub>	30 (5)	79 (13)

\* Les seuils maximaux acceptables sont indiqués entre parenthèses ().

Tableau 2 : Nature des composés odorants soufrés (W SUMMER, 1975)

#### Remarque :

Le dioxyde de soufre est un cas particulier du fait que le seuil de perception d'odeur est supérieur au seuil de toxicité. Sans être perçu, sa présence dans l'air à certaines concentrations peut être dangereuse pour la santé.

Si les odeurs émises dans l'atmosphère représentent une gêne pour le voisinage, elles ne constituent pas nécessairement un danger car les seuils d'initiation sont souvent beaucoup plus élevés que les seuils de perception (Tableau 3).

En Hollande, plus de 20 % de la population subit des nuisances liées aux odeurs provenant des activités industrielles, de la circulation, de l'agriculture, des activités domestiques des ménages.

Substance odorante	Seuil olfactif vpm	Seuil d'irritation vpm
Allyl mercaptan	5 $10^{-5}$	150
Benzyl mercaptan	26 $10^{-4}$	4,5
Thiophénol mercaptan	26 $10^{-5}$	8

Tableau 3 : Perception et irritation (W. SUMMER, 1971)

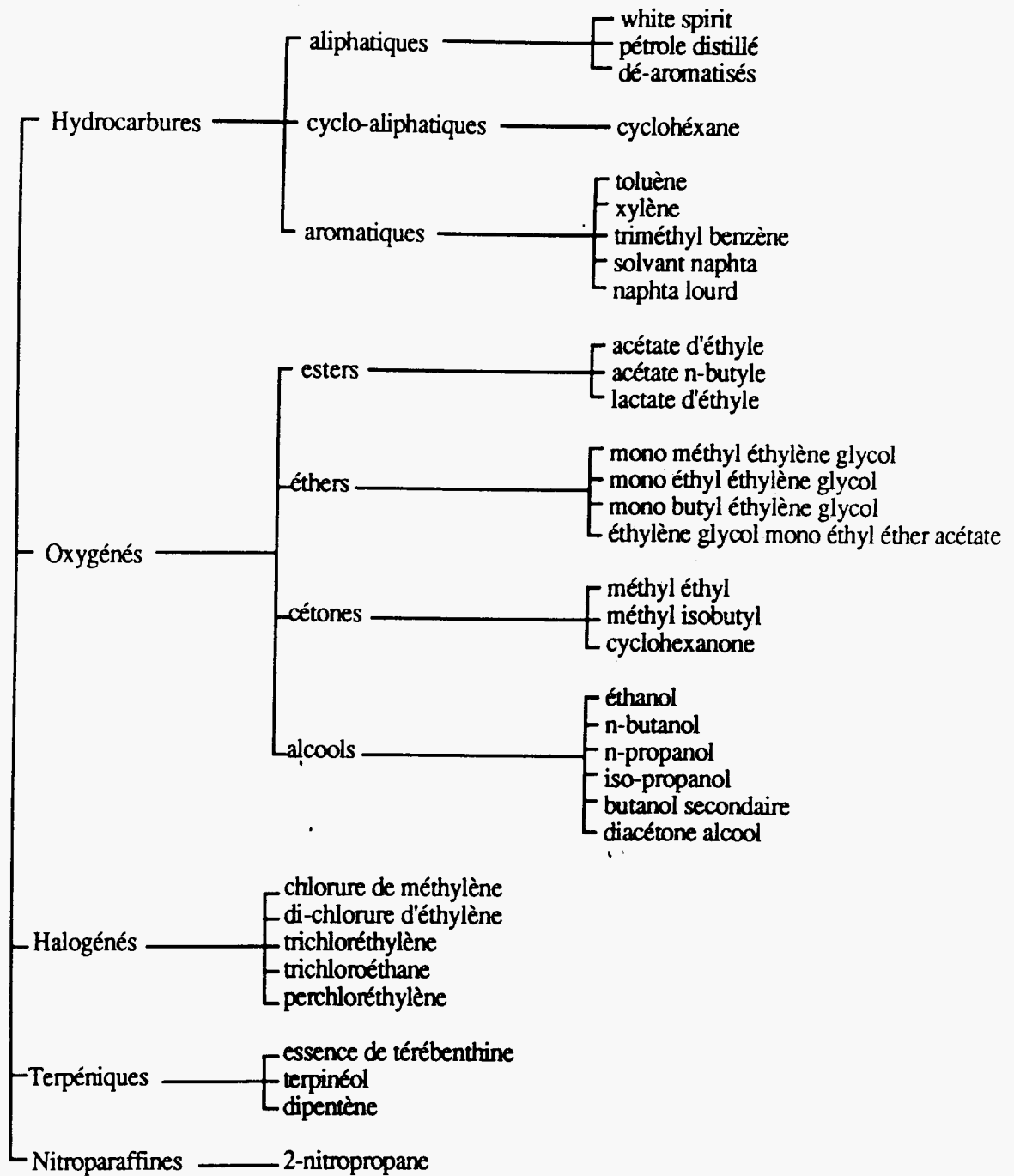
Les molécules organiques ou minérales soufrées ou azotées constituent avec les solvants organiques les solvants importants de l'air. Les solvants jouent un rôle capital dans tous les processus chimiques et peuvent influencer fondamentalement une réaction. Leurs propriétés les conduisent à être employés dans de nombreuses branches industrielles.

Ce tableau montre que les solvants restent et resteront irremplaçables dans un grand nombre de procédés. Les domaines de l'impression et des peintures sont de grands consommateurs de solvants.

Dans les peintures, le solvant a un rôle physico-chimique majeur. Il doit satisfaire à trois critères essentiels :

- dissoudre le liant,
- donner des solutions répondant aux spécifications requises (viscosité, point éclair),
- avoir des caractéristiques d'évaporation/retention appropriées.

Il est d'usage d'employer des mélanges de solvants plutôt que des solvants purs. Dans l'industrie des peintures, les solvants représentent en moyenne 16 % en valeur et 35 % en tonnage, et comme ils ne participent pas à la formation du film proprement dit, il en résulte un gaspillage importante de matières premières.



Principaux solvants organiques utilisés dans les peintures

SOLVANTS	TENSION DE VAPEUR à 20°C MM HG	VOLATILITE RELATIVE AC. BUTYLE 100	APPLICATION
<b>ALCOOLS</b>			
Méthanol	97	590	Encres colorantes
Ethanol	44	330	Encres nitrocellulosiques
Isopropanol	33	230	Encres polyamidiques
Propanol n	14	110	Encres polyamidiques
Butanol n	4.4	50	Retardateur
<b>ESTERS</b>			
Ac. d'éthyle	76	620	Encres nitrocellulosiques
Ac. d'isopropyle	47	500	Encres nitrocellulosiques
Ac. de propyle n	24	276	Encres nitrocellulosiques
Ac. d'éthyle - glycol	1.7	21	Retardateur
<b>CETONES</b>			
Méthyléthylcétone	71	570	Encres vinyliques
Méthylisobutylcétone	16	160	Encres vinyliques
<b>ETHERS de GLYCOL</b>			
Méthylglycol	6.2	70	Retardateur
Ethylglycol	4.0	40	Retardateur
Méthoxy propanol	8.0	83	Retardateur
Ethoxy propanol	4.1	49	Retardateur
<b>GLYCOLS</b>			
Monoéthylèneglycol	0.05	1	Retardateur
Diéthylèneglycol	0.01	1	Retardateur
<b>HYDROCARBURES ALIPHATIQUES</b>			
Essence C	85	350	Encres édition
Essence E		240	Encres édition
Essence F	2 - 20	30 - 170	Encres polyamidiques
White spirit	1	10	Retardateur
<b>HYDROCARBURES AROMATIQUES</b>			
Toluène	22	210	Encres édition
Xylène	5.1	60	Retardateur
<b>HYDROCARBURES CHLORES</b>			
Trichloréthylène	60	620	Encres caoutchouc
Perchloréthylène	14	280	Chlore
<b>HYDROCARBURES NITRES</b>			
2 nitropropane	12.9	125	Diluant

### Principales applications des solvants dans le domaine de l'impression

Ces polluants atmosphériques peuvent constituer des substrats pour les microorganismes qui peuvent être utilisés dans l'épuration des gaz à la source d'émission.

## LES TECHNOLOGIES

Les technologies sont souvent divisées en deux groupes différents, l'un relié plus précisément à la désodorisation, accompagnée d'une biodégradation des molécules incriminées, l'autre à la dégradation des solvants.

Les **procédés connus de bio-épuración des effluents gazeux** chargés en molécules polluantes organiques facilement ou difficilement biodégradables sont basés essentiellement :

- sur les deux phénomènes physiques que sont l'absorption et l'adsorption ;
- sur le maintien d'une population microbienne sélectionnée capable de biodégrader les polluants considérés.

Les procédés actuels sont divisés en trois groupes, en fonction de la nature de la flore microbienne et de la phase aqueuse.

FLORE MICROBIENNE	PHASE AQUEUSE	
	Mobile	Stationnaire
En suspension	Biolaveur (bioscrubber)	
Immobilisée	Biolaveur à cellules fixées (trickling filter)	Biofiltre (biofilter)

La bioépuración de gaz implique donc la mise en contact biomasse/substrat. Les composés à dégrader sont en général peu concentrés et plus ou moins hydrosolubles.

Le contact est réalisé de la façon suivante :

produits hydrosolubles :

gaz → phase aqueuse → microorganisme

Ce transfert peut être appliqué aussi bien avec des cellules en suspension qu'avec des cellules immobilisées. Dans le cas de l'utilisation de cellules sur des supports adsorbants, une régénération périodique du support est à prévoir.

produits non hydrosolubles :

La biomasse utilisée dans les biolaveurs sert parfois de support pour les substrats. D'autres techniques ont été développées : elles mettent en oeuvre une phase organique intermédiaire. Le transfert se fait de la façon suivante :

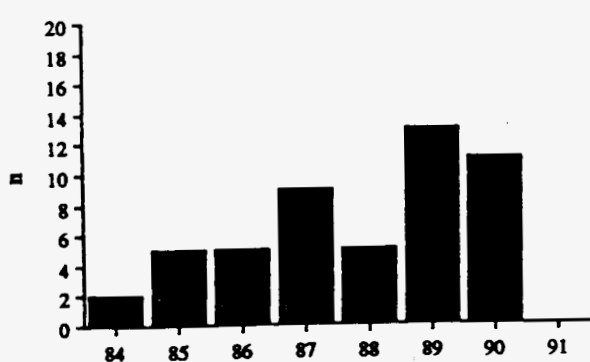
gaz → phase organique → phase aqueuse → microorganismes

Les schémas de principe des biofiltres et biolaveurs sont donnés ci-dessous. Ils permettent de résumer les différentes techniques rencontrées.

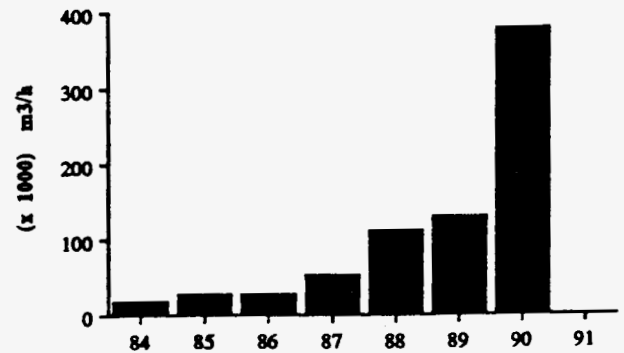
Dans le cas de la désodorisation, les concentrations typiques en composés soufrés (H<sub>2</sub>S Mercaptan) varient entre 10 et 200 mg/m<sup>3</sup> et celles en composés azotés (ammoniac aminés) entre 10 et 300 mg/m<sup>3</sup>.

Dans le cas de solvants organiques, les concentrations peuvent atteindre des valeurs beaucoup plus élevées mais pour être compétitifs avec la récupération, l'incinération, les traitements biologiques sont réservés à des gaz ayant des teneurs inférieures à 2 g/m<sup>3</sup>.

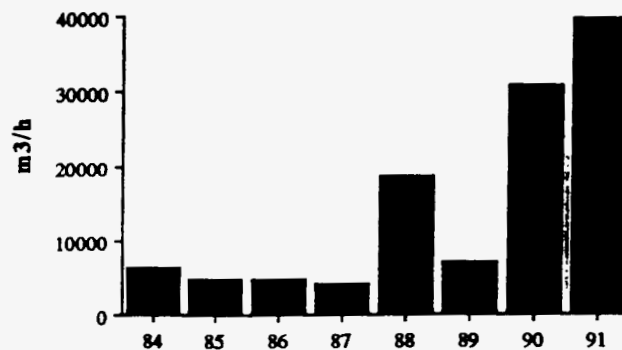
Une étude hollandaise permet de résumer le développement commercial des biofiltres.



Nombre de biofiltres vendus annuellement par deux importantes compagnies néerlandaises.



Débit gazeux traité par biofiltres, vendus annuellement par deux importantes compagnies néerlandaises.



Taille moyenne des biofiltres en m<sup>3</sup>/h de gaz traité, vendus annuellement par deux importantes compagnies néerlandaises.

## LES PERFORMANCES ET LES INVESTISSEMENTS

Le traitement des effluents gazeux par voie biologique est caractérisé par des installations simples induisant des coûts de fonctionnement faibles. En moyenne le coût de traitement est compris entre 1,5 à 12 F par 1000 m<sup>3</sup> de gaz à des concentrations en solvant comprises entre 0,01 et 5 g/m<sup>3</sup>. Cette dernière concentration représente la limite supérieure à ne pas dépasser.

Les coûts, les installations sont répertoriés dans les tableaux suivants.

Comparison of Costs for Various Odor Control Systems

Treatment Alternative	Capital Cost	O&M Cost per Year	Annualized Cost
BIKOVENT System Biofilter	\$68,800	\$5,110	\$17,630
Traditional Biofilter	\$97,300	\$7,870	\$25,750
Ozone	\$81,180	\$20,300	\$38,780
Wet Scrubber	\$84,180	\$25,530	\$45,850
Catalytic Incinerator	\$76,860	\$31,280	\$51,900
Thermal Incinerator	\$79,370	\$45,100	\$69,720
Activated Carbon	\$139,940	\$59,480	\$97,690

- Notes:
1. All costs in 1988 dollars.
  2. O&M costs increase at 6.0% per year.
  3. Estimated project life for all alternatives is 10 years.
  4. Interest rate is 10.0% per year.
  5. O&M labor included only for BIKOVENT and Ozone.

Calculs effectués pour un débit d'air de 10000 cfm avec une concentration entrante en H<sub>2</sub>S de 20 ppm et de 1 ppm à la sortie.

reference process	[14] investment cost <sup>a</sup> DM/(m <sup>3</sup> /h)	operational cost <sup>a</sup> DM/1000m <sup>3</sup>	[21] total cost <sup>b</sup> DM/1000m <sup>3</sup>	[18] total cost <sup>c</sup> Dfl/1000m <sup>3</sup>	[13] investment cost <sup>d</sup> Dfl/(m <sup>3</sup> /h)	operational cost <sup>d</sup> Dfl/1000m <sup>3</sup>
Incineration						
- Thermal	12-14	1.4-1.7	9.1 <sup>e</sup>	7 - 9 <sup>f</sup>	25 - 150	2.5 - 25
- Catalytic	14-16	1.3-1.5	-	6 - 8 <sup>f</sup>	30 - 100	2.5 - 20
Adsorbtion	5-20	0.5-1.0	1.5 <sup>g</sup>	14 - 18 <sup>h</sup>	- 10 - 100	1 - 2 <sup>i</sup> 2 - 10 <sup>j</sup>
Absorbtion	8-10	0.8-1.0	4.2 <sup>k</sup>	-	10 - 30 <sup>l</sup> 30 - 100 <sup>n</sup>	0.5 - 2 <sup>m</sup> 2 - 5 <sup>o</sup>
Ozone oxidation	6-8	0.4-0.6	4.2	-	-	-
Biofilter open closed	3-10	0.3-0.5	0.6	- 0.5 - 3	- -	0.5 - 5 0.5 - 5
Bioscrubbing	-	-	-	-	10 - 40	2 - 5

a) application not specified; price level 1979

b) composting works; price level 1974

c) VOC 100-2000 mg/m<sup>3</sup>; Gas flow 10.000 m<sup>3</sup>/h; price level 1991

d) depending on gas flow and energy recovery; price level 1991

e) fuel cost only

f) including 50% energy recovery;

g) including regeneration / incineration;

h) including steam regeneration

i) odour emissions < 10mg/m<sup>3</sup>

j) organic solvents

k) chlorine

l) simple systems: flow < 10.000m<sup>3</sup>/h

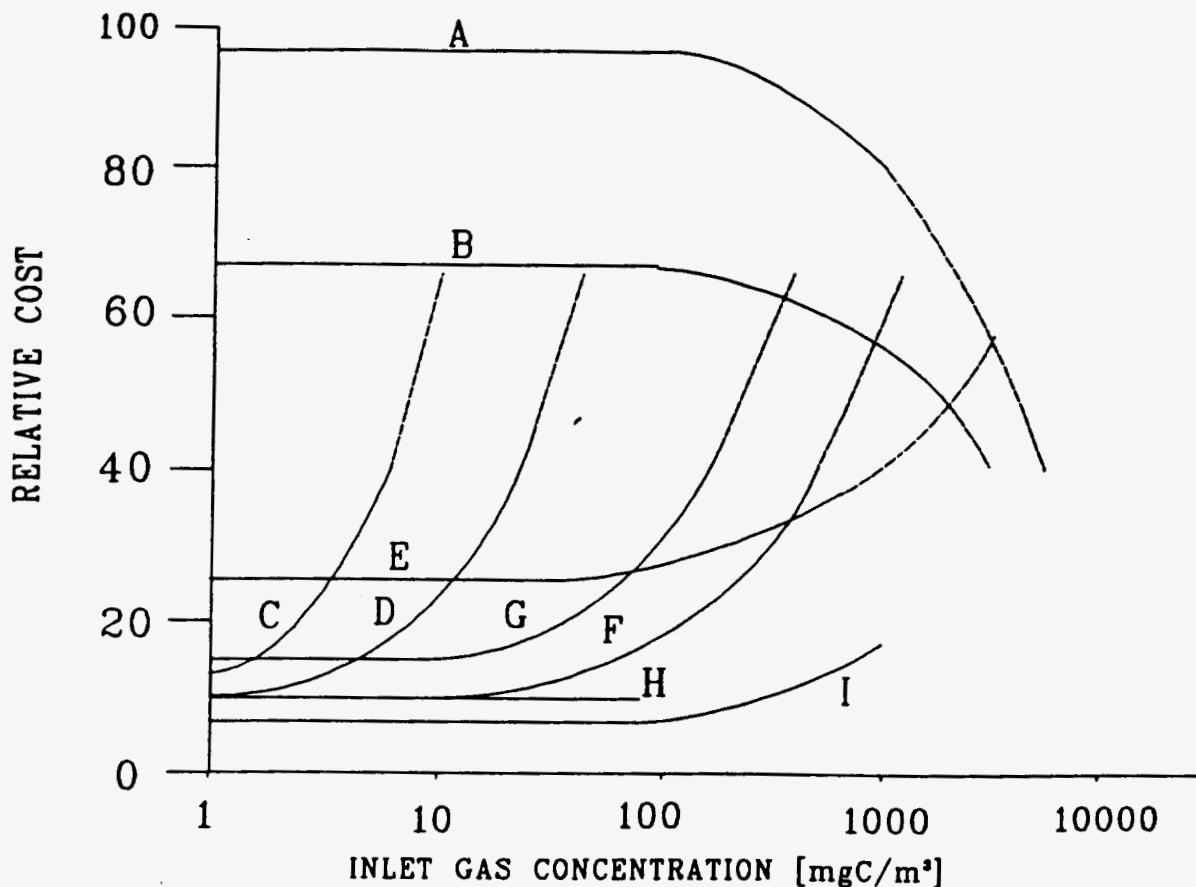
m) water scrubber; no regeneration; concentrations < 100mg/m<sup>3</sup>

n) complex scrubbers: flow 100.000m<sup>3</sup>/h

o) use of oxidants; waste gas concentrations up to 1g/m<sup>3</sup>

Relative capital and operational cost for off-gas purification; Capital cost: per (m<sup>3</sup> waste gas/h) (related to the gas flow); operational cost given per 1000m<sup>3</sup> of gas waste treated.





Comparison of the relative cost, based on gas volume treated, of several waste gas purification techniques [35]: gas flow = 40000m<sup>3</sup>/h; price level 1982; A) Thermal incineration (incl. heat recovery); B) Catalytic incineration (incl. heat recovery); C) Active carbon adsorption (no regeneration); D) Active carbon adsorption (incl. regeneration); E) Adsorption with thermal carbon incineration; F) Water scrubber; G) Chemical oxidation; H) Bioscrubber; I) Biofilter (compost).

Application	Gas Flow [m <sup>3</sup> /h]	Elimination of	Number of stages (a)	Residence time [s](b)	Efficiency [%]
Gelatine production	35000	od./n.s.	0.6-1	12-21	70-93
Cocoa & Choc. proc.	10000	od./n.s.	2	22	99
Fishmeal factory	40000	od./230 mgC/m <sup>3</sup>	1	20	50-90
Tobacco ind.	30000	od./NH <sub>3</sub> (1.5 mg/m <sup>3</sup> ) nicotine (3.5 mg/m <sup>3</sup> )	2	14	95
Waste water treatment	10000	od./H <sub>2</sub> S (10 mg/m <sup>3</sup> ) acetone (8 mg/m <sup>3</sup> )	2	29	90-95
Flavour&Fragrance ind.	25400	od. (10 <sup>5</sup> o.u./m <sup>3</sup> ) <sup>*</sup>	2	22	98
Paint prod.	11700	org.s. (1.8 mg/m <sup>3</sup> )	2	38	90
Pharmaceutical plant	75000	org.s.(aromatics, aliphatics, chlorinated compounds)	3	108	80
Photo film production	140000	org.s. (400 mg/m <sup>3</sup> )	2	30	75
Food proc. ind.	9000	od. oil (10 <sup>5</sup> o.u./m <sup>3</sup> )	2	20	93
Ceramics prod.	30000	ethanol	1	8	98
Metal Foundry	40000	benzene (9 mg/m <sup>3</sup> )	1	30	96

Abbreviations: od.: odours; n.s.: not specified; org.s. ; organic solvents; o.u. : odour units.  
(a): height of a filterbed stage usually 1m; (b): total superficial residence time;

Examples of full-scale biofilter applications in different branches of industry.

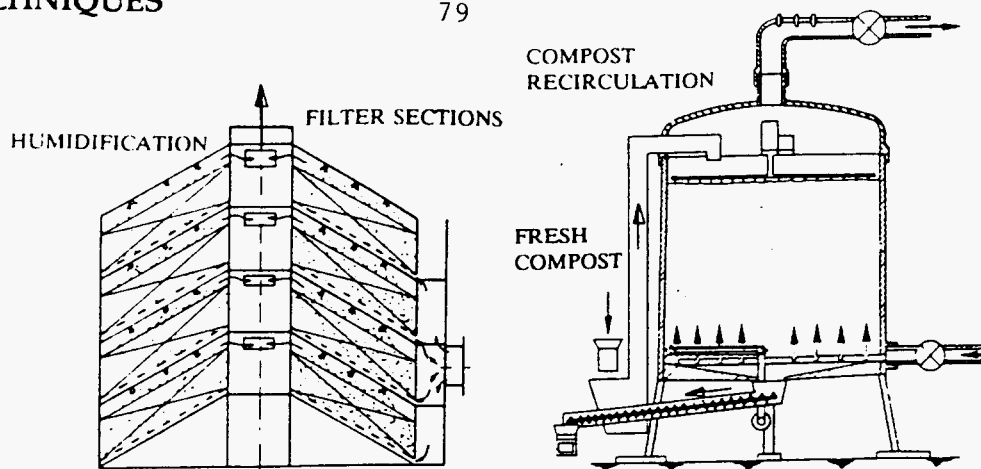


Figure 1.5a-b: A closed biofilter system, in which a continuous humidification of the filterbed is applied (Fig 5a 1 ). A design, which allows for the continuous refreshment of the compost, has also been presented (Fig 5b 2 ).

Figure 1.5 a) : Biofiltre avec humidification en continu du lit filtrant.  
b) Dispositif continu pour renouvellement du compost

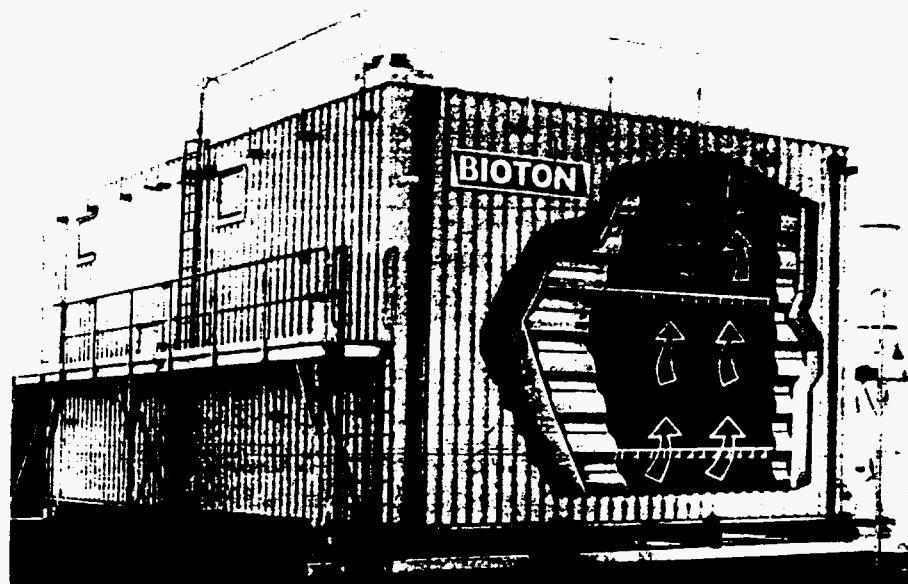


Figure 1.6: A closed biofilter system, which is insulated for temperature and humidity control. In a pretreatment section, the inlet gas is almost completely humidified, while fine solids are removed

Figure 1.6 : Biofiltre contrôlé en humidité et température. Dans la section prétraitement le gaz est humidifié et séparé des particules

1 Zantropp H. (1978), German patent, nr. 2.6.52.673.

2 Kneer F.X. (1976), German patent, nr. 2.4.45.315.

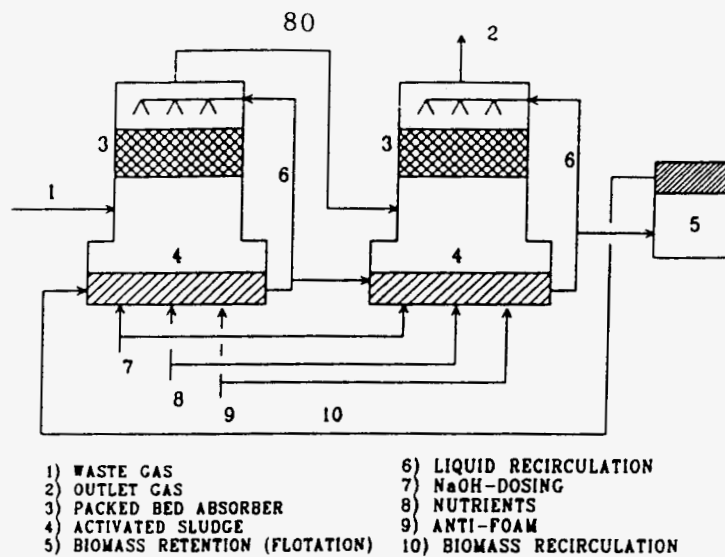


Figure 1.7: A two-stage packed bed bioscrubber system, consisting of an absorption and regeneration (activated sludge) tank within each unit [3 4].

Figure 1.7 : Biolaveur à deux étages à boue activée et garnissage

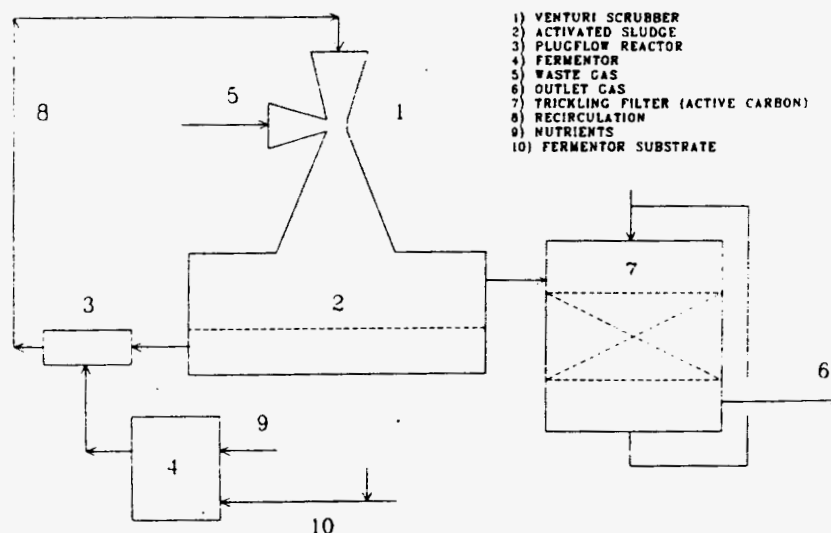
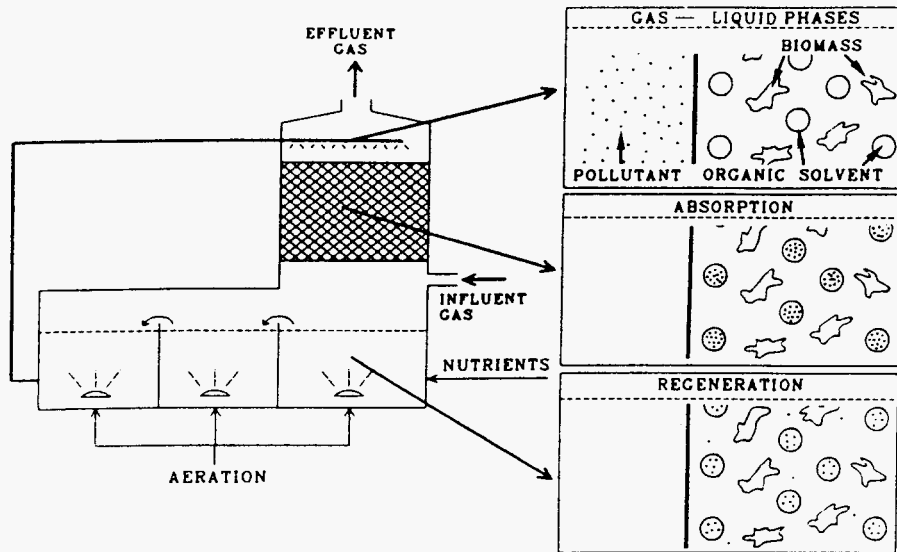


Figure 1.8: Set-up of a bioscrubber system using a venturi scrubber for the gas liquid mass transfer [5].

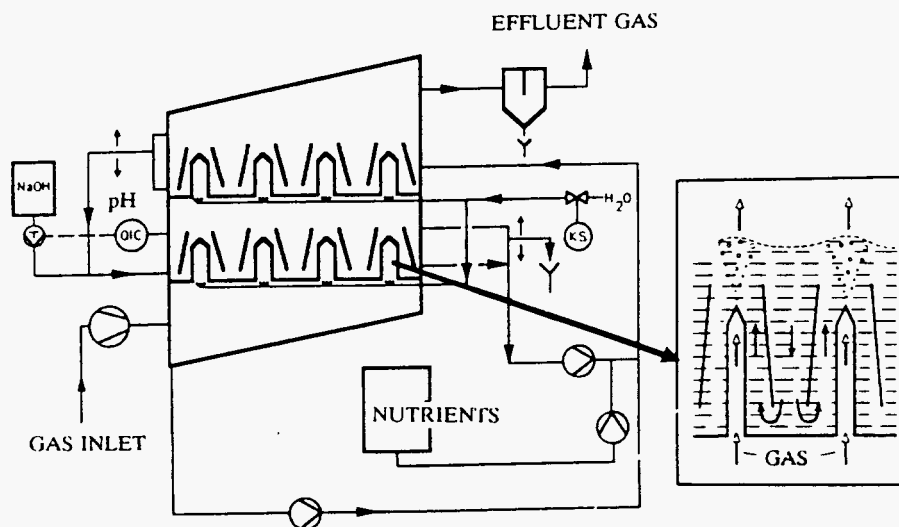
Figure 1.8 : Biolaveur de gaz à venturi utilisé pour le transfert gaz liquide

- 3 VDI-Richtlinie Biowäscher (1985), VDI-3478, Beuth Verlag, Berlin.
- 4 Schmidt F. (1986), European patent, nr. 0-1330222.
- 5 Schippert E. (1989), Biowäscher nach einer Dosenlackieranlage. VDI-Berichte 735, VDI Verlag Düsseldorf, 78-88.



**Figure 1.9:** For the removal of compounds with a high partition coefficient, an emulsion of a high-boiling organic solvent (phthalates or silicone oils [ 6 7 .]) in water can be applied in a bioscrubber.

**Figure 1.9 :** Biolaveur utilisant un tiers solvant



**Figure 1.10:** A modified plate column as a bioscrubber system, in which the gas-liquid contact results in a mass transfer of the compounds and an internal liquid recirculation [ 8 .].

**Figure 1.10 :** Colonne à plateaux utilisée comme biolaveur

- 6 **Schippert E.** (1989), Das biosolv Verfahren von Keramchemie zur Absorption von schwer wasserlöslichen Lösemitteln. VDI-Berichte 735, VDI Verlag Düsseldorf, 161-177.
- 7 **Lebeault J.M.** (1989), Biological purification of waste gases and waters in a multiphasic bioreactor. Abstr. Forum for appl. Biotechn., Gent, Belgium, 27 September, 20.
- 8 **Wolff F.** (1989), Biologische Abluftreinigung mit einem neuen Biowäscherkonzept, VDI-Berichte 735, VDI Verlag Düsseldorf, 99-107.

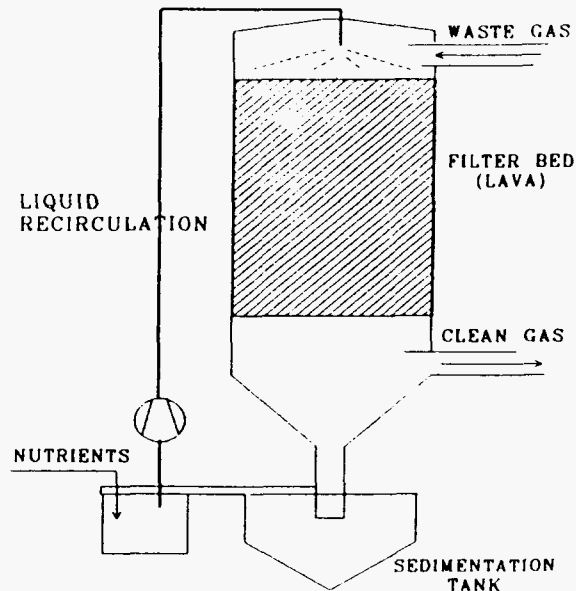


Figure 1.11: A biological trickling filter for the 'reinigung von luft-oder sauerstoffhaltigen Gasgemischen, die biologisch zerstörbare Riech- und/oder feststoffe enthalten...' [ 9].

Figure 1.11 : Biofiltre pour l'épuration des gaz

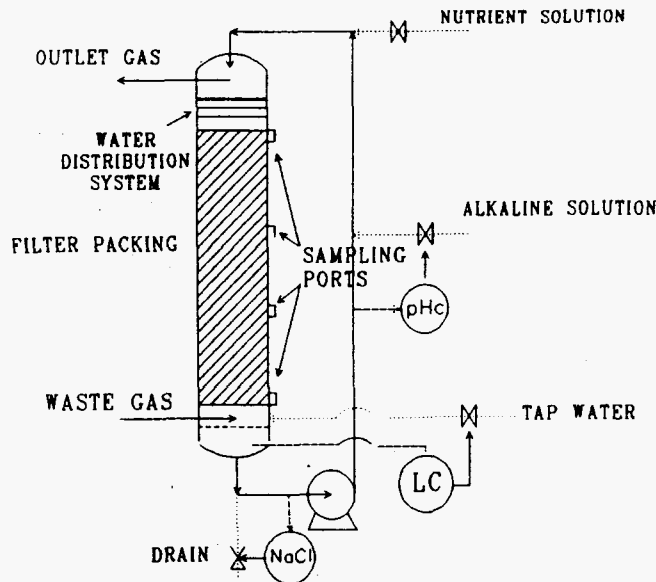


Figure 1.12: Experimental set-up of a biological trickling filter system. The packing material consists of conventional packing elements [10,11].

Figure 1.12 : Montage de laboratoire d'un filtre biologique

- 9 Prüss M., Blunk H. (1941), German patent, nr 710954, appl. 1934.
- 10 Diks R.M.M., Ottengraf S.P.P. (1991), Verification studies of a simplified model for the removal of dichloromethane from waste gases using a biological trickling filter; Part I, Bioproc. Eng., 6, 93-99.
- 11 Diks R.M.M., Ottengraf S.P.P. (1991), Verification studies of a simplified model for the removal of dichloromethane from waste gases using a biological trickling filter; Part II, Bioproc. Eng., 6, 131-140.

# réacteur air/liquide à mélange externe

## application à la réalisation de réaction biologique aérobie

De nombreuses réactions biologiques demandent, pour assurer le développement des micro-organismes, un apport d'oxygène associé à un mélange intime des phases gazeuse et liquide permettant un bon transfert.

Différents procédés sont utilisés à l'heure actuelle pour réaliser cet apport et ce transfert.

De natures souvent diverses et faisant appel à des appareillages variés, ces procédés reposent pour la plupart sur un apport d'air ou d'oxygène sous agitation au sein même du réacteur.

L'évolution prévisible des traitements biologiques et en particulier ceux sur lit immobilisé (micro-organismes fixés ou adsorbés sur un support) demande la mise au point de nouveaux types de réacteurs permettant :

- L'amélioration du transfert par création d'un mélange gaz/liquide plus homogène et sa réalisation dans un volume aussi réduit que possible (taux de circulation important).

- La réalisation de ce transfert dans un milieu triphasique (gaz/liquide/solide) c'est-à-dire autorisant les micro-organismes immobilisés sur un support.

L'étude de ces différents critères par un partenaire industriel SAPS, spécialisé dans la construction de réacteur gaz/liquide, travaillant en association avec le Laboratoire de Biotechnologie de l'Université de Compiègne, a permis la mise au point d'un réacteur à mélange externe dit procédé « Emulsair » que nous présentons ici.

### Réacteur biologique Emulsair.

#### Description et principe de fonctionnement

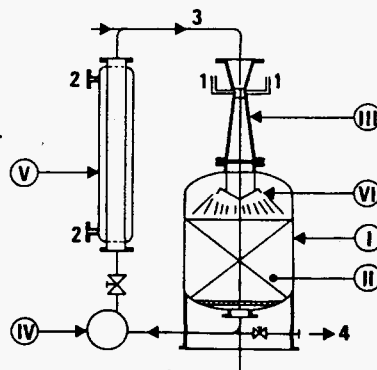
Le principe de ce réacteur repose sur l'utilisation d'un mélangeur externe du type venturi (schéma 1) assurant l'arrivée dans le réacteur d'une véritable émulsion constituée entre l'air d'apport et le liquide traversant le venturi.

L'air est aspiré au voisinage du col grâce à l'effet d'auto-aspiration créé

par la variation de vitesse du liquide en circulation dans le convergent du venturi.

Le schéma 1 et la photo 1 représentent l'ensemble du dispositif constitué :

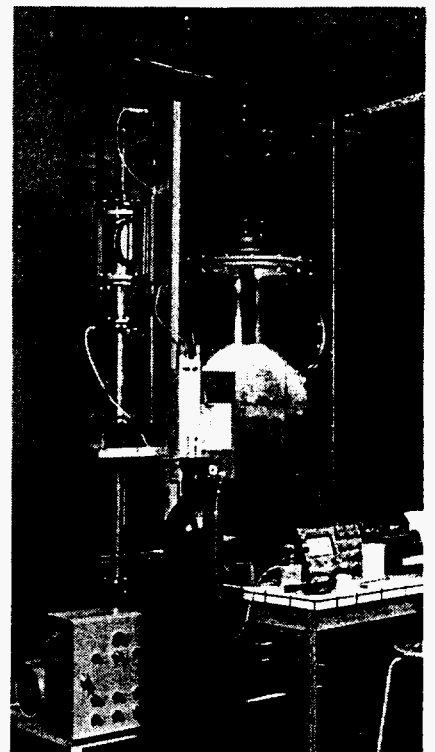
— du réacteur proprement dit, dimensionné pour assurer un temps de séjour convenable au produit à traiter. Selon la transformation biologique à réaliser, ce réacteur peut être du type cuve ouverte (pour le traitement biologique d'eaux usées



- I : Réacteur
- II : Garnissage éventuel
- III : Venturi
- IV : Pompe de circulation
- V : Echangeur éventuel
- VI : Distributeur interne

- 1 : Entrée des gaz
- 2 : Entrée et sortie de liquide de refroidissement
- 3 : Apport de liquide à traiter
- 4 : Sortie de liquide traité

Schéma 1



## réacteur air/liquide à mélange externe

par exemple) ou cuve fermée (pour des réactions exigeant un milieu parfaitement isolé).

— du mélangeur venturi  
— d'une pompe de circulation assurant à partir du pied du réacteur l'alimentation du venturi.

Le fonctionnement est possible en circuit fermé en discontinu ou en circuit ouvert avec apport et départ permanents de produit à traiter (tableaux 1 et 2).

La circulation permanente du liquide à travers la boucle constituée à partir du réacteur, de la pompe et du venturi facilite grandement le fonctionnement et le contrôle du réacteur.

La régulation précise de température et de pH pourra ainsi être facilement réalisée :

— en intercalant un échangeur entre la pompe et le venturi (schéma 1)

— en plaçant une électrode de pH en dérivation entre le refoulement de la pompe et un retour au bac.

Un dispositif de rupture de l'émulsion sera placé dans le réacteur,

Tableau 1

Étude sur réacteur pilote de 100 litres

Dégradation d'une solution à 55 g/l de saccharose

Fonctionnement en circuit ouvert

— Taux de dilution :  $0,1 \text{ h}^{-1}$

— Sucre résiduel : 1,4 g/l

— Productivité en biomasse : 3 g/l/h

— Apport d'oxygène par kW/h : 2 kg

Tableau 2

Épuration de jus de fermentation (fabrication de choucroute) Sté Christ

Caractéristiques du produit :

— acidité lactique : 12 à 20 g/l

— pH d'entrée : 3,6 à 3,8

— Température d'entrée : 5 à 20°

— DB05 : 30 à 60 g/l

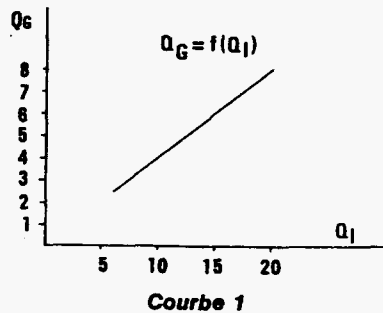
Traitement en circuit fermé sur un réacteur de 3 m<sup>3</sup>

— Puissance absorbée : 4,8 kW/h

— Biomasse produite : 36 kg

— Remontée du pH à 7 et réduction de 80 % de la DB05 en 4 h (l'objectif était de ramener le pH de la saumure à neutralité avant rejet).

— Apport d'oxygène par kW/h : 1,9 kg



permettant le passage à travers la pompe d'un liquide transférable sans difficulté.

Ce matériel ainsi décrit a été, avant son utilisation industrielle, soumis à un grand nombre d'essais permettant la vérification de ses caractéristiques, essais résumés rapidement ci-dessous :

### Études hydrodynamiques

Des mesures nombreuses et systématiques du débit de gaz aspiré, de la puissance consommée et de l'oxygène transféré, en fonction du débit de liquide à partir de différents dimensionnements du réacteur, du venturi et des orifices d'entrée d'air, ont permis de mieux définir et de commencer à optimiser l'appareil au point de vue énergétique.

La courbe 1 indique les quantités de gaz introduites en fonction du débit de liquide dans le domaine d'utilisation de l'appareil.

La courbe 2 caractérise le débit de gaz introduit en fonction de la puissance mise en jeu pour différentes vitesses de circulation et met bien en évidence l'influence des dimensions géométriques de l'appareil sur les performances obtenues.

Ces différentes études hydrodynamiques ont permis de déterminer quelques données fondamentales de l'appareil, à savoir :

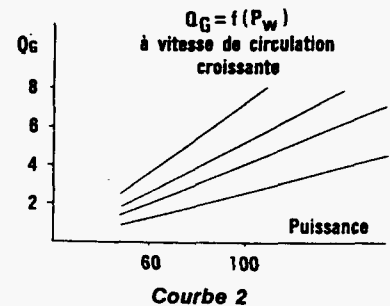
• Le rapport débit de gaz/débit de liquide en volume :

$$\frac{Q_G}{Q_L} \approx 0,4$$

• L'énergie consommée par m<sup>3</sup> de liquide en circulation :

$$P_v \approx 8 \text{ Watt}$$

Les mesures de transfert d'oxygène en milieu chimique (sulfite) ou en milieu de culture vont montrer que



ce transfert est directement lié au débit de liquide ou plutôt au taux de circulation T : (débit de liquide/volume du réacteur).

### Étude en présence de micro-organisme

Les possibilités du système ont été systématiquement testées lors de la croissance d'un micro-organisme sur milieu synthétique.

Le saccharose constituant le substrat.

Le micro-organisme étant une levure (*Candida tropicalis*)

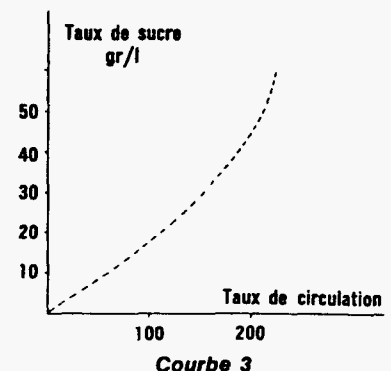
La réaction a été menée en circuit ouvert en faisant varier :

— le taux de saccharose dans le liquide d'apport

— le débit de recirculation

— le temps de séjour du liquide en circulation dans le réacteur et ceci avec différentes géométries du matériel comme il a été fait pour l'étude hydrodynamique.

La courbe 3 résume en partie cette étude en précisant le taux de recirculation T ou le débit nécessaire





pour obtenir la réduction à plus de 95 % du sucre présent.

Cette courbe définit donc, dans ces conditions, le débit de recirculation nécessaire en fonction de la demande en oxygène.

Le tableau 1 précise pour un taux de sucre déterminé, les consommations énergétiques qui en découlent, l'appareil étant correctement dimensionné.

Le tableau 2 résume les résultats obtenus à partir d'une réaction à échelle industrielle (réacteur de 3 m<sup>3</sup>) et montre que les consommations énergétiques relevées sont comparables.

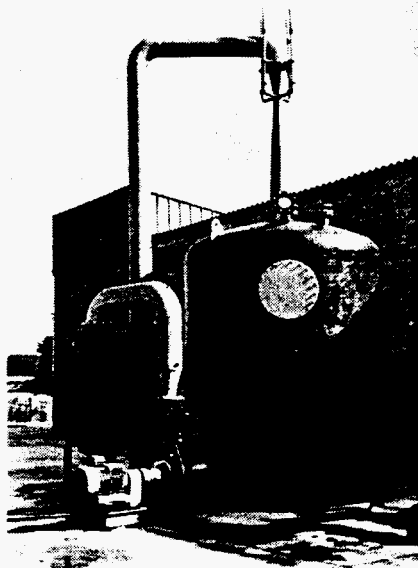
L'apport d'oxygène obtenu au cours de différents essais exprimé en kg par m<sup>3</sup> de réacteur et par heure va jusqu'à 3 sans que nous ayons atteint les limites de l'appareil.

On voit par ces premiers résultats que l'on pourra aisément et avec une extrapolation fiable dimensionner le réacteur en fonction de la demande prévue en oxygène.

#### Possibilités et applications

Les performances indiquées ci-dessous montrent que l'on obtient avec ce type de réacteur

— un transfert important pour une consommation énergétique donnée et pour un volume de réacteur relativement réduit.



— une disposition permettant l'implantation de lit immobilisé.

Le mélange air/eau étant en effet réalisé à l'extérieur du réacteur, la mise en place à l'intérieur d'un support (charbon actif, garnissage, etc.) permet d'exploiter les propriétés spécifiques des micro-organismes immobilisés.

Les critères que nous nous étions fixés au début de cette étude ont donc été atteints et permettent la réalisation d'un réacteur performant.

Des essais menés avec lit immobilisé soit en traitement d'eau de féculeries soit en fabrication de vinaigre montrent que l'on doit, par ces méthodes, pouvoir réduire notablement les temps de réactions obtenus par des méthodes classiques.

D'autres essais sont en cours pour le traitement des eaux de pressage de drèches de brasserie et de lavage de conserverie de légumes.

A la suite de cette étude et de ces essais, le matériel a été utilisé industriellement.

Le tableau 2 et la photo 2 illustrent l'une de ces utilisations sur laquelle la méthode de dimensionnement et d'extrapolation s'est trouvée amplement justifiée.

Ces différents exemples montrent que les applications de ce réacteur découlent de ses différentes performances indiquées ci-dessus et on l'utilisera avec profit dans les principaux domaines suivants :

- Traitement biologique des eaux et particulièrement des eaux à très forte demande en oxygène rencontrées dans un grand nombre d'industries agro-alimentaires, pour résoudre efficacement et économiquement des problèmes de dépollution.
- Réalisation de réactions biologiques orientées vers un objectif de dépollution associée à la valorisation de déchets agricoles (élaboration de protéines).
- Fermentation avec cellules libres ou immobilisées.
- d'une façon plus générale dans tous les domaines où le besoin d'un matériel fiable, à action rapide, facilement contrôlable et d'un fonctionnement très simple se fait particulièrement sentir.

Les activités de la Société SAPS ont été reprises par la Société MURGLE-SEIGLE du Groupe ROBATEC, 9 Boulevard Monge, 69330 MEYZIEU.

Monsieur d'Alençon      Tél : 78 31 41 95  
                                    Fax : 72 02 73 04

Les laboratoires du Professeur MARTIN de l'Ecole Supérieure de Chimie de Rennes et ceux de J.M. LEBEAULT se sont regroupés pour travailler sur la dépollution des effluents gazeux. Ces deux laboratoires travaillent en collaboration avec SAPS. Un réacteur du type présenté fonctionne à la Société ORIL à BOLBEC pour la dépollution d'effluents aqueux contenant de la morpholine.

Le rapport des débits gazeux  $Q_G$  et liquide  $Q_L$  définit le type de venturi.

$Q_G/Q_L < 1$  : venturi à émulsion pour le traitement des effluents aqueux

$Q_G/Q_L > 10$  : venturi à jet pour le traitement d'effluents gazeux

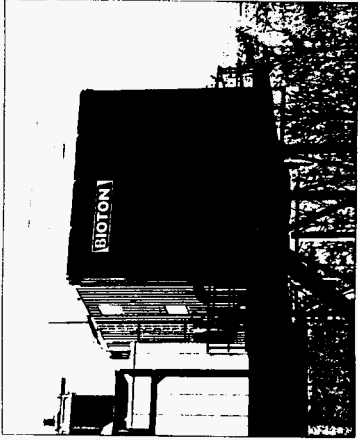
## En bref

Le filtre BIOTON est une installation industrielle d'épuration d'air utilisant la capacité des micro-organismes de détruire les polluants.

En faisant appel à des souches bactériennes sélectionnées en fonction des composés à traiter et ayant une grande capacité d'adaptation à la fréquence et à la concentration de ces composés, il est possible de traiter une large gamme d'effluents industriels. Outre les odeurs de diverses provenances et les composés simples, on peut traiter efficacement des composés organiques complexes comme les aromatiques.

Par rapport aux techniques classiques d'incinération ou de lavage, le filtre BIOTON a l'avantage de coûts de fonctionnement extrêmement bas grâce à sa faible consommation d'énergie et une conduite parfaitement automatisée, ce qui minimise l'entretien.

En outre, cette technique ne se contente pas de transférer une pollution d'air vers une pollution d'eau.

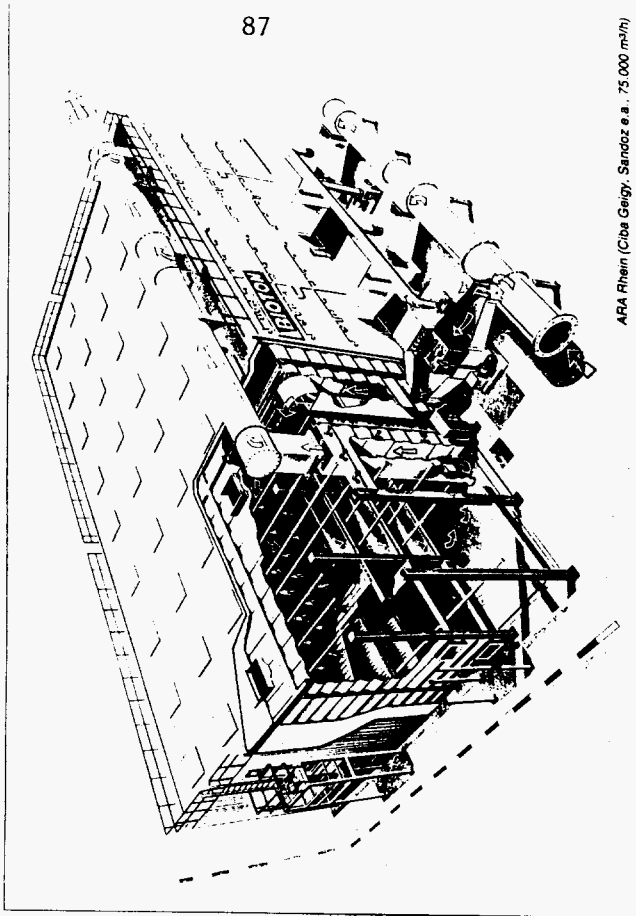


IFF, Tilburg (13.000 m<sup>3</sup>/h)

# BIOTON®

## FILTRATION BIOLOGIQUE

### Épuration d'effluents gazeux industriels au moyen de micro-organismes



87

ARA Rhein (Ciba Geigy, Sandoz e.a.), 75.000 m<sup>3</sup>/h

## Élimination d'odeurs ainsi que des composés organiques volatils et acidifiants

Adresse postale:  
ClairTech b.v.  
Boîte postale 8022  
3503 RA Utrecht  
Pays-Bas

Bureau:  
Groenewoudsedijk 5M, Utrecht  
Téléphone + 31 30 94 83 94  
Téléfax + 31 30 93 75 29

# CLAIRTECH

## Filtration biologique

La filtration biologique est une technique d'épuration des effluents gazeux industriels, par laquelle les composés indésirables sont éliminés grâce à des micro-organismes.

L'air à épurer passe à travers une série de couches filtrantes dans lesquelles sont fixés les micro-organismes. Après leur absorption dans le lit filtrant, les polluants sont décomposés sous l'action des bactéries et transformés en composés inoffensifs: CO<sub>2</sub>, vapeur d'eau et sels minéraux.

CLAIRTECH a accumulé une vaste expérience dans la maîtrise de cette technique outre les connaissances fondamentales des mécanismes. Par conséquent,

CLAIRTECH est à même de garantir l'efficacité des filtres BIOTON en fonction des spécifications établies lors de la conception de l'installation. Le rendement, qui peut réellement atteindre 100% est maintenu constant pendant des années de fonctionnement.

## Principe naturel

Le filtre BIOTON est une application industrielle du mécanisme de décomposition micro-biologique qui se produit partout dans la nature. En domestiquant ce processus, il est possible de détruire un grand nombre de composés nocifs ou malodorants.

Ce processus s'accomplit à l'intérieur d'un filtre entièrement fermé, dans des conditions bien définies, conditionnées par un prétraitement adéquat de l'air à épurer. Le filtre BIOTON est applicable au traitement d'un grand nombre d'effluents gazeux industriels.

## Construction et qualité

Le prétraitement des effluents, qui comporte l'ajustement de l'humidité relative et de la température ainsi que le dépoussiérage, s'effectue dans une unité en amont du BIOTON. Dans le filtre lui-même, le gaz est réparti de façon homogène et dirigé à travers les lits filtrants. Les micro-organismes sont choisis en fonction des composés à éliminer et inoculés dans le matériau filtrant lors de sa fabrication. On utilise des souches particulières, comme par exemple *Nocardia* pour traiter le styrène, *Hyphomicrobium* pour le chlorure de méthylène, *Thiobacillus* pour l'H<sub>2</sub>S, ou l'une des nombreuses autres cultures, soit uniques soit en mélange, dont dispose CLAIRTECH.

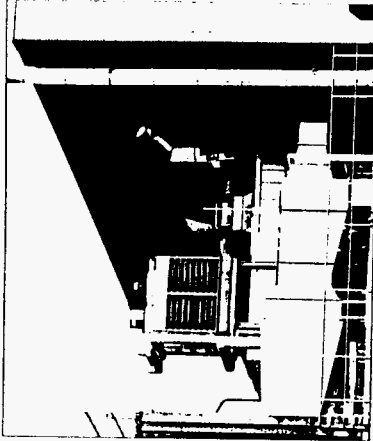
L'air quitte le filtre après avoir été débarrassé de ses composés nuisibles.

Une installation de filtration BIOTON satisfait bien entendu à toutes les exigences en matière d'isolation thermique, de résistance à la corrosion, d'étanchéité et de protection contre le gel.



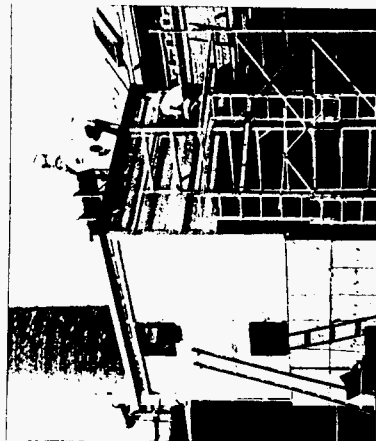
15KV 89.1KX 110P 8002

Micro-organismes



IFF, Tilburg

PFW, Amersfoort



## Principe naturel

Le filtre BIOTON est une application industrielle du mécanisme de décomposition micro-biologique qui se produit partout dans la nature. En domestiquant ce processus, il est possible de détruire un grand nombre de composés nocifs ou malodorants.

Ce processus s'accomplit à l'intérieur d'un filtre entièrement fermé, dans des conditions bien définies, conditionnées par un prétraitement adéquat de l'air à épurer. Le filtre BIOTON est applicable au traitement d'un grand nombre d'effluents gazeux industriels.

## Construction et qualité

Le prétraitement des effluents, qui comporte l'ajustement de l'humidité relative et de la température ainsi que le dépoussiérage, s'effectue dans une unité en amont du BIOTON. Dans le filtre lui-même, le gaz est réparti de façon homogène et dirigé à travers les lits filtrants. Les micro-organismes sont choisis en fonction des composés à éliminer et inoculés dans le matériau filtrant lors de sa fabrication. On utilise des souches particulières, comme par exemple *Nocardia* pour traiter le styrène, *Hyphomicrobium* pour le chlorure de méthylène, *Thiobacillus* pour l' $H_2S$ , ou l'une des nombreuses autres cultures, soit uniques soit en mélange, dont dispose CLAIRTECH.

L'air quitte le filtre après avoir été débarrassé de ses composés nuisibles.

Une installation de filtration BIOTON satisfait bien entendu à toutes les exigences en matière d'isolation thermique, de résistance à la corrosion, d'étanchéité et de protection contre le gel.

## Domaines d'application

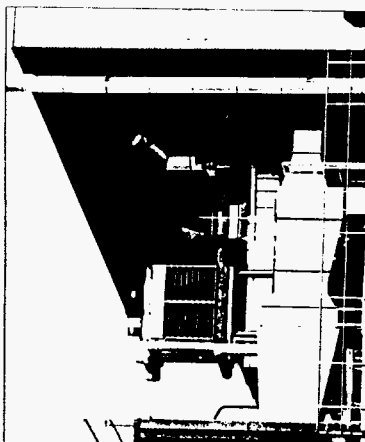
Le champ d'application est très vaste. Grâce à la culture de micro-organismes en fonction des composés à éliminer, il est possible de traiter la plupart des effluents.

Grâce à sa très large gamme de souches bactériennes, CLAIRTECH peut détruire des composés réputés inattaquables jusqu'à présent. La capacité d'adaptation des micro-organismes permet de traiter des composés jusqu'à des concentrations de 5000 ppm.

Parmi les composés qui peuvent être traités avec succès dans un filtre BIOTON, citons les nombreuses espèces de solvants libérés lors de l'application de peintures, dans les imprimeries et les usines mettant en oeuvre des matières synthétiques. Les composés organiques sont également émis par les processus rencontrés dans les raffineries de pétroles et usines pétrochimiques; depuis les alcools jusqu'aux composés aromatiques complexes; la plupart sont décomposés avec un rendement élevé.



Micro-organismes



IFF, Tilburg

PPF, Amersfoort



Les odeurs constituent un autre groupe de polluants que les filtres BIOTON peuvent éliminer, par exemple, celles qui sont émises par les fabriques d'arômes et les parfumeries, ou les filtres BIOTON ont fait leurs preuves.

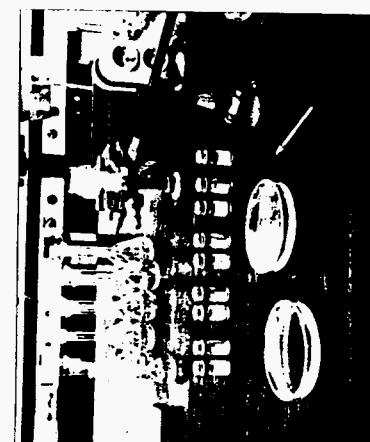
Par ailleurs, les émissions malodorantes des stations de compostage, de traitement des déchets ménagers et industriels, des stations de traitement d'eaux usées, sont parfaitement éliminées.

Grâce à leur conception "sur mesure", au prétraitement de l'air, au matériau filtrant de haute qualité et à la souche bactérienne parfaitement sélectionnée, les filtres BIOTON peuvent éliminer une très large gamme de polluants et ne laisser passer que de l'air pur.

Quest International, Naardén



Laboratoire



# Der Kessler+Luch Biofilter Biovar: Für eine saubere Umwelt

## Hauptverwaltung:

Kessler + Luch GmbH  
 Rathenaustraße 8  
 Postfach 58 10  
 6300 Gießen  
 Telefon (06 41) 7 07-00  
 Telefax (06 41) 7 07-3 16  
 Telex 4 82 864

## Technisches Büro Leipzig:

**O-7021 Leipzig**  
 Dübener Landstraße 100  
 Telefon (Leipzig) 5 51 91  
 App. 230 oder 357  
 Funktelefon (01 61) 2 61 49 41

## Technisches Büro Köln:

**5000 Köln 30**  
 Mathias-Bruggen-Straße 154  
 Telefon (02 21) 59 10 89/80  
 Telefax (02 21) 59 38 04

## Niederlassungen:

**O-1140 Berlin-Marzahn**  
 Allee der Kosmonauten 28  
 Telefon (0 30 37 2) 5 48 04 52

## 2000 Hamburg 63

Alsterdorfer Straße 509  
 Telefon (0 40) 59 11 56/75  
 Telefax (0 40) 59 51 39

## 3000 Hannover 61

Fuhrberger Straße 4  
 Telefon (05 11) 55 60 71  
 Telefax (05 11) 55 58 84  
 Telex 9 23 565

## 4000 Düsseldorf

Joh.-Weyer-Straße 1  
 Telefon (02 11) 3 10 04-0  
 Telefax (02 11) 3 10 04-52

## 4600 Dortmund 1

Kaiserstraße 150  
 Telefon (02 31) 51 57 61  
 Telefax (02 31) 51 57 94  
 Telex 8 22 477

## 6300 Gießen

Rathenaustraße 8  
 Telefon (06 41) 7 07-00  
 Telefax (06 41) 7 07-3 16  
 Telex 4 82 864

## 6800 Mannheim 1

Pettenkofer Straße 22  
 Telefon (06 21) 3 38 18-1  
 Telefax (06 21) 3 38 18-40

## 7000 Stuttgart 61

Hafenbahnstraße 33  
 Telefon (07 11) 32 30 66  
 Telefax (07 11) 32 93 32

## 7900 Ulm

Frauenstraße 65  
 Telefon (07 31) 6 08 91/2  
 Telefax (07 31) 6 08 97

## 8000 München 2

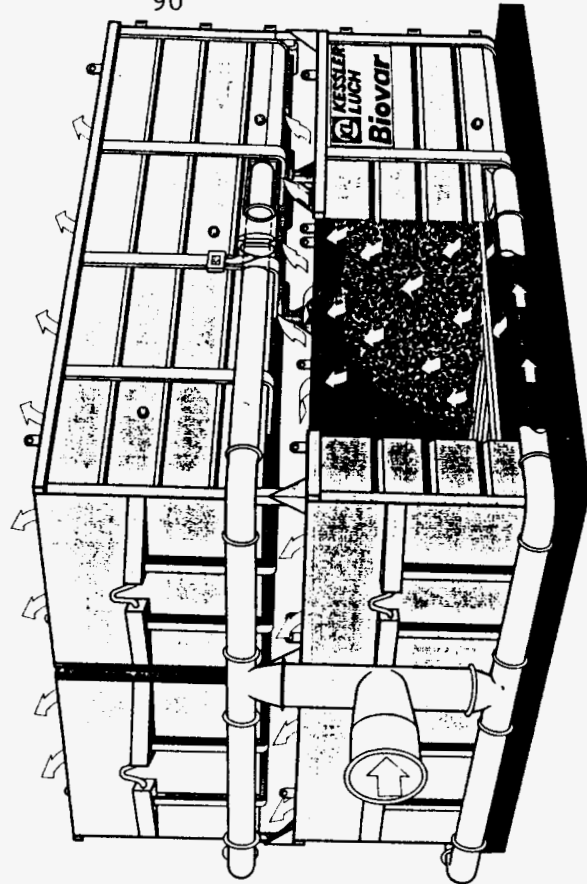
Seidlstraße 8  
 Telefon (0 89) 5 51 60-0  
 Telefax (0 89) 5 51 60-10  
 Telex 5 21 5 293

## O-8010 Dresden

Gamberiusstraße 7  
 Telefon (00 37 51) 43 68 33

## 8500 Nürnberg 50

Münchener Straße 342  
 Telefon (09 11) 8 66 11  
 Telefax (09 11) 86 91 82  
 Telex 6 23 044



# BIOPUR<sup>®</sup>

## Un procédé biologique de désulfuration

Le procédé Biopuric est applicable à la désulfuration du biogaz, du gaz naturel et des gaz industriels.

Le procédé en continu est disponible sous forme standard pour le traitement d'environ 1000 m<sup>3</sup>/h de gaz. Les sous-produits de l'élimination par voie naturelle de l'hydrogène sulfuré sont mieux tolérés par l'environnement.

La réduction des frais de fonctionnement due à la faible consommation d'énergie ainsi qu'à l'économie d'additifs divers est aussi un des avantages du procédé de désulfuration Biopuric.

### Imhausen - depuis 1905

Au cours des dernières années, Imhausen a développé des méthodes et des techniques écologiques de traitement biologique des effluents gazeux et des eaux résiduaires et a mis au point des instruments d'analyse des eaux.

Le procédé Biopuric est un des résultats de ces diverses activités.

Imhausen-Chemie GmbH Lahr  
Galvanoform GmbH Lahr  
Gesellschaft für Automation mbH Bochum  
Kunststoffwerk Lahr GmbH  
IMHICO AG Zürich



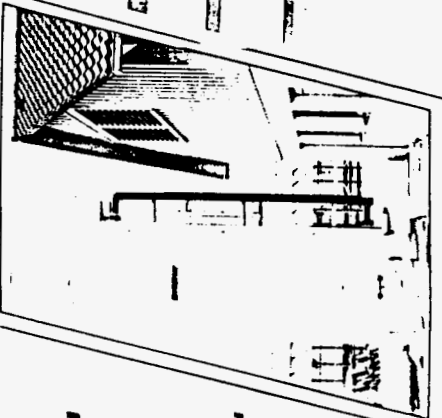
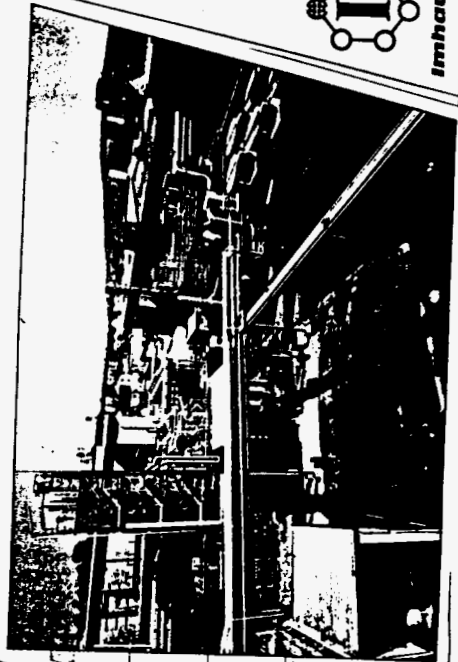
### Imhausen-Chemie GmbH

Recherche  
Développement  
Procédés  
Production  
Licences  
Consulting

### Imhausen-Chemie GmbH

**siège:**  
Kaiserstraße 95, D-7650 Lahr  
Tel.: (78 21) 2786-0  
Telex: 754941 chemie d  
Fax: 271509

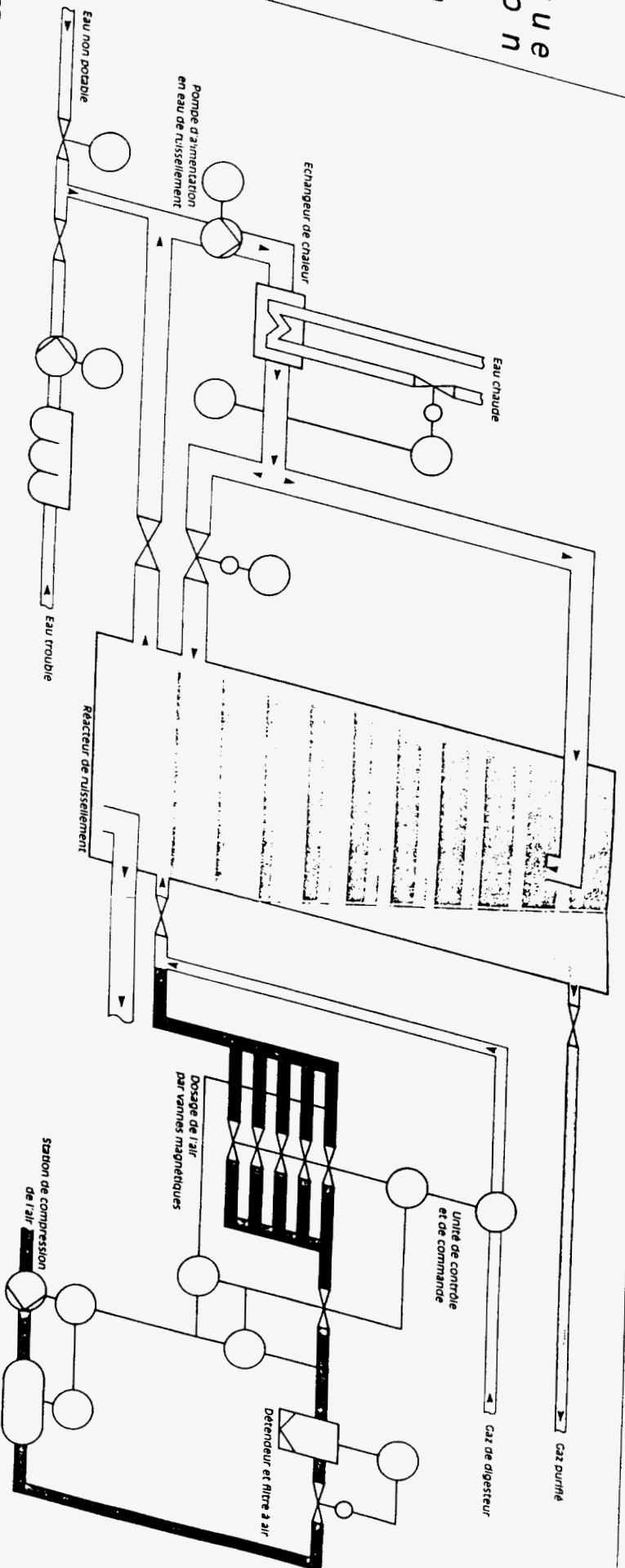
**Production:**  
Raiffeisenstraße 4, D-7630 Lahr  
Tel.: (78 21) 585-0  
Telex: 7 34 956 CWIR d  
Fax: 585 230



# lique ion

ation

gaz.  
3 de



## Principe

Le procédé Biopuric est basé sur le principe de l'oxydation en soufre et en sulfate par voie bactérienne de l'hydrogène sulfuré.

Au gaz brut, contenant de l'hydrogène sulfuré, est mélangé de l'air dans des proportions bien définies. Sur un support est fixé un lit bactérien formé de différentes souches de rhizobactéries. Ces rhizobactéries oxydent l'hydrogène sulfuré présent naturellement en soufre élémentaire.

Le lit bactérien est régulièrement arrosé par un liquide de rinçage qui assure son humidification ainsi que l'évacuation des produits d'oxydation de l'hydrogène sulfuré. Un remplissage spécialement

étudié permet une répartition homogène des gaz et du liquide de rinçage dans tout le réacteur. La croissance de bactéries non désirées est évitée par le contrôle du pH de la solution de rinçage.

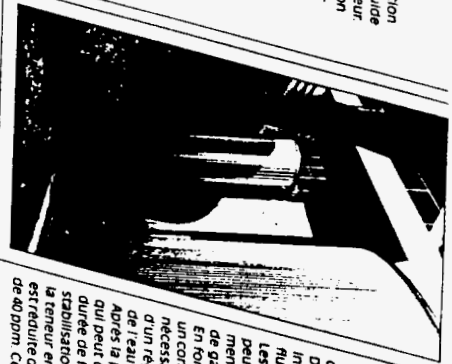
## Expérience

Nos installations de désulfuration s'adaptent dans tous les circuits de toutes les stations d'épuration.

De par leur conception, nos installations intègrent les fortes fluctuations du débit gazeux. Les installations Biopuric peuvent être reliées directement au collecteur central de gaz.

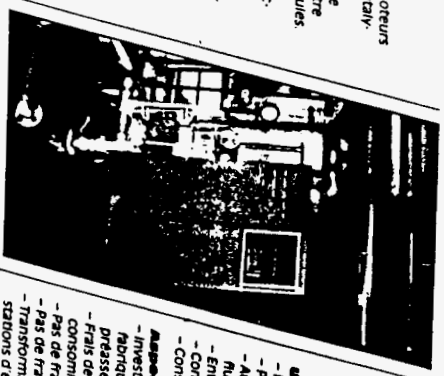
En fonctionnement continu, un contrôle visuel quotidien est nécessaire suivi éventuellement d'un réglage du débit et du pH de l'eau de rinçage.

Après la phase de démarrage qui peut durer jusqu'à 30 jours, la teneur en hydrogène sulfuré est réduite de 7000 ppm à moins de 40 ppm. Cette pureté du gaz



## Technique écologique:

- Procédé biologique
  - Flore bactérienne stable
  - Faible consommation d'énergie
  - Sous-produits mieux cotés par l'environnement
  - Absence de produits résiduels nécessitant un traitement
- Avantages de maintenance:**
- Fonctionnement en continu
  - Pas de changement périodique du garnissage
  - Automatisation complète couvrant les diverses fluctuations de débit et de concentration
  - Entretien et réparations pratiquement nuls
  - Contrôle et commande automatiques du procédé
  - Construction en matériaux résistants à la corrosion
- Avantages économiques:**
- Investissement réduit par l'emploi d'éléments fabriqués en série ainsi que l'utilisation de modules préassemblés
  - Frais de fonctionnement réduits de par la faible consommation d'énergie et l'économie d'additifs
  - Pas de frais pour l'élimination des sous-produits
  - Pas de frais de personnel supplémentaire
  - Transimotion et installation simples dans les stations d'épuration en service





BIBLIOGRAPHIE **Diks R.M.M.**

- Clark W.C. (1989), Managing planet earth. *Scien. Am.* vol. 261,9, 19-26.
- Spectrum Encyclopedie (1980). Uitg. Het Spectrum, Utrecht.
- Bailey R.A. (1978), Chemistry of the environment. Acad. Press Publ. 147-193.
- Alexander M. (1973), *Biotechn. Bioeng.*, 15, 611-647.
- Bremmer H.J., Verhagen H., Visscher K., Engelhard W., Erker J. van, Joziase J., Troost L.M. (1988), Inventarisatie halogeenkoolwaterstoffen in Nederland. Document Nat. Inst. of Public health and Environment (RIVM) Bilthoven, The Netherlands, Doc.nr. 738608002.
- Ros J. (1991), RIVM Bilthoven, The Netherlands, pers. communications.
- Umweltschutz, TA-Luft (1986), *Gemeinsames Ministerialblatt* 37 (7), 95-144.
- Mei G. (1991), Emissierichtlijn lucht krijgt vorm. *Missets Milieu mag.*, Maart, 38-40.
- Slooff W., Ros J. (1987), Ontwerp basisdocument Dichloormethaan. RIVM Bilthoven, The Netherlands, Doc.nr.758473002.
- Criteriadocument 1,2-dichloorethaan (1984), *Publicatiereeks Lucht* nr. 30. Ministry of housing, Physical planning and environment (VROM) Leidschendam, The Netherlands.
- Perry R.H., Green D. (1984), *Chemical engineering handbook*, 6<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill Book Company, New York.
- Dragt A. (1990), DHV Consultant Engineers, Amersfoort, The Netherlands, pers. communication.
- Joziase J., Wiering A.C.F. (1990), Document Monografieën informatiesysteem technieken; *Compartiment Lucht*, TNO-RIVM nr. 736101007.
- Maurer P. (1979), Systemstudie zur Erfassung und Verminderung von belästigenden Geruchsemissionen. *BMFT Forschungsbericht T*, 79-114.
- Menig H. (1977), *Luftreinhaltung durch Adsorption, Absorption und Oxidation*, Braun Verlag, Wiesbaden.
- Vatavuk W.M. (1983), Series of articles on air pollution control; Part XIV: Cost of adsorbers. *Chem. Eng.*, January 24, 131.
- Putte I. van der, Dorussen H.L., Wassenberg W.B.A. (1986), Operationalisering van de begrippen best uitvoerbare en best bestaande technieken. Adviesbureau Bongaerts, Kuijper en Huiswaard, Den Haag.
- Lith C. van (1991), Clairtech bv. Utrecht, The Netherlands, pers. communications.

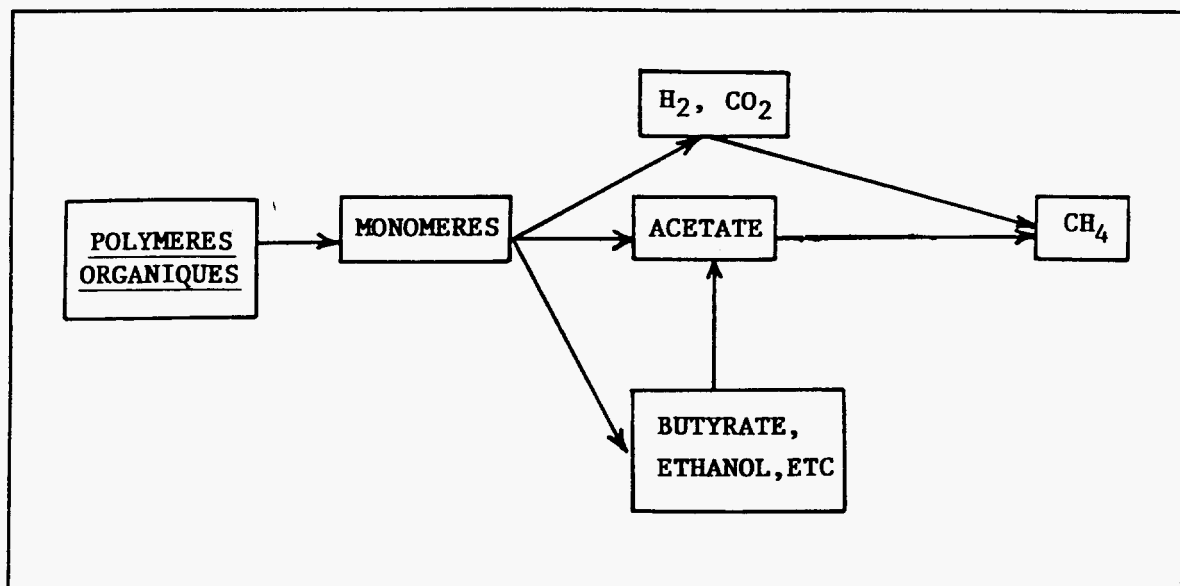
- Bentz R.** (1987), Biological waste gas treatment: experience of a chemical company in Switzerland. Proc. Int. Meet. Biol. treatment of ind. waste gases, DECHEMA, 24-26 March, Heidelberg, Deutschland.
- Gust M., Sporenberg F., Schippert E.** (1979), Grundlagen der biologischen Abluftreinigung (Teil IV, Abgasreinigung durch Mikroorganismen mit Hilfe von Biowäschern. Staub-Reinhaltung der Luft, 39, 308-314.
- Schippert E.** (1987), Chemico-biological gas scrubbing for the reduction of organic emissions. Proc. Int. Meet. Biol. treatment of ind. waste gases, DECHEMA, 24-26 March, Heidelberg, Deutschland.
- Kohler H.** (1986), Biowäscher zur Minimierung von organischen gas förmigen Emissionen. VDI-Berichte 561, VDI Verlag Düsseldorf, 169-190.
- VDI-Richtlinie Biowäscher (1985), VDI-3478, Beuth Verlag, Berlin.
- Schmidt F.** (1986), European patent, nr. 0-1330222.
- Beck-Gasche B.** (1989), Untersuchungen zum Einsatz und Modellierung von Biowäschern. Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 15, nr. 68, VDI-Verlag Düsseldorf.
- Schippert E.** (1989), Biowäscher nach einer Dosenlackieranlage. VDI-Berichte 735, VDI Verlag Düsseldorf, 78-88.
- Schippert E.** (1989), Das biosolv Verfahren von Keramchemie zur Absorption von schwer wasserlöslichen Lösemitteln. VDI-Berichte 735, VDI Verlag Düsseldorf, 161-177.
- Lebeault J.M.** (1989), Biological purification of waste gases and waters in a multiphasic bioreactor. Abstr. Forum for appl. Biotechn., Gent, Belgium, 27 September, 20.
- Wolff F.** (1989), Biologische Abluftreinigung mit einem neuen Biowäscherkonzept, VDI-Berichte 735, VDI Verlag Düsseldorf, 99-107.
- Stücki G.** (1989), Biologische Entzorgung von Methylenchlorid aus Abluft und Abwasser. Swiss Chem., 11, 35-38.
- Niemann D, Dunn I.J.** (1990), Comparison of two biofilm reactor processes for the elimination of dichloromethane from waste gases. Proc. ECB5, 206, Copenhagen, 8-13 July, 206.
- Gälli R.** (1987), Biodegradation of dichloromethane in waste water using a fluidized bed bioreactor. Appl. Microbiol. Biotechnol., 27, 206-213.
- Fischer K.** (1989), Biologische Elimination von schlecht wasserlöslichen Abluftinhalstoffen mit Hilfe eines Membranverfahrens, VDI-Berichte 735, VDI Verlag Düsseldorf, 109-120.
- Fischer K.** (1991), Comparative research: Biofilter or biomembrane technique for the removal of solvents from industrial waste gases. Proc. Symp. Biotechniques for air pollution abatement, 27-29 October, Maastricht, The Netherlands (to be published 1992).
- Hartmans S.** (1990), Biological waste gas treatment. Proc. ECB5, 82, Copenhagen, 8-13 July.
- Kirchner K., Hauk G., Rehm H.J.** (1987), Exhaust gas purification using immobilised monocultures (biocatalysts). Appl. Microbiol. Biotechnol., 26, 579-578.
- Kirchner K., Schlachter U., Rehm H.J.** (1989), Biological purification of exhaust air using fixed bacterial monocultures. Appl. Microbiol. Biotechnol., 31, 629-632.
- Kirchner K., Gossen C.A., Rehm H.J.** (1991), Purification of exhaust air containing organic pollutants in a trickle-bed reactor. Appl. Microbiol. Biotechnol., 35, 396-400.
- Diks R.M.M., Ottengraf S.P.P.** (1991), Verification studies of a simplified model for the removal of dichloromethane from waste gases using a biological trickling filter; Part I, Bioproc. Eng., 6, 93-99.
- Diks R.M.M., Ottengraf S.P.P.** (1991), Verification studies of a simplified model for the removal of dichloromethane from waste gases using a biological trickling filter; Part II, Bioproc. Eng., 6, 131-140.

- taire stoffen voor het milieubeleid. Document Ministry VROM, nr 80007/1-88, VROM Leidschendam, The Netherlands.
- Zeisig H.D., Holzer A.** (1980), Anwendung von biologischen Filtern zur Reduzierung von geruchintensiven Emissionen. Schriftreihe der Landtechnik, Weihenstephan (Hrsg.) Freising, H.2.
- Proc. Int. Meeting Biol. treatment of ind. waste gases (1987), DECHEMA, 24-26 March, Heidelberg. Deutschland.
- Brunner W., Staub D., Leisinger T.** (1980), Bacterial degradation of dichloromethane. Appl. Environm. Microbiol., 40, 950-958.
- Gälli R., Leisinger T.** (1985), Specialized bacterial strains for the removal of dichloromethane from industrial waste gases. Conserv. Recycl., 8, 91-100.
- Klecka G.** (1982), Fate and effects of methylene chloride in activate sludge. Appl. Environm. Microbiol., 44, 701-707.
- LaPat-Polasko L.T., McCarty P.L., Zehnder A.J.B.** (1984), Secondary substrate utilization of methylene chloride by an isolated strain of *Pseudomonas* sp. Appl. Environm. Microbiol., 47, 825-830.
- Rittmann B.E., McCarty P.L.** (1980), Utilization of dichloromethane by suspended and fixed-film bacteria. Appl. Environm. Microbiol., 39, 1225-1226.
- Stücki G., Gälli R., Ebershold H., Leisinger T.** (1981), Dehalogenation of dichloromethane by cell extracts of *Hyphomicrobium* DM2. Arch. Microbiol., 130, 366-371.
- Kohler-Staub D., Hartmans S., Gälli R., Suter R., Leisinger T.** (1986), Evidence for identical dichloromethane dehalogenases in different methylotrophic bacteria. J. Gen. Microbiol., 132, 2837-2843.
- Diks R.M.M., Ottengraf S.P.P.** (1990), Process engineering aspects of biological waste gas purification. Proc. 1<sup>st</sup> ISEB Congress, April, Oostende, Belgium.
- Roos C.** (1989), Konstruktionsmöglichkeiten für Biofilter. VDI-Berichte 735, VDI Verlag Düsseldorf, 179-189.
- Don J.** (1986), The rapid development of biofiltration for the gas purification of various waste gas streams. VDI-Berichte 561, VDI Verlag Düsseldorf, 63-73.
- Eitner E.** (1989), Vergleich von Biofiltermedien anhand mikrobiologischer und bodenphysikalischer kenndaten. VDI-Berichte 735, VDI Verlag Düsseldorf, 191-213.
- Ottengraf S.P.P.** (1983), Dutch patent, nr. 83.03031.
- Ottengraf S.P.P., Meesters J.J.P., Oever A.H.C. v.d., Rozema H.R.** (1986), Biological elimination of volatile xenobiotic compounds in biofilters. Bioproc. Eng., 1, 61-69.
- Zeisig H.D.** (1986), Biofilter für Landwirtschaft und Industrien, insbesondere Tabakindustrie. VDI-Berichte 561, VDI Verlag Düsseldorf, 123-146.
- VDI-Richtlinie Biofilter (1984), VDI-3477, Beuth Verlag, Berlin.
- Bardtke D.** (1987), Fundamental microbiological principles of biological waste gas treatment. Proc. Int. Meet. Biol. treatment of ind. waste gases, DECHEMA, 24-26 March, Heidelberg, Deutschland.
- Zantropp H.** (1978), German patent, nr. 2.6.52.673.
- Kneer F.X.** (1976), German patent, nr. 2.4.45.315.
- Bueb M., Melin Th.** (1987), Biological and physico-chemical waste gas treatment processes; comparison of processes and cost; chances for new technologies. Proc. Int. Meet. Biol. treatment of ind. waste gases, DECHEMA, 24-26 March, Heidelberg, Deutschland.

- taire stoffen voor het milieubeleid. Document Ministry VROM, nr 80007/1-88, VROM Leidschendam, The Netherlands.
- Zeisig H.D., Holzer A.** (1980), Anwendung von biologischen Filtern zur Reduzierung von geruchintensiven Emissionen. Schriftreihe der Landtechnik, Weihenstephan (Hrsg.) Freising, H.2.
- Proc. Int. Meeting Biol. treatment of ind. waste gases (1987), DECHEMA, 24-26 March, Heidelberg. Deutschland.
- Brunner W., Staub D., Leisinger T.** (1980), Bacterial degradation of dichloromethane. Appl. Environm. Microbiol., 40, 950-958.
- Gälli R., Leisinger T.** (1985), Specialized bacterial strains for the removal of dichloromethane from industrial waste gases. Conserv. Recycl., 8, 91-100.
- Klecka G.** (1982), Fate and effects of methylene chloride in activate sludge. Appl. Environm. Microbiol., 44, 701-707.
- LaPat-Polasko L.T., McCarty P.L., Zehnder A.J.B.** (1984), Secondary substrate utilization of methylene chloride by an isolated strain of *Pseudomonas* sp. Appl. Environm. Microbiol., 47, 825-830.
- Rittmann B.E., McCarty P.L.** (1980), Utilization of dichloromethane by suspended and fixed-film bacteria. Appl. Environm. Microbiol., 39, 1225-1226.
- Stücki G., Gälli R., Ebershold H., Leisinger T.** (1981), Dehalogenation of dichloromethane by cell extracts of *Hyphomicrobium* DM2. Arch. Microbiol., 130, 366-371.
- Kohler-Staub D., Hartmans S., Gälli R., Suter R., Leisinger T.** (1986), Evidence for identical dichloromethane dehalogenases in different methylotrophic bacteria. J. Gen. Microbiol., 132, 2837-2843.
- Diks R.M.M., Ottengraf S.P.P.** (1990), Process engineering aspects of biological waste gas purification. Proc. 1<sup>st</sup> ISEB Congress, April, Oostende, Belgium.
- Roos C.** (1989), Konstruktionsmöglichkeiten für Biofilter. VDI-Berichte 735, VDI Verlag Düsseldorf, 179-189.
- Don J.** (1986), The rapid development of biofiltration for the gas purification of various waste gas streams. VDI-Berichte 561, VDI Verlag Düsseldorf, 63-73.
- Eitner E.** (1989), Vergleich von Biofiltermedien anhand mikrobiologischer und bodenphysikalischer kenndaten. VDI-Berichte 735, VDI Verlag Düsseldorf, 191-213.
- Ottengraf S.P.P.** (1983), Dutch patent, nr. 83.03031.
- Ottengraf S.P.P., Meesters J.J.P., Oever A.H.C. v.d., Rozema H.R.** (1986), Biological elimination of volatile xenobiotic compounds in biofilters. Bioproc. Eng., 1, 61-69.
- Zeisig H.D.** (1986), Biofilter für Landwirtschaft und Industrien, insbesondere Tabakindustrie. VDI-Berichte 561, VDI Verlag Düsseldorf, 123-146.
- VDI-Richtlinie Biofilter (1984), VDI-3477, Beuth Verlag, Berlin.
- Bardtke D.** (1987), Fundamental microbiological principles of biological waste gas treatment. Proc. Int. Meet. Biol. treatment of ind. waste gases, DECHEMA, 24-26 March, Heidelberg, Deutschland.
- Zantropp H.** (1978), German patent, nr. 2.6.52.673.
- Kneer F.X.** (1976), German patent, nr. 2.4.45.315.
- Bueb M., Melin Th.** (1987), Biological and physico-chemical waste gas treatment processes; comparison of processes and cost; chances for new technologies. Proc. Int. Meet. Biol. treatment of ind. waste gases, DECHEMA, 24-26 March, Heidelberg, Deutschland.

## LA METHANISATION

Les principales étapes de la méthanisation sont résumées dans le schéma suivant



La dégradation des polymères naturels, amidon, celluloses et autres macromolécules conduit d'abord à l'obtention de monomères qui sont ensuite transformés en méthane.

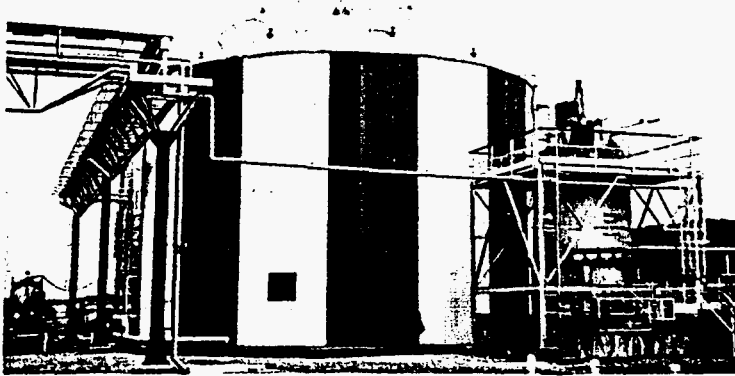
Les molécules organiques simples sont elles aussi transformées en méthane. Les molécules susceptibles d'être biodégradées sont données dans le tableau suivant :

ALDEHYDES	ACIDES	ALCOOLS	ESTERS
— Acétaldéhyde	— Acétique	— Butanol	— Acétate d'éthyle
— Butyraldéhyde	— Acrylique	— Ethanol	— Acétate de méthyle
— Crotonaldéhyde	— Adipique	— Ethylène glycol	— Acétate de vinyle
— Formaldéhyde	— Butyrique	— Glycérol	— Acrylate d'éthyle
— Propanal	— Crotonique	— Isopropanol	— Acrylate de méthyle
	— Formique	— Méthanol	
	— Fumarique	— Pentanol	
	— Glutamique	— Propanol	
	— Glutarique		
	— Glyoxylique		
	— Hexanoïque		
	— Isobutyrique		
	— Lactique		
	— Maléique		
	— Propionique		
	— Sorbique		
	— Succinique		

Unités industrielles		Béghin-Say Thumeries (France)	Générale Sucrière Aulnois/Laon (France)	Revico Cognac (France)	S.I.A. Condom (France)	S.I.S. La Guadeloupe	Toledo (Espagne)	La Semeuse Bierne (France)	Andros Bretenoux (France)
<b>DONNEES</b>	Effluent	Eaux usées d'une raffinerie de sucre		Vinasses d'une distillerie de vin		Mélasses de vinasses de canne à sucre	Lisiers de porcs	Eaux usées d'une conserverie	Confiturerie
	Volume actif m <sup>3</sup> (garnissage)	1 260	2 000	5 600	570	1 700	100	430	430
	Charge volumique (kg DCO/m <sup>3</sup> digesteur/jour)	12,6	14	11,8	11	14,1	12	14	10,5
	Charge journalière (t DCO/jour)	16	28	80	6,25	24	1,2 Après tamisage	6	4,5
	Réduction DCO soluble	90	80	90	90	65	55-60 (DCO totale)	70	90
	Productivité spécifique de méthane (Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> de réaction/jour)	4,6	4,1	3,4	3	2,8	3-4	3,1	3
UTILISATION DE BIOGAZ		Gaz naturel chaudière biogaz	Chaudière	Chaudière biogaz Moteur thermique	Chaudière	Chaudière	Chaudière mixte fuel/gaz		Chaudière
<b>Performances actuelles</b>	Débit d'effluent (m <sup>3</sup> /jour)	95-125	150	60-80	en construction	en construction	1,4	en démarrage	en construction
	Charge (t DCO/jour)	7-13		50-80			1,2 Après tamisage		
	Réduction DCO (%)	90-95		90			DCO totale 55-60		

## Applications industrielles (documents SGN)

# L'énergie des anaérobies



**Le méthaniseur de Cuise Lamotte. 16 tonnes/jour de capacité et un rendement d'épuration supérieur à 96 %**

*Pour traiter ses effluents les plus chargés en matières organiques, Hoechst utilise, depuis quatre ans déjà, la méthanisation. Le procédé cumule réduction des boues et économies d'énergies.*

Elles aiment l'humidité et détestent l'oxygène. Les bactéries anaérobies travaillent en milieu fermé et se régaler des déchets organiques. Cela tombe à point, car nombre d'industries chimiques ou agro-alimentaires doivent débarrasser leurs effluents liquides de ces polluants organiques. Mieux encore : le festin des organismes gloutons transforme une partie des résidus indésirables en une source d'énergie immédiatement utilisable, le biogaz. « En associant traitement des effluents et récupération d'énergie, la méthanisation nous apparaît comme le système d'épuration le plus efficace », déclare Pierre Gavet, responsable sécurité-environnement de la Société française Hoechst.

L'usine de Cuise Lamotte de la filiale du chimiste allemand est située dans la Somme, entre Compiègne et Soissons. Fondée il y a bientôt un siècle, elle emploie aujourd'hui 650 personnes. Activité principale : la fabrication de produits intermédiaires de synthèse et de po-

lymères en solution. Dès 1978, elle fut l'une des premières stations industrielles à se doter d'une unité de dépollution de ses eaux résiduelles par aérobie, obtenant alors le grand prix des installations classées pour ses performances.

En 1982, les contraintes administratives devenant plus sévères, une nouvelle réduction des rejets s'avérait nécessaire. Sur les conseils de la délégation régionale de l'AFME (Agence française pour la maîtrise de l'énergie), l'entreprise choisit alors d'installer une unité de méthanisation plutôt que d'agrandir la capacité de traitement installée. « Nous avons surtout été sensibles au bilan énergétique favorable de la méthanisation, explique Pierre Gavet. Après un an d'étude, notre choix s'est porté vers un digesteur à lit fixé qui permet de traiter de gros débits et s'accorde bien avec la station d'épuration traditionnelle. »

L'investissement s'est monté à 9 millions de francs. Dont une partie non négligeable sous forme d'aides délivrées par l'agence locale de bassin, l'AFME, la Région et même la CEE. « Sur le plan financier, nous avons apporté 600 000 francs environ, note Christian Fabry, délégué régional de l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie). Mais au-delà de cette aide financière, notre action a consisté à conseiller Hoechst, les aider à

définir le cahier des charges de l'installation, rechercher les bureaux d'étude compétents... Aujourd'hui encore, nous participons régulièrement au suivi des opérations. »

La méthanisation, démarrée fin 1988, a maintenant fait ses preuves à Cuise Lamotte. D'une capacité de 16 tonnes/jour de DCO (demande chimique en oxygène), l'unité traite le quart des pollutions de l'usine avec un rendement d'épuration supérieur à 96 %. Le biogaz obtenu est composé pour moitié de gaz carbonique et de méthane. Ce dernier est utilisé pour chauffer les bâtiments et fournit 11 500 tonnes/an de vapeur, soit 6,6 % de la consommation énergétique interne.

## — Un stock tampon de 1 000 m<sup>3</sup> de résidus

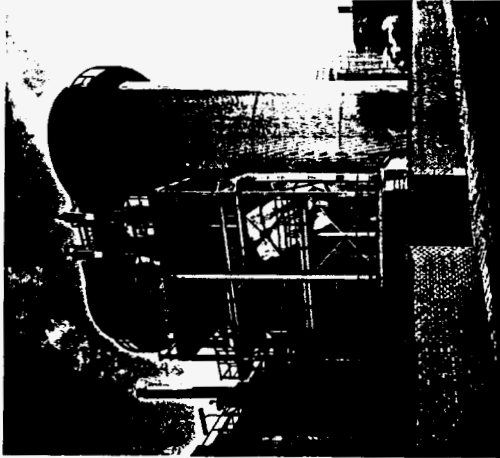
« Après trois années de fonctionnement, le bilan dépasse les prévisions ! Une réduction de 33 % des boues et une économie d'énergie de 1 736 TEP (tonne équivalent pétrole) par an », remarque Pierre Gavet. Principale difficulté d'exploitation : les anaérobies s'accroissent mal des productions à flux tendus. Lorsque la production cesse, il faut plus de six mois à la flore bactérienne pour se remettre en activité. Pour éviter la paralysie, un stock tampon de 1 000 mètres cubes de résidus a dû être mis en place et maintient une alimentation minimale.

Le procédé est-il applicable partout ? « Presque. En tout cas, là où les effluents contiennent une forte concentration organique, ce qui est le cas des industries chimiques, laitières, sucrières, etc., répond Christian Fabry. Du reste, si les effluents sont trop peu chargés pour que la méthanisation soit rentable, c'est qu'il y a un problème d'utilisation des eaux. C'est alors le processus de recyclage interne qui est à revoir », affirme-t-il. Comme quoi des solutions existent !

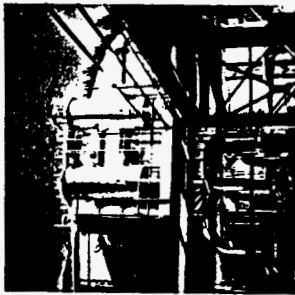
**REMY DEVEZE**

## The Biotim A feedstocks...

- BIOTIM's team has many years of practical experience on laboratory, pilot plant and full scale anaerobic treatment of liquid organic wastes originating from:
- distilleries, based on cane molasses, beet molasses, starch materials, various other feedstocks;
  - molasses fermentation industries: baker's yeast, fodder yeast, citric acid, monosodium glutamate, nucleic acid, enzymes, others;
  - starch factories: wheat, corn, tapioca, potato;
  - pulp- and paper factories;
  - potato, vegetable, fruit processing;
  - beet sugar factories;
  - breweries and soft drinks;
  - dairy plants, cheese factories;
  - organic chemistry;
  - various agro-industries: soya milk, rubber, flax, palm oil;
  - slaughterhouses, meat and fish processing;
  - pharmaceuticals; fermentation processes.



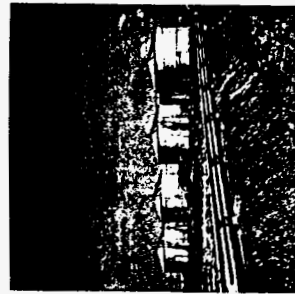
28.800 kg COD/day plant starch processing factory Amylum, Belgium



64.075 kg COD/day plant pulp and paper factory Carton, New Zealand



90.112 kg COD/day plant alcohol distillery VAM, India



6.000 kg COD/day plant beet sugar factory Narveau, Belgium



64.075 kg COD/day plant pulp and paper factory Carton, New Zealand



90.112 kg COD/day plant alcohol distillery VAM, India

## Other BIOTIM realisations in industrial and agricultural wastewater and waste sector

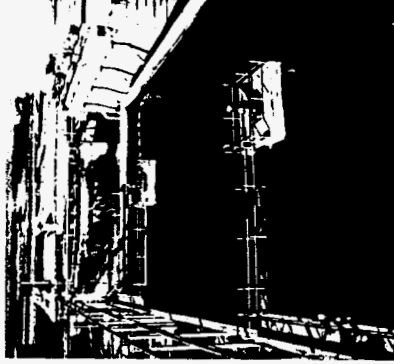


DU PONT DE NEMOURS, Mechelen, Belgium  
Paint components

Raked screen, solvent removal and recovery, buffering, pH-control, flocculation, biological activated sludge, sludge treatment (thickener, conditioning, filter press).

ALBART FARM, Roselles, Belgium

Anaerobic digestion of cow manure, with electrical power generator from biogas.



A.C.O.R., Olmedo, Spain

Beet sugar factory

(On effluent of anaerobic BIOTIM A plant) biological activated sludge system, lagooning, final oxidation.

PLASTIFY P.K.E., Istanbul, Turkey

Plasticisers, fumaric acid.

Buffering, neutralisation, two-phase biological activated sludge system, sludge treatment (thickener, belt filter press)





Renewable energy from wastewater  
by methane fermentation

# Biotim® A

Advanced biotechnology  
for cost effective industrial effluent treatment

## The Biotim A technology...

BIOTIM A has no rigid flow scheme or uses no fixed type of digester without exemption for every application, regardless of its specific aspects and problems.

BIOTIM A process is a tailor-made anaerobic digestion process to suit a wide variety of liquid organic waste problems.

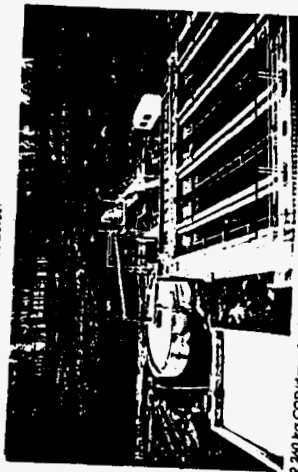
The experience of the BIOTIM engineers and biotechnologists covers the whole range of modern high rate anaerobic digestion processes, two-phase as well as one-phase, mixed, UASB, fluidized bed as well as fixed bacteria methane reactors such as BIOTIM's proprietary PCR and CASB reactors.

BIOTIM's engineers and scientists represent one of the world's most experienced teams on modern anaerobic wastewater techniques, fully backed up by Professor Verstraete and his team from the Laboratory of Industrial Ecology at the Ghent State University.

BIOTIM engineers were the first to design and commercialize two-phase anaerobic treatment plants for carbohydrate, protein and lipid containing wastewater.



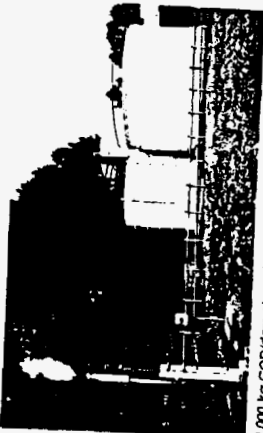
Microscopic view of colonisation by methanogenic bacteria at polyurethane carrier in BIOTIM's PCR reactor.



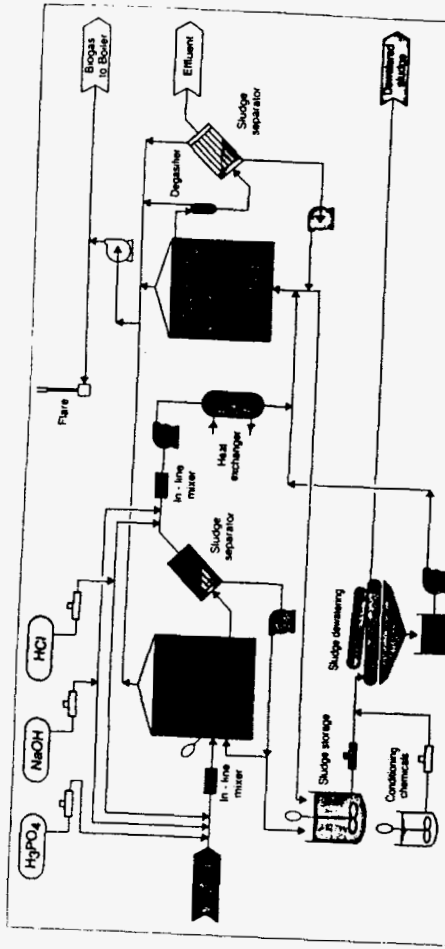
2,200 kg COD/day plant, potato chip factory Van Den Broeke Belgium

## The Biotim A process parameters...

- influent COD values: 1,500 - 120,000 mg/l
- methane reactor loadings: 6 - 30 kg COD/m<sup>3</sup> reactor-day
- temperature ranges: 20 - 40 °C
- biogas production: 3 - 13 Nm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> reactor-day, 60-80% methane
- COD removal efficiencies: 70 - 97%
- excess sludge production: 4 - 12% of influent COD



9,000 kg COD/day plant, Palm Brewery, Belgium



## The Biotim A references...

Above flow sheet gives a typical arrangement of a BIOTIM A anaerobic wastewater treatment plant. For this particular heavy loaded and difficult effluent, from the production of alcohol and baker's yeast based on cane and beet molasses, preceded the construction of a pilot plant research (Bruggeman factory, Belgium).

The plant is conceived using the two-stage fermentation approach. In the first reactor (C.R.), the organic matter is solubilized, hydrolyzed and converted into organic acids, ethanol, hydrogen and CO<sub>2</sub> by fermentative bacteria. The second reactor (M.U.R.) contains the methane bacteria that transform the intermediate products into methane and CO<sub>2</sub>. This two-stage system permits the operation of two basically different fermentation processes at their respective optimum conditions. An important supplementary advantage is the higher reliability and stability of the system and the improved resistance to shock loadings. The biogas used in this 43,500 kg COD/day plant amounts to 10,230 Nm<sup>3</sup>/day at 7% methane. This biogas reduces the factory's liquid fuel consumption with 7,140 kg/day or about 50%. Gross annual saving is about US \$ 470,000 or 33% of initial investment costs (1984 values).

## The Biotim A plant ...

BIOTIM A plants in operation, under construction or in design phase cover a very wide range of capacities from 100 kg COD/day up to 440,000 kg

COD/day, being actually the world's largest anaerobic wastewater treatment plant, and with a wide variety of feedstocks such as alcohol, baker's yeast, citric acid, brewing, corn starch, potato chips, beet sugar, pulp and paper. Complete reference list available on request.

## The Biotim A advantages

- BIOTIM A wastewater treatment advantages compared with other treatment or disposal techniques are impressive, and include:
- high efficiencies at very high loading rates;
- moderate investment costs;
- extremely low operating costs;
- net re-usable energy production which may offset total plant costs completely;
- very low excess sludge production;
- low space requirements;
- seasonal operation possible.



43,500 kg COD/day plant alcohol and baker's yeast factory Bruggeman Belgium

# WASTE WATER TREATMENT AT SFH CHEMICAL PLANT

SOCIETE FRANÇAISE HOECHST - SFH - is a chemical plant, located in CUISE LAMOTTE - OISE - FRANCE.

All the waste waters generated in the plant were initially treated by aerobic treatment only.

Over the years, the pollution increased and SFH decided to modify its effluents treatment plant, adding an anaerobic section based on the SGN fixed film technology. Only part of total waste waters constituted of organic acids of small chains, is sent to the digester. The other effluents are still treated only on the aerobic section.

The plant which construction started in

november 1986, was commissioned by the end of 1988.

Waste waters are preheated with calories recovered from existing condensates in order to optimize the energy balance. A complementary heat exchanger is used to maintain the digester temperature at 37°C. After complementation with nutrients and chemicals, the effluents are fed into one digester, filled partially with plastic media, FLOCOR<sup>®</sup>, for the biomass retention. The COD removal across the anaerobic section is at least 95%. The biogas with about 50% of methane is burnt in an existing boiler.

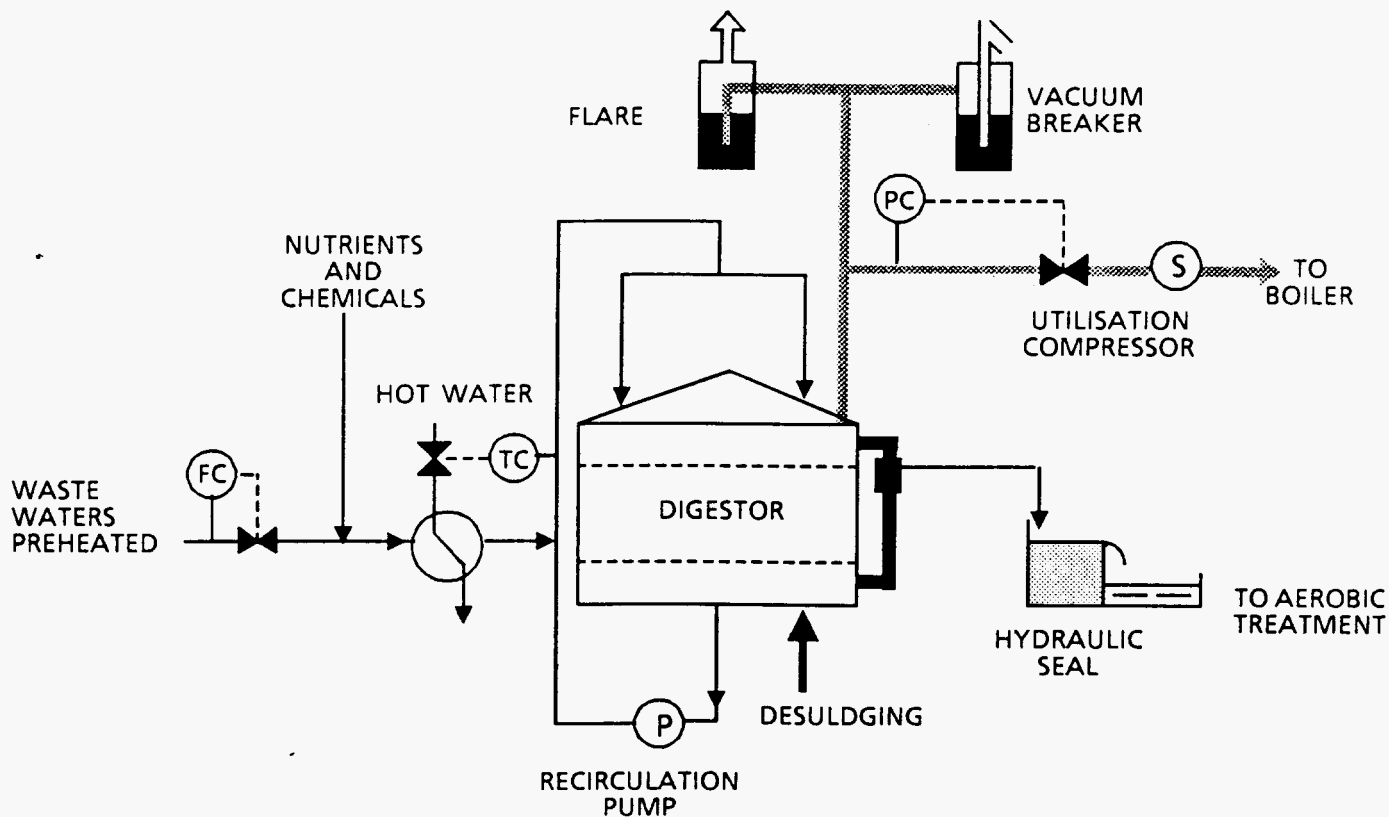
After anaerobic treatment, the digested effluent goes to the aerobic treatment plant and then is discharged to the river.



### PLANT MAIN CHARACTERISTICS

			DESIGN
WASTE WATER	Flowrate	m <sup>3</sup> /day	320 to 350
	COD concentration	mg/l	45,000 to 50,000
	COD load	kg/day	16,000
ANAEROBIC SECTION	Digester liquid volume	m <sup>3</sup>	1,950
	Temperature	°C	37
	COD reduction	%	>95
BIOGAS	Production	Nm <sup>3</sup> /day	10700
	Methane content	%	50

### PLANT FLOW SHEET



SGN P03 A00

**FRANCE**

HEAD OFFICE:  
 1, rue des hérons  
 Montigny-le-Bretonneux  
 F-78182 St Quentin Yvelines Cedex  
 Telephone : 33 (1) 30 58 60 00  
 Fax : 33 (1) 30 58 60 61  
 Telex : 698 316 F

**U.S.A. :**

NUMATEC Inc  
 74061 Wisconsin Avenue, N.W.  
 Bethesda, Maryland 20814-3416  
 Minato-Ku Tokyo 105  
 Telephone : (301) 986 8585  
 Fax : (301) 652 5690  
 Telex : 892 605

**JAPAN :**

SGN Co, Ltd  
 Urban Toranomon bldg  
 1-16-4 Toranomon  
 Telephone : (3) 593 07 67  
 Fax : (3) 593 34 32  
 Telex : 2423815 SGNTKIJ



## WASTE WATER TREATMENT PLANT AT SAKTHI SUGARS LIMITED DISTILLERY

SAKTHI SUGARS LIMITED DISTILLERY is located at SAKTHINAGAR in Periyar District of Tamil Nadu in INDIA.

The distillery based on sugar cane molasses as raw-material produces 60,000 litres of rectified alcohol per day generating 800 m<sup>3</sup> of stillage daily.

This effluent, containing very high levels of COD : 95,000 to 105,000 mg/l, was previously treated in large lagoons having an Hydraulic Retention Time of about 100 days.

In addition the efficiency was rather poor and discharge into the natural environment became unacceptable with growing pollution problems.

Because also of the high energy recovery, SAKTHI decided to use an anaerobic treatment based on the SGN fixed film technology.

The plant construction was completed by

the end of May 1988 and commissioned by the end of November 1988.

Stillage coming out from the distillery flows into a buffer tank. After cooling through heat-exchangers, it is mixed with recirculating flow and fed to the digester by a distribution system on the top of the digester.

The recirculation pump helps to maintain an appropriate hydraulic circulation within the reactor.

The digester is filled partially with plastic media FLOCOR<sup>®</sup> for biomass retention.

Biogas generated replaces, almost totally, the conventional fuel requirements of the distillery boiler, ensuring the recovery of the entire plant outlay within a very short period.

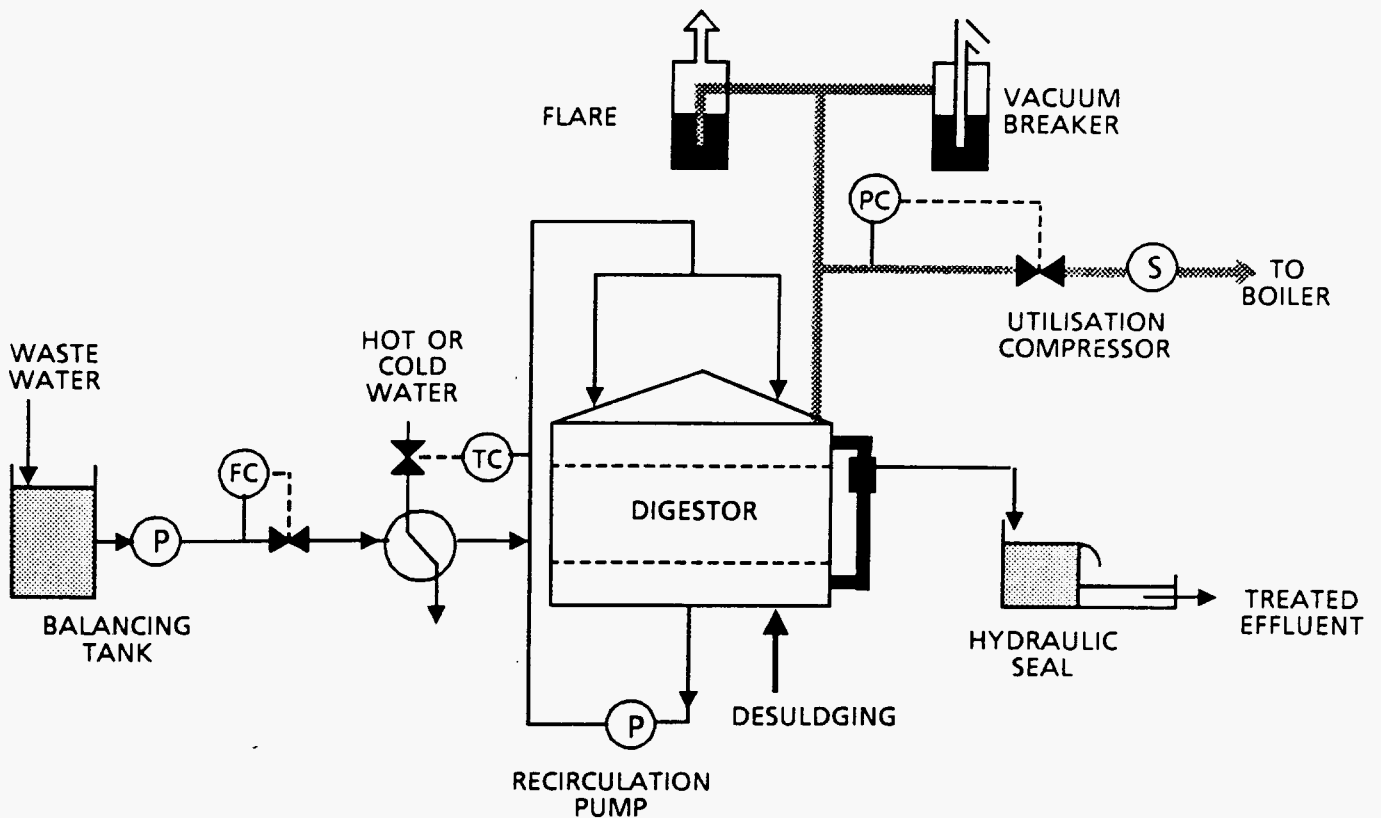
After digestion the effluent is sent to lagoons for aeration and sedimentation of solids. The final effluent is used as liquid fertilizer by irrigation of sugar cane fields.



## PLANT MAIN CHARACTERISTICS

DISTILLERY	ALCOHOL CAPACITY	l/day	60,000
WASTE WATER	Flow	m <sup>3</sup> /day	800
	COD concentration	mg/l	100,000
	COD load	kg/day	80,000
DIGESTOR	Digester liquid volume	m <sup>3</sup>	4,500
	Temperature	°C	37
	COD reduction	%	65
	BOD reduction	%	90
BIOGAS	Production	Nm <sup>3</sup> /day	36,000
	Methane content	%	50

## PLANT FLOW SHEET



SGN P02 A00

**FRANCE**

HEAD OFFICE:  
1, rue des hérons  
Montigny-le Bretonneux  
F-78182 St Quentin Yvelines Cedex  
Telephone : 33 (1) 30 58 60 00  
Fax : 33 (1) 30 58 60 61  
Telex : 698 316 F

**U.S.A. :**

NUMATEC Inc  
74061 Wisconsin Avenue, N.W.  
Bethesda, Maryland 20814-3416  
Telephone : (301) 986 8585  
Fax : (301) 652 5690  
Telex : 892 605

**JAPAN :**

SGN Co, Ltd  
Urban Toranomon bldg  
1-16-4 Toranomon  
Minato-Ku Tokyo 105  
Telephone : (3) 593 07 67  
Fax : (3) 593 34 32  
Telex : 2423815 SGNTKIJ



Constructor name	Country	Industrial wastes	Agricultural wastes	Nb. plants in the EC	Nb. plants outside the EC
Bigadan	Denmark	X	X	15 (90)	1 (90)
Biotim	Belgium	X		28 (90)	27 (90)
Degrémont	France	X		16 (87)	?
Emmepi	Italy		X	13 (87)	?
Farm Gas	United Kingdom	X	X	20 (90)	-
Gist-Brocades	The Netherlands	X		40 (90)	37 (90)
Paques	The Netherlands	X		34 (90)	47 (90)
SGN	France	X		12 (87)	?
Snamprogetti	Italy	X	X	27 (87)	?
Sonergil	Portugal		X	21 (90)	-
RPA	Italy	X	X	21 (87)	?

Number of full-scale plants built in and outside the EC countries by the most important and still active companies in the EC. Values in parentheses indicated the validity year of data.

**Biotim n.v.**

Address Theodoor van Rijswijkplaats 7 (3° verd.), 2000 Antwerpen Belgium

Phone (32 3) 226 1010

Fax (32 3) 226 0677

Number of plants built in the European Communities (EC) 28

Number of plants built outside the EC 27

Comments Given performances include all those of Biotim\_B and Arblos\_B, and some of Sulzer\_G; they are design capacities; some plants are not yet running.

**Krüger-Bigadan / AS**

Address Industrivej 4, 5580 Nr. Aaby Denmark

Phone (45) 64 42 31 80

Fax (45) 64 42 26 14

Number of plants built in the European Communities (EC) 15

Number of plants built outside the EC 1

Comments

**Degrémont s.a.**

Address 183 Avenue du 18 juin 1940, 92508 Ruell Malmaison Cédex France

Phone (33 1) 46 25 60 00

Fax (33 1) 42 04 16 99

Number of plants built in the European Communities (EC) 16

Number of plants built outside the EC ?

Comments The performances include those of Degrémont-France + Degrémont-Bénélux + Degrémont-Espana + Müller GmbH (FRG).

**Société générale pour les techniques nouvelles**

Address 1 rue des Hérons, Montigny-le-Bretonneux, 78182 Saint-Quentin-en-Yvelines France

Phone (33 1) 30 58 60 60

Fax (33 1) 30 58 65 22

Number of plants built in the European Communities (EC) 12

Number of plants built outside the EC

Comments

**Studio Emmepl S.R.L.**

Address Via A. Meucci Verona Italy

Phone

Fax

Number of plants built in the European Communities (EC) 13

Number of plants built outside the EC

Comments

**R.P.A Rlsorce Ambientali S.P.****Address Fontana, Strada del Colle, 06074 Perugia Italy****Phone Fax****Number of plants built in the European Communities (EC) 21****Number of plants built outside the EC****Comments****Snamprogetti biotecnologie****Address Casella Postate 97, 61032 Fano PS Italy****Phone Fax****Number of plants built in the European Communities (EC) 27****Number of plants built outside the EC****Comments Agip-Giza was the old name of this company for the anaerobic digestion field.****Sociedade de Recuperaçao de Energias, Ida****Address R. Augusto Cardoso 10-1°, 2950 Palmela Portugal****Phone (351 1) 235 2213 Fax (351 1) 235 2209****Number of plants built in the European Communities (EC) 21****Number of plants built outside the EC****Comments****PAQUES B.V.****Address Postbus 52, 8560 AB Balk The Netherlands****Phone (31 5140) 3441 Fax (31 5140) 3342****Number of plants built in the European Communities (EC) 34****Number of plants built outside the EC 47****Comments****Royal Gist-Brocades N.V., Gb Biothane****Address Wateringseweg 1, 2600 MA Delft The Netherlands****Phone (31 15) 79 28 42 Fax (31 15) 79 38 22****Number of plants built in the European Communities (EC) 40****Number of plants built outside the EC 37****Comments The performances include those of Gist-Brocades, Esmil\_N, Esmil\_G, Esmil\_U, Spaans Babcock\_N, BMA G. (\*) : design capacities and total volumes.**



**Spaans Babcock b.v.****Address** The Netherlands**Phone****Fax****Number of plants built in the European Communities (EC)** 16**Number of plants built outside the EC****Comments** See Gist-Brocades\_N

---

**Farm Gas Ltd****Address** Industrial Estate, Bishop's Castle, Shropshire SY9 5AQ United Kingdom**Phone** (44 588) 638 577**Fax** (44 588) 638 887**Number of plants built in the European Communities (EC)** 20**Number of plants built outside the EC**

0

**Comments** Had developed turn-key pre-fabricated reactors. Build numerous sewage-sludge treating plants.

## LE COMPOSTAGE

Le compostage transforme par voie biologique des déchets en un amendement organique normalement utilisable en agriculture. Nature du procédé :

Par nature le procédé est aérobie la teneur en oxygène du milieu doit être maintenue autour de 10 %. Le rapport carbone/azote (C/N) doit être contrôlé de façon à favoriser la croissance microbienne.

Un C/N initial élevé peut limiter la croissance microbienne par carence d'azote, un C/N initial faible conduit à des pertes par dégazage ammoniacal. Rappelons que le C/N évolue tout au long de la fermentation une bonne partie au carbone organique étant transformé en CO<sub>2</sub>.

L'eau est indispensable pour la croissance microbienne. La teneur en eau optimale est voisine de 50 %. Un excès d'humidité peut conduire à une élimination trop rapide de l'oxygène donc à l'anaérobiose, de plus une teneur en eau élevée favorise les pertes en calories du système ce qui peut perturber les évolutions thermiques.

En effet :

- La fermentation aérobie s'accompagne d'une élévation progressive de la température due à la seule activité catabolique des micro-organismes, la dégradation des composés organiques étant très exothermique. Ce facteur, engendré par le processus microbien est lui-même la cause d'une modification de l'écologie du milieu:

- des organismes mésophiles amorcent la décomposition et se développent entre 10 et 35° C ;
- la température continuant de monter, ils disparaissent et laissent entre 45 et 55°C une flore thermophile occuper le terrain ;
- jusqu'à 70°C certaines enzymes restent encore actives, mais au-delà de 75°C, la quasi-totalité des microbes est détruite ou inactivée ; sont également éliminés par ce traitement les pathogènes de toutes sortes ainsi que les oeufs et les larves d'insectes, d'où le rôle sanitaire du compostage. On parle de stabilisation aérobie.
- enfin le compost refroidit lentement pour atteindre une température d'équilibre à maturation.

## Les techniques de fermentation

La maîtrise des facteurs ci-dessus décrits, dont l'aération est probablement le plus déterminant, décide du type de fermentation adoptée. Il existe une trentaine de procédés de compostage en service, mais on peut les diviser schématiquement en deux groupes.

1. La fermentation naturelle libre, ou "compostage lent", est pratiquée en disposant les ordures brutes ou prétraitées en monticules allongés sur une hauteur de trois mètres environ, les andains ; des tracto-pelles les retournent périodiquement (tous les mois) pour assurer l'aération. Au bout de plusieurs mois (de 2 à 6), la température se stabilise et le compost parvient à maturation.

2. La fermentation contrôlée en cellule ou enceinte close ou "compostage accéléré" fait intervenir un équipement qui reprend les déchets qui, tout en les brassant, les humidifie et les aère pendant un temps relativement court, de 4 à 15 jours. Le produit, déjà bien dégradé, est ensuite stabilisé en andains sur des aires de maturation. Le temps de séjour est alors beaucoup plus réduit qu'avec la méthode de compostage lent, ce qui réalise un gain de surface, intéressant surtout lorsqu'on a des volumes importants de déchets à traiter. En outre, le produit final est généralement plus homogène et mieux aseptisé.

## Les substrats d'accompagnement

Dans la mesure où elles sont disponibles aux abords de l'usine, d'autres substances peuvent être associées au traitement. Elles peuvent constituer un apport minéral et organique intéressant pour le développement de la microflore. On trouve des liquides comme les boues de station d'épuration d'eaux résiduaires, les matières de vidange, les lisiers, les marcs, les vinasses et les curages de fosses ; des solides comme les résidus de l'industrie du bois, les élagages, les tontes, les fumiers et autres déjections animales, les composts de champignonnières, les pailles, les résidus de récoltes, d'abattoirs ou d'industrie agro-alimentaire ; des substrats d'origine aquatique comme les algues et les déchets de faucardage ; ou d'origine industrielle comme certains produits minéraux à forte valeur agronomique tels que l'azote, le phosphore ou la potasse ; enfin peuvent également être incorporés des tourbes ou des terreaux, etc.

Cette valorisation conjointe de produits riches en matières organique et minérale influence de façon positive la vitesse de fermentation de l'ensemble du matériau à composter et permet en outre de diluer les substances à caractère toxique, désherbants, métaux lourds, phénols, etc.

Le compostage a été utilisé avec succès pour la biodégradation de produits chimiques. Les tableaux suivants permettent de se rendre compte des composés métabolisés et des déchets qui peuvent être soumis à biodégradation.

**Table 1. Some Classes of Compounds Amenable to Biodegradation**

---

Phenols  
 Cyanides  
 Aryl Halides  
 Aliphatic Hydrocarbons  
 Aromatic Hydrocarbons  
 Chlorinated Hydrocarbons  
 Amines  
 Alcohols  
 Sulfonates  
 Phthalate Esters

---

**Table 2. Industries That Produce Wastes Amenable to Biodegradation**

---

Adhesives and Sealants  
 Auto and Other Industries  
 Food and Kindred Products  
 Gum and Wood Chemicals  
 Leather Tanning and Finishing  
 Organic Chemicals Manufacturing  
 Paint and Ink Formulation  
 Pesticides  
 Petroleum Refining  
 Pharmaceutical Preparations  
 Photographic Equipment and Supplies  
 Plastics Processing  
 Plastic and Synthetic Materials Manufacturing  
 Printing and Publishing  
 Pulp and Paper Mills  
 Soap and Detergent Manufacturing  
 Textile Mills  
 Timber Products Processing

---

Parmi les points intéressants à noter certains composés toxiques non dégradés par les bactéries mésophiles intervenant dans les procédés de traitement d'eaux, de sols, ou d'air, peuvent être dégradés par des bactéries thermophiles mises en oeuvre lors du compostage. Cette observation implique que les capacités biodégradations des bactéries thermophiles et mésophiles sont différentes.

Rappelons qu'il y a peu ou pas d'information sur la biodégradation comparative des composés xénobiotiques par des populations mésophiles et thermophiles et que la biodégradation ne se limite pas à la minéralisation, elle peut conduire à :

1. La minéralisation.
2. La transformation en biomasse microbienne.
3. La transformation en composés volatils.
4. La transformation en métabolites toxiques.
5. La polymérisation en macromolécules.
6. La fixation sur la matière organique.

**orgatech**Essais  
Etudes  
RéalizationsProcédé BIOSEC®  
Déshydratation-stabilisation  
des déchets organiques  
par voie biologique

NOTE DE PRESENTATION  
DE LA SOCIETE ORGATECH  
ET DU PROCEDE BIOSEC®

NOVEMBRE 1991

Cette note est établie à l'attention des personnes recherchant un procédé nouveau pour permettre ou améliorer la valorisation ou l'élimination de **déchets organiques** humides et fermentescibles, comme par exemple :

- Des boues d'épuration
- Des fientes de poules
- Des déchets agricoles

La solution proposée ici est le procédé BIOSEC®, permettant le **séchage** et la **stabilisation** de ces produits par voie biologique ; technique s'apparentant au compostage avec aération forcée. Le procédé BIOSEC® repose sur :

- Un **brevet d'invention** portant sur la création des conditions optimales de fermentation des produits et en particulier leur ventilation, en vue de leur séchage et de leur stabilisation, associés à une consommation réduite d'énergie et une bonne maîtrise des nuisances.
- Un **savoir-faire** acquis par l'inventeur, Maurice TEMPE et développé par la Société ORGATECH créée par **Maurice TEMPE et Paul GUINARD** en vue de proposer diverses prestations et produits pour la réalisation d'installations de traitement. Celles-ci du fait même du procédé BIOSEC®, seront **simples, fiables, économiques et écologiques**, conformément aux impératifs des temps actuels et à venir.

## 1. HISTORIQUE

Le procédé BIOSEC® est le fruit de six années de travail axées autour de la recherche et la mise en oeuvre de solutions techniques, économiques et écologiques au traitement de déchets et sous-produits organiques, principalement de boues d'épuration. La plate-forme expérimentale et la SARL ORGATECH ont été créées pour assurer les améliorations du procédé, ainsi que son développement.

Cette démarche entreprise de 1983 à 1990 comprend les étapes suivantes :

### - *Première étape (1983/1984) - Etudes et enquêtes*

Celles-ci ont permis de connaître le domaine des activités du déchet et d'appréhender les besoins, en particulier dans le domaine du compostage des déchets organiques. L'analyse des réussites et des échecs de diverses réalisations en France, ainsi que la recherche des solutions mises en oeuvre à l'étranger, ont amené à envisager deux voies de travail :

- L'étude des possibilités de création de centres de traitement multi-déchets organiques à l'image des centres de traitement de déchets industriels. De tels centres présentent un intérêt technique du fait des synergies existant entre les produits à traiter et un intérêt économique résultant du facteur d'échelle.
- La recherche d'un procédé adapté au traitement de ces déchets organiques, en s'inspirant des techniques de compostage accéléré pratiquées par ailleurs.

Ces études et enquêtes ont été faites avec l'IDREES à TOULON (1983) et ITAC, et en collaboration avec l'ANRED et d'autres organismes.

### - *Deuxième étape (1985/1987) - Le pilote artisanal*

Celui-ci a été construit à la MOTTE D'AIGUES (84) pour réaliser, au départ, deux essais de compostage avec aération forcée des boues d'épuration de la Ville de CANNES.

Ce pilote était constitué de deux casiers (réacteurs) de 50 m<sup>3</sup> chacun, équipés afin de pouvoir ventiler les mélanges en fermentation. La manipulation des produits a été faite à l'aide d'engins de location ou par des entrepreneurs spécialisés. Une association (ORGATECH) a été créée pour réaliser diverses études et pour gérer le dispositif. Cela a permis la réalisation de plusieurs essais sur divers produits :

- Boues d'épuration (Ville de CANNES)
- Fientes de poules (PNR du Luberon)
- Pommes et choux-fleurs de retrait (SYNDICAT MIXTE D'AMENAGEMENT DE LA VALLEE DE LA DURANCE).



Ces essais ont permis l'acquisition d'un savoir-faire et la mise au point progressive du procédé et en particulier :

- Le passage d'un procédé de compostage à un procédé de déshydratation-stabilisation, en vue d'obtenir un produit semi-fini plus facile à intégrer dans une chaîne de valorisation qu'un compost traditionnel.
- Le remplacement de la notion de support carboné par celle de co-produit essentiellement structurant, ainsi que la mise au point des mélanges.
- Le passage d'une ventilation positive et discontinue à une ventilation par aspiration en continu des mélanges en fermentation. Cette nouvelle façon de procéder a permis d'envisager une régulation des débits d'air à partir de la température de l'air extrait, associée à un traitement possible des odeurs.

*- Troisième étape (1988/1989) - Le pilote industriel*

Celui-ci est le fruit d'une collaboration entre le SYNDICAT MIXTE D'AMENAGEMENT DE LA VALLEE DE LA DURANCE et M. TEMPE. Il a été réalisé à CHATEAURENARD (13) sur la plate-forme créée par le SYNDICAT MIXTE pour y traiter des fruits et légumes de retrait et des boues d'épuration.

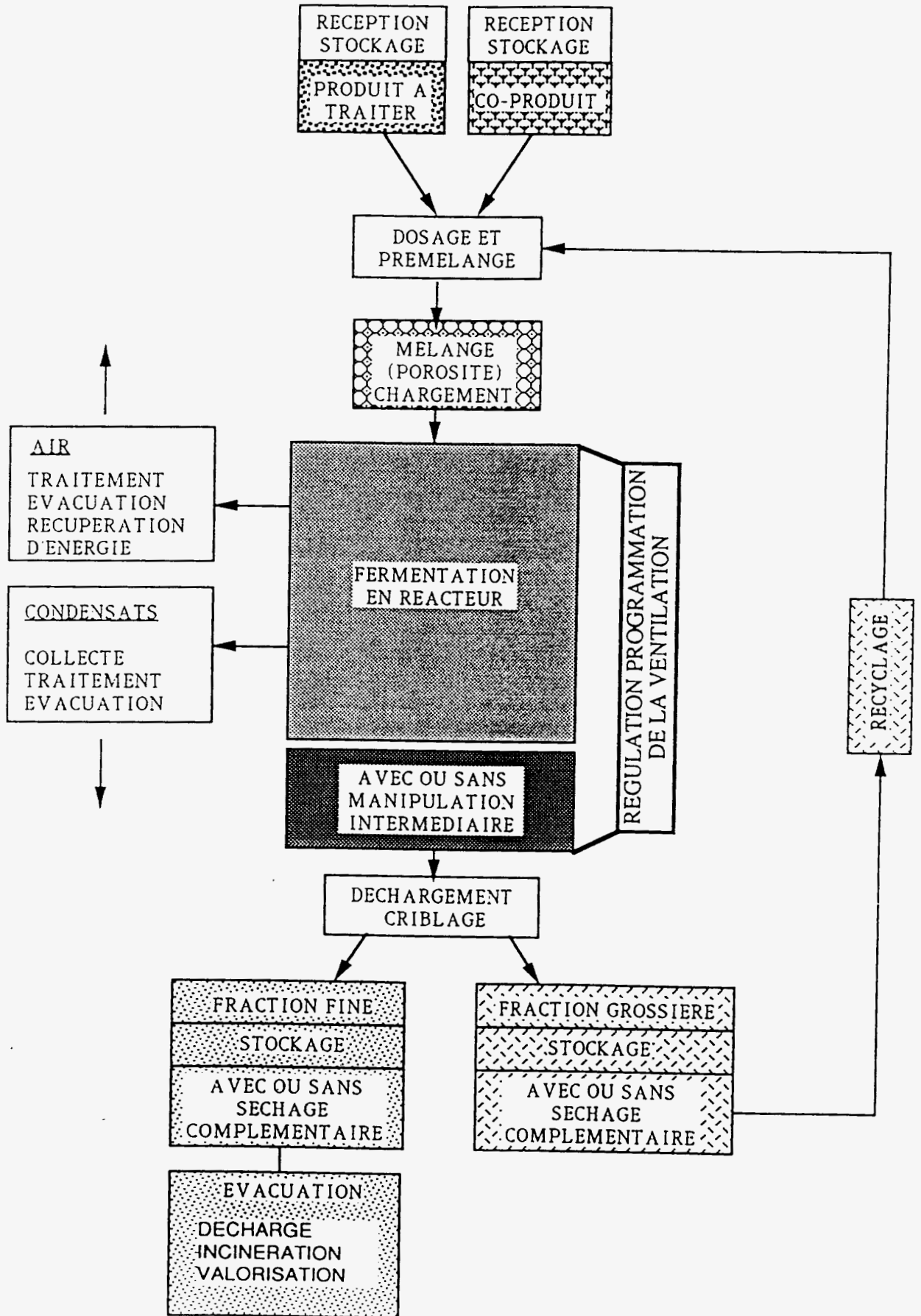
Ce pilote est constitué d'un module d'une capacité de traitement de 2.000 T/an comprenant 5 réacteurs de 125 m<sup>3</sup> chacun. L'ensemble est équipé pour assurer la ventilation des produits. (Pour plus de détails, voir plus loin).

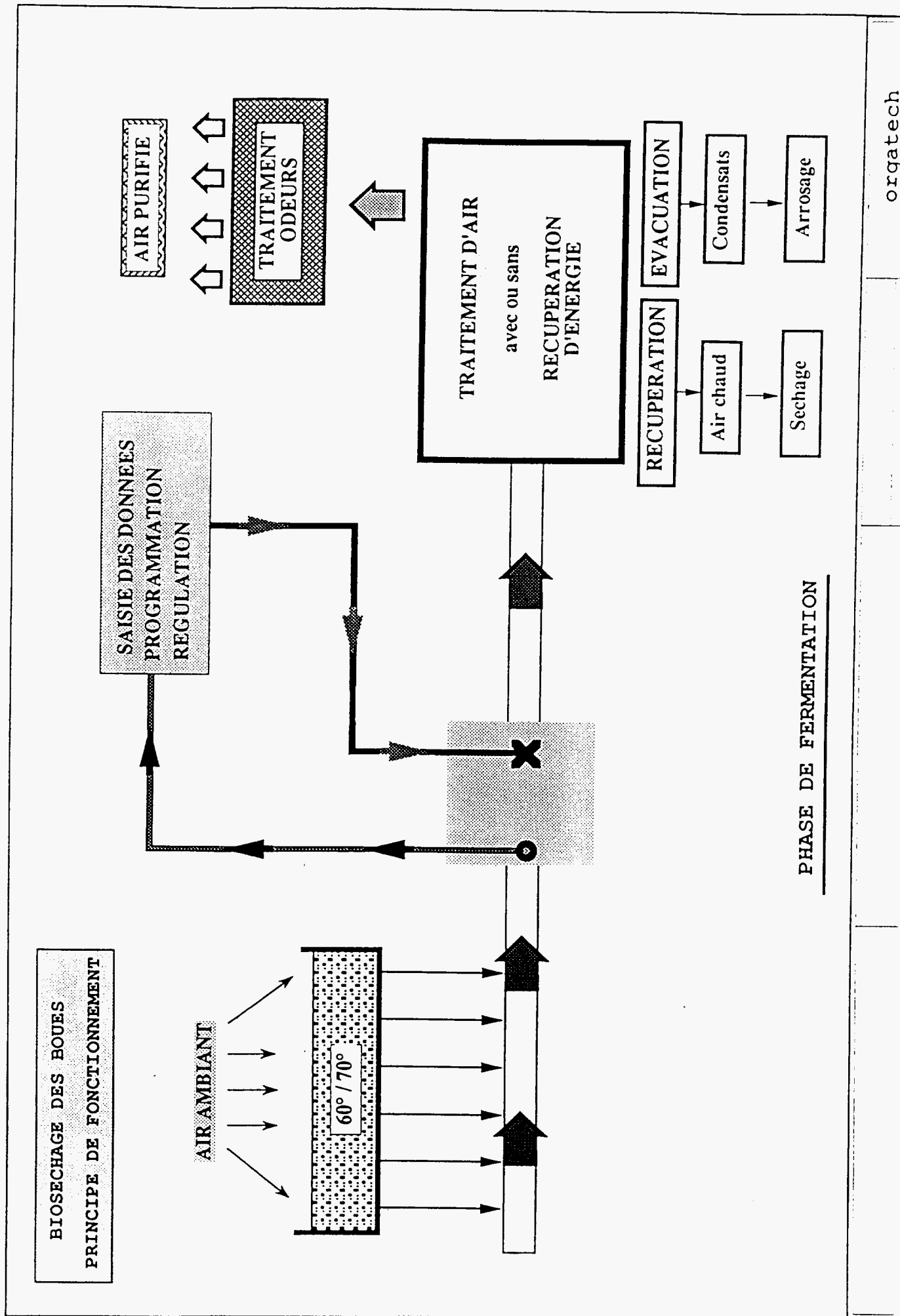
Ce dispositif a permis :

- La réalisation de nombreux essais sur divers produits (fruits et légumes de retrait, boues d'épuration agro-industrielles, boues d'épuration industrielles, boues huileuses de raffinerie, ...) pour le compte du SYNDICAT MIXTE et de divers industriels, en particulier SANOFI, ELF et G.O.S.
- La mise au point des dispositifs aérauliques, les systèmes de pilotage (régulation-programmation) et de récupération d'énergie.
- Le développement d'un savoir-faire de plus en plus pointu.

La réussite de cette opération s'est soldée par :

- Un dépôt de brevet et de marque concernant le procédé BIOSEC®.
- La création de la plate-forme expérimentale par le SYNDICAT MIXTE.
- La création d'ORGATECH.
- Le montage de plusieurs projets industriels dont un Centre Multi-Déchets sur le site de CHATEAURENARD.





## 2. LE PROCEDE BIOSEC®

Il s'agit d'un procédé de **déshydratation-stabilisation par voie biologique de matières organiques** humides et fermentescibles et en particulier de :

- Boues d'épuration urbaines et industrielles.
- Déchets des I.A.A.
- Déchets agricoles.
- Déchets d'élevage (fientes par exemple).
- Déchets des industries pétrolières (boues huileuses par exemple).

### 2.1. Le process (voir schémas)

Le process consiste essentiellement à créer les conditions optimales pour le développement de **fermentations aérobies** avec **thermogénèse** d'un mélange du produit à traiter avec un co-produit structurant et de **ventiler** ce mélange de façon à **maximiser le dégagement d'énergie** pour évaporer l'eau en excès tout en satisfaisant les besoins en oxygène. Ce process se déroule en trois temps :

- **Dosage - prémélange - mélange** du produit à traiter avec un co-produit structurant, afin d'obtenir un mélange susceptible de fermenter dans de bonnes conditions.
- **Fermentation aérobie** avec thermogénèse dans des réacteurs équipés en vue d'une ventilation du mélange avec programmation et régulation des débits. Si nécessaire, un réacteur peut être déchargé et rechargé (JOKER) afin de provoquer un redémarrage des fermentations.
- En fin de fermentation, le réacteur est vidé et le mélange **criblé** afin de séparer la **fraction fine** (produit déshydraté-stabilisé) de la **fraction grossière** (co-produit) recyclable.

Eventuellement : **séchage complémentaire** avec de l'air sec obtenu à partir de l'air extrait des réacteurs et après passage dans une pompe à chaleur ou un échangeur.

Plus de 50 essais ont déjà été réalisés sur de nombreux produits, à raison de 40 T par produit et par essai. Ils ont permis de déterminer les ratios suivants :

### 2.2. Principaux ratios

- **Produit à traiter** : humidité initiale : 60 à 90 %
- **Co-produits utilisés** : Déchets de bois, écorces, rafles de maïs, par ex.

- \* **Durée du traitement** : 5 à 6 semaines
- \* **Quantité d'eau évaporée** : de 500 à 800 l/T de produit traité
- \* **Humidité produits finis** : de 20 à 50 % selon humidité initiale.
- \* **Quantité produit fini (fraction fine)** : de 300 à 500 kg par tonne traitée
- \* **Densité apparente du produit fini** : 0,4 - 0,5
- \* **Taux de recyclage co-produit** : de 70 à 85 % selon granulométrie initiale.
- \* **Ventilation** : Puissance installée : 2 à 3 KW/module
- \* **Capacité de traitement d'un module** : 2.000 T-2.500 T/an
- \* **Investissements** : 800 à 1.500 KF par tranche de 1.000 T/an
- \* **Fonctionnement** : Coût de 100 à 200 F/T traitée

### 2.3. Intérêts du procédé

- Possibilité de transformation de nombreux produits humides, fermentescibles et polluants, en produits secs, stabilisés et pulvérulents avec réduction du poids de 50 à 70%.
- Consommation réduite de co-produit qu'il faut généralement payer.
- Faible consommation d'énergie.
- **Maîtrise des nuisances**, en particulier des odeurs.
- Rapidité de traitement (3 à 6 semaines) et phase de maturation non obligatoire.
- **Simplicité et fiabilité** dans la mise en oeuvre industrielle.
- Possibilité d'une conception modulaire et évolutive.
- Relative simplicité de gestion.

Du fait de ces caractéristiques, le procédé BIOSEC® s'intègre avantageusement dans des filières de valorisation ou d'élimination de nombreux déchets organiques. L'application du procédé BIOSEC® peut être considérée comme un **prétraitement** se situant, pour des boues d'épuration par exemple, entre une déshydratation mécanique (pressage, filtration, centrifugation) et un mode d'élimination (incinération - mise en décharge) ou de valorisation (fabrication d'amendements ou de terreaux). Dans tous les cas, il est plus avantageux :

- \* De brûler 3 à 400 kg d'un produit sec ayant un PCI de 2 à 3.000 kcal/kg, plutôt que d'incinérer une tonne de boue humide dans des conditions difficiles.
- \* De mettre en décharge 3 à 400 kg d'un produit ayant une siccité de 50 à 70 %, plutôt qu'une boue d'une siccité de 15 à 40 %. Ceci est d'autant plus vrai que le contexte réglementaire est de plus en plus contraignant en la matière.
- \* De fabriquer des amendements ou des terreaux à partir d'un produit sec, pulvérulent et stable, plutôt que de travailler ou d'épandre des boues brutes.

# VALORISATION DE DECHETS ORGANIQUES SEMI-LIQUIDES

## INTRODUCTION

Les déchets organiques concentrés (30 à 60 % de matières sèches) peuvent être traités et valorisés par voie biologique. Une dizaine de procédés industriels de traitement/valorisation permettent de valoriser ces déchets par fermentation anaérobie méthanigène, d'une part en un résidu sec (environ 60 % de matières sèches) valorisable comme amendement agricole voire comme supplément à l'alimentation animale, et d'autre part en un gaz combustible, le biogaz. La plupart de ces procédés sont récents, deux d'entre eux, précurseurs, ont été développés durant la dernière décennie, l'un de ces procédés est belge, l'autre français ; ils sont détaillés dans les pages suivantes. Si ces procédés ont été mis au point pour le traitement de la fraction organique des déchets ménagers, rien n'interdit leur utilisation pour le traitement/valorisation d'autres déchets organiques concentrés. Certains de ces déchets ont déjà fait l'objet d'étude de faisabilité. On trouvera ci-après, dans le détail des informations concernant le procédé belge, une liste non exhaustive des déchets organiques potentiellement concernés par ces procédés.

La filière de traitement VALORGA est proposée par la Société VALORGA Process, le procédé DRANCO est commercialisé par la Société OWS (Organic Waste System). Ces deux procédés sont longuement détaillés ci-après. Globalement, ces deux procédés sont comparables en terme de conversion des déchets (vitesse, efficacité) et de qualité de l'amendement organique final. Le tableau ci-dessous reprend les performances des deux procédés, on se référera aux descriptions détaillées pour plus de détail.

Les deux procédés semblent à l'heure actuelle avoir acquis maturité et robustesse, les technologies proposées s'implantent à l'échelle industrielle.

La filière VALORGA est focalisée sur le traitement/valorisation des ordures ménagères, et pour ce faire intègre toutes les étapes de ce traitement, depuis les tris jusqu'à la production d'un digestat stabilisé commercialisable. Le procédé DRANCO se veut moins restrictif en terme de substrat (cf. plus haut), mais débute au fermenteur méthanigène. Les ordures ménagères ou autres déchets doivent donc être déjà triés ou exempts de déchets inorganiques.

Les comparaisons de coût des deux procédés sont délicates : on peut cependant estimer raisonnable le coût net annuel d'environ 180 FF/par tonne de matière brute tel qu'estimé par OWS pour traiter/valoriser 25 000 tonnes/an de fraction organique de résidus ménagers.

	VALORGA		DRANCO
	Mésophilie	Termophilie	Thermophilie
Température (°C)	37-40	55-60	50-55
Temps de rétention (d)	17-25	12-18	18-21
Charge hydraulique (kg MO/m <sup>3</sup> d)	7,5-9	10-13	10-13
Production de biogaz (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> d)	3	4	5-8
Concentration CH <sub>4</sub> (%)	54	55-60	55
Rendement de méthanisation (m <sup>3</sup> /t MO)	210-240	220-260	150-250

MO : matières organiques

## **FILIERE DE TRAITEMENT/VALORISATION VALORGA**

### **I - SOCIETE VALORGA**

Société au capital détenu par SPIE BATIGNOLLES, IDEX et GAZ DE FRANCE ; elle a pour objet industriel, l'ingénierie, la construction, l'opération et la maintenance d'installations de traitement/valorisation de déchets, au moyen de la Filière VALORGA.

Valorga Process  
Z.I. de Vendargues  
5 Rue de massacan  
34740 Vendargues  
Tél. : 67 87 80 00  
Fax : 67 70 46 94

### **II - PROCEDE VALORGA**

#### **II.1. Chaîne Synoptique**

Les unités de traitement/valorisation des déchets urbains par la filière VALORGA peuvent être décomposées en trois sous-ensembles de base :

- la chaîne de tri,
  - la méthanisation,
  - la chaîne d'affinage,
- et deux sous-ensembles optionnels :
- la chaîne de tri semi-automatique pour le recyclage,
  - l'incinération des refus.

#### La chaîne de tri

Sa finalité est la préparation de la matière qui sera introduite dans l'unité de méthanisation.

#### La méthanisation

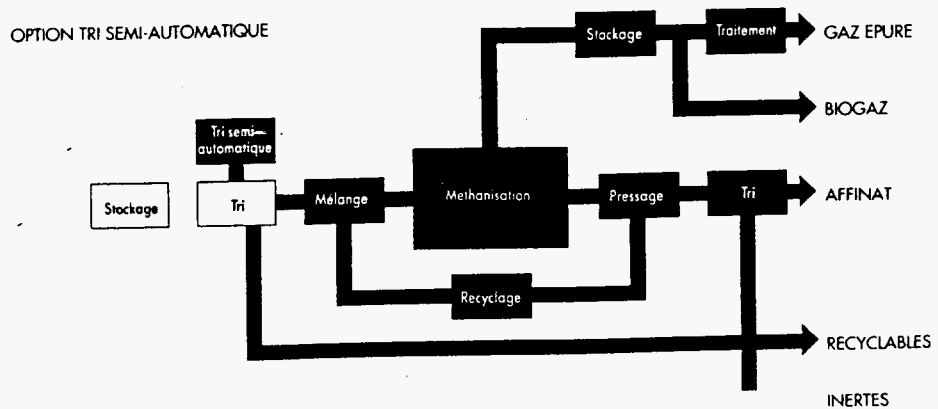
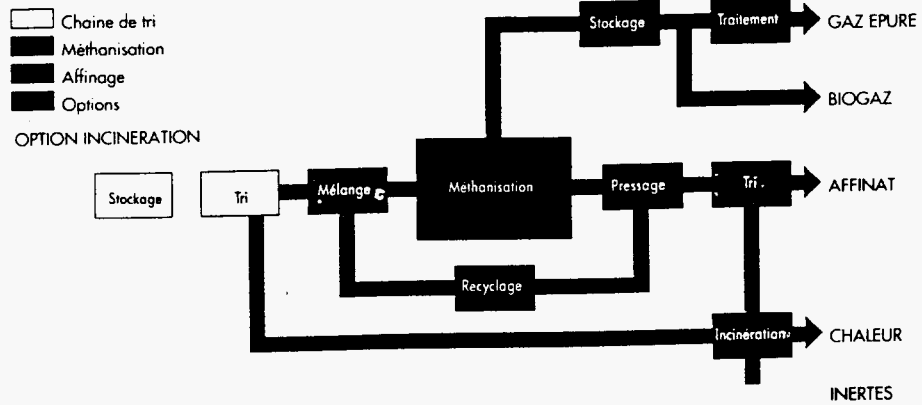
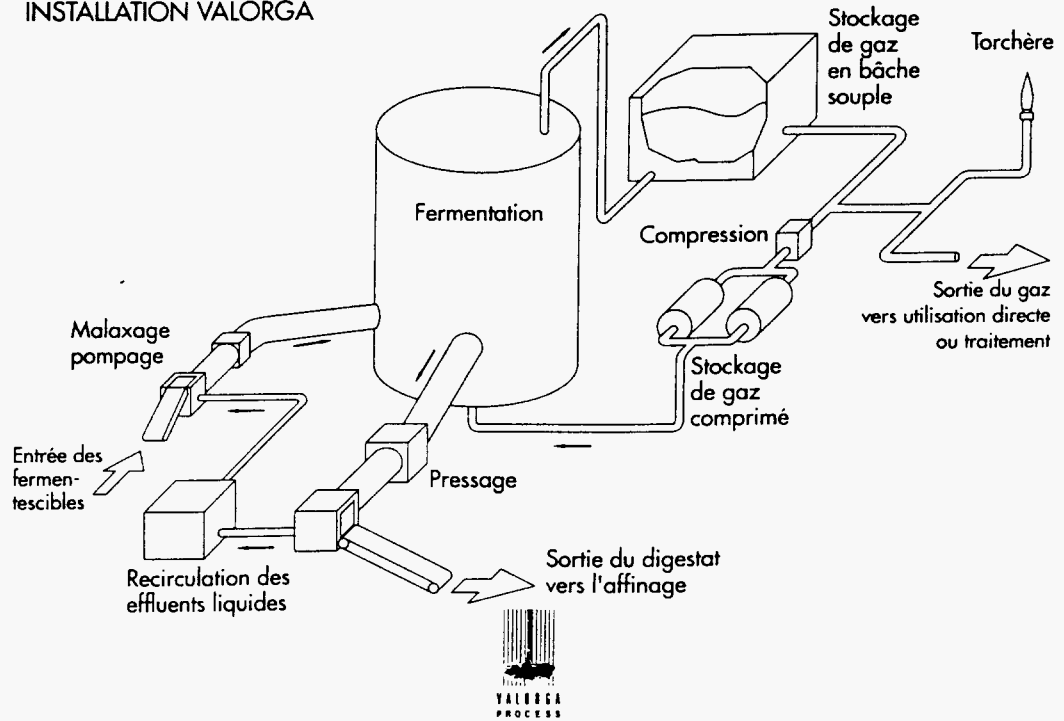
Elle assure la fermentation anaérobie de la matière biodégradable. Elle permet la production de biogaz.

#### La chaîne d'affinage

Elle a pour objectif la production d'un amendement organique de qualité.



UNITE DE METHANISATION  
INSTALLATION VALORGA



### La chaîne de tri semi-automatique

Ce sous-ensemble peut être intégré à la chaîne de tri. Sa finalité est la récupération des produits recyclables issus de la chaîne de tri. Elle fait appel à la fois au tri mécanique et au tri manuel. Ce sous-ensemble permet, dans le cas de la mise en place d'une collecte sélective, d'augmenter la récupération des produits recyclables.

### L'incinération des refus

S'ils ne sont pas recyclés, les refus de la chaîne de tri peuvent être incinérés dans des conditions satisfaisant aux normes et recommandations européennes.

## II.2. Bilan standard

Ce bilan moyen annuel est établi pour une tonne d'ordures ménagères de composition proche de la moyenne nationale française.

### Principaux composants

- Papier-carton	28 à 35 %
- Matières végétales et animales	30 à 40 %
- Verre - cailloux - calcaire	10 à 15 %
- Métaux	4 à 6 %
- Plastiques	10 à 16 %
- Textiles	1 à 4 %

La souplesse du procédé permet d'adapter les productions (biogaz, affinat, chaleur, recyclage) aux possibilités de valorisations locales.

	Option incinération	Option tri semi automatique	
		Collecte conventionnelle	Collecte sélective *
Biogaz (Nm <sup>3</sup> )	95 - 120	95 - 120	90 - 115
Affinat (kg)	300 - 340	300 - 340	260 - 300
Chaleur (kWh)	580 - 680	-	-
Recyclables (kg)	-	130 - 170	250 - 290
Inertes (kg)	240 - 290	270 - 320	120 - 200

### II.3. Chaîne de tri

Elle comprend :

#### La réception

Les déchets sont pesés puis déversés dans une fosse. Ils sont repris par un grappin pour être introduits dans une trémie qui alimente la chaîne.

#### Le tri granulométrique

La première partie du trommel permet de séparer la fraction fine, riche en matière organique. La seconde partie permet de récupérer la fraction grossière. Les refus du trommel sont évacués ou peuvent être dirigés vers le tri semi-automatique pour le recyclage.

#### Le tri des métaux ferreux

Un tapis magnétique retire de la matière les métaux ferreux qui sont valorisés.

#### La réduction granulométrique

La fraction grossière issue du premier tri est réduite avant le tri des inertes lourds.

### Le tri des inertes lourds

Les inertes lourds sont séparés de la matière par tri balistique. Le choix des équipements de cette chaîne peut être modifié en fonction des besoins spécifiques de chaque collectivité (notamment tri semi-automatique en vue d'un recyclage).

## II.4. Méthanisation

### Caractéristiques

La méthanisation de la matière biodégradable est réalisée en l'absence d'air par des populations bactériennes.

Le procédé VALORGA se caractérise par la fermentation en continu et à dégradation élevés pour des temps de séjour courts. Cela se traduit par :

- une production de gaz importante,
- une réduction du volume du fermenteur.

L'unité de méthanisation comprend :

- le malaxage-pompage,
- la fermentation et la recirculation du gaz,
- le pressage.

### Le malaxage-pompage

Les déchets fermentescibles sont mélangés en continu avec les eaux de pressage, afin d'obtenir une matière présentant les caractéristiques requises pour une fermentation optimale.

### La fermentation

La matière introduite dans le digesteur y séjourne 15 à 20 jours en régime mésophile (40°C).

Le brassage est effectué par un système automatisé d'agitation pneumatique qui utilise l'énergie du gaz. Il permet l'homogénéisation indispensable de la matière en fermentation.

### Le pressage

Après digestion, la matière est extraite du digesteur et pressée pour atteindre un taux de matière sèche de l'ordre de 50 à 60 %. Les eaux de pressage sont traitées et recyclées vers le malaxage-pompage. Les eaux excédentaires sont également traitées.

## II.5. Affinage

Après digestion, la matière est sous forme désagrégée qui permet une bonne séparation des éléments non biodégradables de l'amendement organique final.

### L'émottage

La matière pressée, compacte, passe dans un émoteur pour faciliter les diverses séparations.

### La séparation de la matière combustible

Elle est réalisée par le passage dans un crible rotatif à mailles fines.

### Le stockage et conditionnement de l'affinat

L'affinat est stocké de manière à assurer la pasteurisation contrôlée du produit et peut alors être commercialisée en vrac ou en sacs. La collecte sélective optimise la qualité de l'affinat.

## II.6. Valorisation des produits

### Le biogaz

Le biogaz issu de la fermentation des déchets organiques contient 50 à 60 % de méthane, 40 à 50 % de gaz carbonique, 200 à 4000 ppm d'hydrogène sulfuré. Il est saturé en eau. Le pouvoir calorifique supérieur est de 5,5 à 6,5 kWh par m<sup>3</sup>. Il peut être utilisé en l'état dans une chaudière, un four, un moteur ou une turbine, et permettre entre autre la production d'électricité.

Après traitement, il a les caractéristiques du gaz naturel et peut être injecté dans un réseau urbain.

### L'affinat

L'affinat est un amendement organique. Il présente les avantages suivants :

- **restauration de la qualité des sols** : l'affinat est un amendement organique auquel la méthanisation confère des qualités et une haute efficacité agronomique. Sans odeur, ayant l'aspect d'un terreau, l'affinat est riche en composés humiques favorables à la restructuration des sols, leur aération, leur bilan hydrique et leur résistance au tassement.

Ces qualités débouchent sur une meilleure gestion des fertilisants, une limitation des pollutions, et des rendements obtenus sans érosion des terrains de culture.

- **adaptation aux besoins locaux** : les déchets organiques sont profondément transformés et restructurés au cours de la fermentation en phase semi-liquide. Le produit final présente ainsi des caractéristiques suffisamment stables pour être complétement en fonction des besoins spécifiques des diverses cultures.

### Le combustible

Les refus de la chaîne de tri et de la chaîne d'affinage constituent un combustible sec à pouvoir calorifique plus élevé que celui des ordures ménagères brutes. Une chaîne de combustion permet de valoriser cette matière en minimisant les nuisances pour l'environnement.

Elle permet :

- de générer de la vapeur ou de l'eau surchauffée disponible pour l'industrie et de récupérer éventuellement de l'énergie basse température ;
- de rejeter dans l'atmosphère des fumées, froides, traitées, neutralisées et non saturées en eau, avec des caractéristiques satisfaisant aux normes européennes.

Les produits recyclables

Ils sont composés de papiers-cartons, plastiques (PCV, PET), verre, métaux. Le contexte local de leur valorisation détermine l'ampleur du tri semi-automatique.

## III - RESULTAT D'INSTALLATION

Les résultats sont issus principalement de l'installation d'Amiens, dont la construction a débuté en 1985 et la mise en charge en août 1988.

### III.1. Caractéristiques de l'installation d'Amiens

L'installation comprend trois fermenteurs méthanigènes de 2400 m<sup>3</sup> chacun de volume total (1850 m<sup>3</sup> de volume utile) alimentés par environ 55 000 tonnes de fraction organique d'ordures ménagères par an, dont la composition initiale moyenne est reprise dans le tableau ci-dessous. Le tri des ordures brutes et le pressage du digestat fonctionnent cinq jours par semaine, la méthanisation et la génération de vapeur sont continus.

	Composition (% masse)	Matières sèches (%)
Papier-carton	32	65
Fermentescibles	32,5	40
Plastiques	13	80
Textiles	3	80
Métaux	5	95
Verres, autres inertes	14,5	95

Composition moyenne des ordures ménagères

### III.2. Méthanisation

Les grandeurs de gestion et les performances des réacteurs méthanigènes sont reprises dans le tableau ci-dessous. Les valeurs sont d'une part, les moyennes expérimentales relevées pour une année d'exploitation (de mai 1990 à mai 1991), pour ce qui concerne le régime mésophile, et d'autre part, les résultats escomptés pour ce qui concerne le régime thermophile (essais en 1992).

Paramètres	Régime mésophile	Régime thermophile
Température (°C)	37 - 40	55 - 60
pH (-)	7 - 7,2	7 - 7,2
Temps de rétention (d)	17 - 25	12 - 18
Quantité d'ordure traitée (t/d)	150	150
Charge (kg M.O <sup>(*)</sup> /m <sup>3</sup> d)	7,5 - 9	10 - 13
Production de gaz (m <sup>3</sup> gaz/d)	15 000	20 000
Concentration CH <sub>4</sub>	54	55 - 60
Rendement méthanisation (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t MO <sup>(*)</sup> )	210 - 240	220 - 260

(\*) matière organique

### Résultat de méthanisation

#### III.3. Digestat

Le digestat de méthanisation après pressage, contient 50 à 55 % de matières sèches. Des analyses microbiologiques réalisées à l'Université de Lyon ont montré l'absence de risque pour l'usage du digestat en agriculture et le peu de risque concernant son utilisation en alimentation animale.



## VALORISATION/TRAITEMENT, PROCEDE DRANCO

### I - ORGANIC WASTE SYSTEM N.V.

La commercialisation du procédé DRANCO (DRY ANarobic CONversion) est l'unique objet de la Société OWS, créée en 1988. Le procédé DRANCO a été mis au point dès 1980, en collaboration étroite avec l'Université d'Etat à Gand (Belgique), qui continue à apporter un appui scientifique.

Les activités d'OWS ne se limitent pas à la vente d'installation de fermentation, elles concernent :

- Ingénierie générale et détaillée
- Equipementation
- Installation DRANCO clé en main
- Démarrage des installations
- Assistance technique
- Financement
- Tests de laboratoire, tests de biodégradabilité
- Etudes de faisabilité
- Consultance pour la collecte séparée de déchets

La Société OWS est multilingue, partenaire de sociétés de traitement de déchets implantées partout dans le monde.

O.W.S. n.v.  
DOK Noord 7b  
9000 GENT  
Belgique  
Tél. (32) 91.33.02.04  
Fax. (32) 91.33.28.25

### II - PROCEDE DRANCO

#### II.1. Généralités

Le procédé DRANCO est un procédé de stabilisation et de traitement de déchets organiques biodégradables et concentrés. Ce procédé convertit les

déchets, ou substrats, en un résidu de digestion stable et hygiéniquement irréprochable, ainsi qu'en biogaz.

Si ce procédé s'est développé en vue du traitement de la fraction organique des ordures ménagères, il s'adresse à tout substrat organique concentré, on peut citer :

- Fraction organique des ordures ménagères
- Déchets issus de collecte sélective
- Boues de papeterie
- Boues aérobies
- Déchets de restaurant
- Lisiers concentrés
- Déchets de canne à sucre
- Drèches de brasserie
- Biomasse aquatique
- Cultures énergétiques

Des études de faisabilité ont déjà été pratiquées sur certains de ces substrats, comme en témoigne la liste de référence ci-dessous.

Fondamentalement le procédé DRANCO comprend le fermenteur méthanigène thermophile et les étapes ultérieures conduisant à un digestat stable utilisable comme amendement organique, l'Humotex. Ces deux étapes sont décrites en détail ci-après. Les ordures ménagères traitées par le procédé doivent donc être préalablement triées ou être issues de collectes sélectives.

Enfin le procédé est entièrement couvert par deux brevets.

Déchets	Echelle	Volume (m <sup>3</sup> )	Année	Localisation
Déchets mélangés	Démonstration	60	1984	Gand (B)
Déchets mélangés	Etude faisabilité	-	1985	Twente (NL)
Déchets de marché	-	30	1986	Indonésie
Boue papeterie	Etude faisabilité	1	1986	Buhrmann-Tetterode (NL)
Boues diverses	Etude faisabilité	-	1987	Amersfoort (NL)
Drèches brasserie	Etude faisabilité	-	1989	Heineken (NL)
Déchets mélangés	-	1	1989	Orlando (Floride)
Déchets mélangés + fumier de volaille	Etude faisabilité		1990	Vejle (DK)
Déchets mélangés + boues aérobies	-	5	1990	Graz (Austria)
Déchets de collecte sélective	Etude faisabilité	-	1991	Tiel (NL)
Déchets de collecte sélective	Taille réelle	808	1992	Brecht (B)

Liste de références

## II.2. Méthanisation

Après pesée et addition de vapeur pour porter l'entrant à 50°C, de manière à permettre le démarrage immédiat de la fermentation thermophile, le substrat est introduit par le haut du réacteur.

Un isolant épais (12 cm) minimise les pertes thermiques du réacteur. La vapeur requise pour le chauffage est produite par un générateur alimenté au biogaz. Les besoins thermiques sont très bas à cause de la faible teneur en eau du substrat et du caractère légèrement exothermique de la fermentation.

La fermentation se déroule de manière intense durant 18 jours en moyenne, la matière organique cheminant en un écoulement de type piston de haut en bas du réacteur. Un système breveté d'extraction de la matière permet son élimination tout en assurant une étanchéité aux gaz de fermentation. Environ 60 % des matières organiques sont transformées en biogaz, composé d'environ 55 % de méthane. Le biogaz peut être stocké dans un ballon souple, servant de tampon, avant sa conversion en électricité par un moteur à gaz (30 % de l'électricité est utilisée par le procédé). Les pertes thermiques du moteur à gaz sont utilisées pour évaporer le liquide de pressage et pour la production de vapeur.

## II.3. Digestat

Le digestat est pressé pour produire un "cake" à environ 65 % de matières sèches, subséquemment séché à 70 % MS. Ce résidu est finalement tamisé pour produire un produit fini valorisable, l'Humotex. Une étape aérobie de compostage peut suivre le pressage. Le liquide issu du pressage est évaporé sous vide, de manière à produire un liquide clair, rejeté, et un concentré, recyclé dans le fermenteur. La composition typique de l'Humotex ainsi que sa qualité bactériologique sont reprises dans les tableaux ci-dessous. De nombreuses expérimentations ont montré la qualité d'amendement organique de ce produit; il est disponible commercialement.

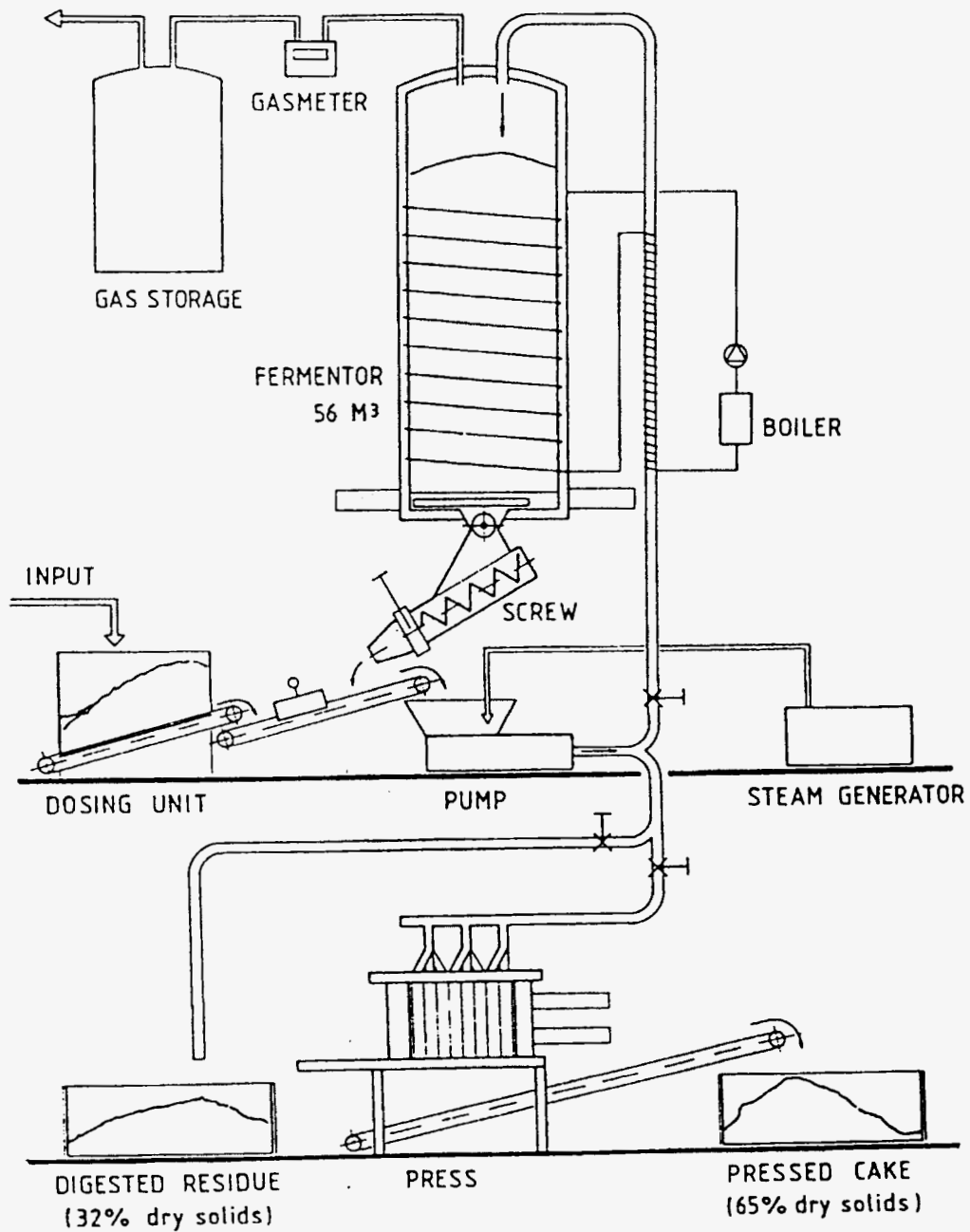
Solide totaux (%)	70-75
Solides volatiles (% solides totaux)	44-53
N total (%)	1,8-2,1
P total (%)	0,15-0,20
K total (%)	1,0-1,2
Ca CO <sub>3</sub> (%)	5,2-6,4
C/N	12-15
pH	8,0-8,6

	Ordures ménagères fraîches	Compost aérobie (6 semaines)	Humotex (3 semaines)
Rapport C/N	30	15	12
Demande d'O <sub>2</sub> cumulée (mg O <sub>2</sub> /g, 10 jours)	250-300	150-160	50-60
Microorganismes (CFU/g MS)			
E. coli	3 10 <sup>3</sup>	4 10 <sup>2</sup>	0
Streptocoques sp.	2 10 <sup>5</sup>	4 10 <sup>4</sup>	0

Qualité et composition typiques de l'Humotex



## DEMONSTRATION PLANT GENT



La première installation de taille industrielle a été inaugurée à Brecht, près d'Anvers (Belgique) début 1992. Les caractéristiques et les grandeurs du design de ce réacteur sont les suivantes :

- 10 500 t ordures ménagères/an (issus de collecte sélective)
- 808 m<sup>3</sup>, 21 m haut, 7 m diamètre
- temps de résidence : 18 jours
- 50-55°C
- 6 - 8 volume biogaz/volume jour
- compostage aérobie du digestat (50 - 55 % matières sèches) durant 10 jours avant la vente sous le nom d'Humotex comme fertilisant.



## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### 1. Les souches

Des données de plus en plus nombreuses sont accessibles sur la compréhension des voies métaboliques. Dans le domaine de biodégradation, il n'y a pas à notre connaissance, d'exemples permettant de montrer :

- qu'une souche multipotente pourrait faire un travail que ne pourrait faire une population mixte ;

- qu'une souche multipotente pourrait avoir des performances cinétiques supérieures à celles d'une culture mixte ;

Maintenant, reste à définir une culture mixte. Le transfert de gènes s'effectue in vivo et donc la culture mixte en tant que telle évolue. Il y a sous l'effet d'une pression de sélection cinétique compatible avec les normes de rejet, réduction du nombre de souches. Les risques d'utilisation de telles souches sont minimales. Car les modifications impliquent en effet des gènes déjà existant dans les souches naturellement présentes dans l'environnement et entre lesquelles les probabilités de transferts naturels existent.

Il faut donc définir les conditions dans lesquelles les transferts se font naturellement sous l'effet de pressions de sélection cinétique et environnementale. Des gènes dégradatifs clonés dans différents vecteurs peuvent servir de sonde pour le repérage dans l'environnement, par hybridation moléculaire, de gènes homologues portés par d'autres souches.

Cette approche est importante pour vérifier et confirmer les résultats concernant les transferts, obtenus en culture mixte. Cependant, le plus important est d'être capable d'évaluer le potentiel des souches en termes de cinétique :

- cinétique de croissance microbienne,
- cinétique de minéralisation des produits.

Actuellement, tout se passe comme si l'on se contentait des performances biologiques observées, performances que l'on essaie d'améliorer par les techniques classiques du génie chimique.

Les performances biologiques observées aujourd'hui représentent-elles la moitié, le tiers, le dixième des performances biologiques potentielles ? Il serait temps de donner des éléments de réponse.

## 2. Les enzymes

Les enzymes seront de plus en plus utilisées dans les procédés pour prévenir la pollution soit en remplacement de produits chimiques toxiques pour l'environnement, soit en améliorant les rendements d'extraction et/ou en améliorant la biodégradabilité des composés considérés.

## 3. Traitement des sols

Deux grands problèmes à résoudre :

- l'effet des accepteurs d'électrons sur les cinétiques de biodégradation : les accepteurs d'électrons jouent un rôle tout aussi sélectif que les polluants sur la flore microbienne ;

- les relations structure/colonisation : la colonisation d'un milieu dépend largement de sa structure. Comment dans les traitements sur site faut-il modifier la structure du sol pour améliorer la biodégradation des polluants ?

Des travaux sur les réacteurs restent à faire, mais ils nous semblent moins prioritaires.

## 4. Traitement des COV

Deux problèmes importants de nature différente :

- la désodorisation fait souvent appel au métabolisme de composés soufrés. Peu d'études microbiologiques sont faites sur la culture en masse de cellules microbiennes sur ces composés ;

- dans le cas des composés organiques volatils, des problèmes importants restent à résoudre sur les composés non solubles dans l'eau. Comment améliorer le transfert de ces produits vers la phase aqueuse ou vers une phase organique non biodégradable? Faut-il travailler avec des boues activées ou des cellules fixées ?

Les émissions de COV sont rarement continues. Comment absorber sans danger des variations de charge importantes ? Quelle phase tampon faut-il envisager pour regulariser ces variations ? Enfin, concernant les solvants chlorés ou substitués, la biodégradation est souvent plus efficace en anaérobie qu'en aérobie. Travaillant avec des mélanges, il est possible d'envisager de travailler avec des microorganismes immobilisés, par exemple sur des billes ou des films. La partie superficielle en contact avec la phase air aurait un métabolisme aérobie alors que la partie inférieure aurait un métabolisme anaérobie.

Dans les deux cas considérés, le génie chimique a déjà bien étudié les transferts gaz/liquide, la conception des réacteurs pour travailler en milieu multiphasique pose encore quelques problèmes techniques.

#### **5. Le traitement des eaux industrielles par méthanisation**

Faut-il ou non envisager l'utilisation de co-substrats plus facilement métabolisables ? La question reste posée.

#### **6. Le traitement des déchets par compostage**

Si l'on peut envisager de travailler sur des aires de compostage étanches permettant de récupérer les lixiviats alors nous croyons au potentiel important de cette technique d'autant que l'on peut tirer profit du fait que les bactéries mésophiles et thermophiles peuvent avoir des métabolismes différents.

#### **7. Le traitement des déchets par méthanisation**

Des progrès importants ont été effectués dans la méthanisation des matières organiques des ordures ménagères.

#### **8. Sur le plan économique**

Il est remarquable de constater que chaque fois que des données économiques ont pu être obtenues, elles positionnent les procédés biologiques parmi les technologies de traitement les plus économiques.

Il semble qu'elles aient particulièrement bien réussi dans le traitement des sols, qu'elles se développent rapidement dans le domaine du compostage et du traitement des gaz et qu'elles sont appelées à se développer dans les traitements spécifiques de molécules toxiques ou récalcitrantes à la sortie des ateliers et en amont des stations d'épuration.

Cependant les techniques biologiques souffrent d'un handicap important : si pour les microbiologistes tout ou presque est biodégradable, encore faut-il être capable d'évaluer des vitesses de biodégradation d'un nombre important de souches. Des techniques de criblage permettent déjà d'évaluer les cinétiques de biodégradation d'un grand nombre de souches dans des conditions environnementales très différentes permettant de prédire le potentiel des souches sur les substrats considérés. Un criblage systématique permettant d'évaluer les potentiels des souches dans des environnements différents est indispensable pour crédibiliser les techniques biologiques. Il deviendra ainsi possible de prévoir le comportement des souches plutôt que de le subir.

## RECENSEMENT DES ENTREPRISES FRANCAISES IMPLIQUEES DANS LES TRAITEMENTS BIOLOGIQUES DE DECHETS.

Un recensement des entreprises françaises impliquées dans le traitement biologique de déchets a été réalisé via le Kompass France 1991, au mots-codes suivants :

Code :	85-400	Entretien et Nettoyage de Bâtiments et de Locaux
catégorie :	30	travaux dangereux
Code :	85-420	Assainissement, Stérilisation, Désinfection
catégories :	08	entreprises pour la destruction de tous produits chimiques et toxiques
	11	décontamination des sites pollués
Code :	85-600	Nettoyage de Conduits et Réservoirs, Traitement des Eaux
catégories :	31	traitement des eaux résiduaires d'usines (entreprises de)
	32	traitement des eaux résiduaires de teintureries (entreprises de)
	36	traitement des eaux de papeteries
	40	traitement des boues (entreprises de)
Code :	85-700	Collecte et Traitement des Ordures et des Déchets Industriels
catégories :	06	entreprises d'enlèvements des déchets industriels
	10	traitement des déchets industriels
	11	traitement des déchets d'hydrocarbures
	20	traitement de boue d'épuration et de déchets organiques

Quatre-vingt cinq entreprises susceptibles de détruire des déchets (au sens développé dans le contrat Record) par voie biologique ont ainsi été recensées. Ces entreprises ont été contactées par lettre, puis le cas échéant, par appel téléphonique. Une dizaine d'entreprises ont répondu directement, ce qui constitue un pourcentage normal pour ce genre de mailing. De ces entreprises, et des autres rappelées par téléphone, quatre seulement ont répondu utiliser ou promouvoir des traitements biologiques, il s'agit des établissements:

Orgatech, procédé Biosec, Z.I. des iscles, Av. des Confignes, 13834 Chateaurenard cedex,  
Imbach Biological Services, 20 rue Traversière, 92230 Gennevilliers,  
Codabio, C.D. 4 - Z.I. Estressin, 38200 Vienne,  
Technorga Industries, 10 rue de Massacan, 34740 Vendargues.

Les détails des procédés utilisés ou développés par les trois premières entreprises sont annexés, la technologie de la quatrième (Procédé Valorga) est longuement décrite dans un autre chapitre. Sont joints également copie de la lettre adressée aux entreprises sélectionnées ainsi que la liste et les adresses de ces dernières.

Monsieur,

Pour le compte de l'Association Record et de l'ANRED, l'Institut de Recherches Hydrologiques et l'Université de Technologie de Compiègne réalisent une enquête sur le traitement des déchets par voie biologique.

Vous trouverez ci-joint quelques informations complémentaires sur cette enquête.

Dans ce cadre, nous avons pratiqué une recherche dans le Kompass France, des entreprises traitant les déchets. Le nom de votre entreprise est issu de cette recherche pratiquée sur les codes Kompass n° 85 - 400, 85 - 420, 85 - 600 et 85 - 700. Pourriez vous avoir l'obligeance de nous faire savoir si, dans le cadre des traitements des déchets que vous pratiquez, vous utilisez des procédés comportant au moins une étape biologique et dans l'affirmative, nous envoyer une documentation ou toute information y correspondant.

Vous remerciant par avance, veuillez agréer, Monsieur, l'expression de mes meilleures salutations.



J. M. LEBEAULT  
Professeur

## L'Université de Technologie de Compiègne

Division Procédés Biotechnologiques  
 Professeur J.M. LEBEAULT  
 UTC - BP 649  
 F-60206 COMPIEGNE Cédex  
 Tél (33) 44 23 44 56

Fax (33) 44 20 48 13

## L'Institut de Recherches Hydrologiques

Docteur F. COLIN  
 11bis rue Gabriel Péri - BP 286  
 F-54515 VANDOEUVRE LES NANCY Cédex  
 Tél (33) 83 50 36 00

Fax (33) 83 50 36 99

Sont mandatés par l'Association RECORD (REseau COopératif de Recherche sur les Déchets)

CEI  
 Professeur A. NAVARRO  
 27 Bd du 11 novembre 1918 - BP 2132  
 F-69603 VILLEURBANNE Cédex  
 Tél (33) 72 43 81 88

Fax (33) 72 44 07 32

et par l'ANRED

Agence Nationale pour la Récupération et l'Élimination des Déchets  
 Monsieur P. PHILIPPE  
 2 Square Lafayette - BP 406  
 F-49004 AUGERS Cédex 01  
 Tél (33) 41 20 41 20

Fax (33) 41 87 23 50

pour effectuer une étude sur les "Biotechnologies appliquées au traitement des déchets : état de l'art".

L'objectif de cette étude est de dresser un état des activités de recherches des connaissances acquises, des réalisations industrielles et des applications potentielles de la Biotechnologie dans le domaine du traitement des déchets.

Les déchets considérés sont :

- rejets liquides non aqueux concentrés (à l'exclusion des rejets dilués assimilables à des eaux usées) ;
- déchets solides (à l'exclusion des ordures ménagères), avec priorité accordée aux déchets d'origine industrielle) ;
- sols contaminés ;
- phases gazeuses.

Les applications de la Biotechnologie seront considérées aux fins suivantes :

- valorisation d'une fraction de la totalité du déchet ;
- décontamination ou détoxification du déchet ;
- destruction partielle ou totale par métabolisation du déchet ;
- résolution des problèmes d'environnement immédiat (lutte contre les nuisances, notamment odeurs et les risques) ;
- prétraitements des déchets afin de les rendre accessibles à l'élimination ou à la valorisation par voie biologique.

Nom	Adresse	Téléphone	Codes Compass
A.C.I. Laboratoires	48, rue du Repos; B.P. 7009; 69343 LYON Cedex 07	78 72 25 91	85-600,31
A.T.E. Séparépur	Zone Industrielle; B.P. 09; 59147 GONDECOURT	20 90 30 70	85-420,11
ADEQUA	12-14, rue Lazare Carnot; 92130 ISSY LES MOULINEAUX	(1) 47 36 87 87	85-700,06,09,10
ADY	5, avenue des Frères Montgolfier; 69680 CHASSIEU	78 90 29 77	85-600,40
Alsace Environnement	35, rue des Aviateur; B.P. 53; 67501 HAGUENAU Cedex	88 93 60 70	85-600,36
Belec	2, Venelle du Prat Lédan; B.P. 33; 29276 BREST Cedex	98 05 02 14	85-600,31,40
Bez Ind.	Allée du 1er Mai; CROISSY BEAUBOURG ; B.P.43; 77312 MARNE LA VALLEE Cedex 02	(1) 60 06 59 60	85-420,8
BEZ	16, rue du Landy; 93210 LA PLAINE SAINT DENIS	(1) 48 09 85 71	85-420,8; 85-400,30
Boll Filter France	Z.A.C. des Brosses; rue des Mongzons; MAGNANVILLE; 78200 MANTES LA JOLIE	(1) 34 77 46 35	85-600,31,36,40
C.G.E.C.	7, rue Cambronne; 75739 PARIS Cedex 15	(1) 42 46 82 70	85-400,30
C.I.F.E.C.	12 Bis, rue du Commandant Pilot; 92200 NEUILLY SUR SEINE	(1) 46 37 54 02	85-400,30
C.O.V.E.D.	Z industrielle; Rue Thimonnier; 64140 LONS/BILLERE	59 32 25 25	85-600,06
C.S.A.	Z.I. de la Gare; B.P. 62; 44980 SAINT LUCE SUR LOIRE	40 25 66 00	85-600,31,40
Cayon	Rue L. Jacques Thénard; B.P. 299; 71107 CHALON SUR SAONE	85 41 58 58	85-420,8
CECA S.A.	Avenue Alfred Nobel; 64000 PAU	59 92 44 00	85-700,09
CEGELEC	13, rue Antonin-Raynaud; 92309 LEVALLOIS PERRET Cedex	(1) 47 48 70 00	85-600,31,36,40
Choquetnet	19, rue Charles Brunette; 02301 CHAUNY	23 38 36 00	85-600,31,32,36,40

Nom	Adresse	Téléphone	Codes	Kompass
CO.H.U.	10 rue Ampère; MONTIGNY LE BRETONNEUX; 78390 BOIS D'ARCY	(1) 30 58 09 09	85-400,30	
Codabio	CD 4; Z.I. d'Estressin; 38200 VIENNE	74 31 61 22	85-600,31,32,36	
Cofineco	3, Rond Point des Champs Elysées; 75008 PARIS	(1) 445 62 38 08	85-600,06	
Daires (Alec)	991, avenue du Pont Trinquat; 33400 MONTPELLIER	67 65 19 68	85-600,31,32	
Delta Automation	12, rue de la Mayence; 21000 DIJON	80 74 13 20	85-600,31,36,40	
Doucet-France	134, route de Genève; 74240 GAILLARD	50 38 55 11	85-700,10	
E.E.I.A.	Z.I. du Chail; Route de Cognac; B.P. 84; 17800 PONS	46 96 16 90	85-700,11; 85-600,06	
E.M.O.	Zone Artisanale Route de Montgermont; B.P. 22; 35740 PACE	99 60 63 63	85-400,30	
Eau Technologies S.A.	14, rue Gorge de Loup Cap. Vaise; 69009 LYON	78 43 42 50	85-600,31,32,36,40	
Electrolyse (sté l')	Zone Industrielle; 33360 LATRESNE	56 20 74 40	85-600,06	
Epsi Technologies	5, Place A. Malraux; 75001 PARIS	(1) 42 60 34 50	85-600,40	
Esys	73, Boulevard Haussmann; 75008 PARIS	(1) 42 65 56 20	85-700,06	
Europe (Combustion	10 avenue de Concy; 45071 ORLEANS Cedex	38 51 57 38	85-700,11	
Fourrier et Cie	Rue Prony; B.P. 311; 37303 JOUE LES TOURS Cedex	47 53 91 84	85-700,10	
G.E.P.	28, rue Pierre Sémard; 38000 GRENOBLE	76 62 40 30	85-600,31,32,36	
G.S.A.	1, allée de la Bastide des Cyprès; 13100 AIX EN PROVENCE	42 21 99 90	85-600,31,32,36,40	
G.s.f. Saturne	39, Boulevard Nancy; 67000 STRASBOURG Cedex	88 32 12 15	85-400,30	



Nom	Adresse	Téléphone	Codes Kompass
GCA	Immeuble Le Florentin; 71, rue Chemin du Moulin Carron; 69570 DARDILLY	78 35 27 76	85-400,30
GEREP	Rue Jacquard; Z.I. de Mitry Compans; 77290 MITRY-MORY	(1) 64 27 16 97	85-400,30
Guinard Centrifugation	18, rue Gounod, 92210 SAINT CLOUD	(1) 46 02 65 38	85-600,31,40
I.F.T.S.	Rue Marcel Pagnol; 47510 FOULAYRONNES	53 95 83 94	85-600,32,40
I.N.O.R.	8, rue Henri Becquerel; 92508 RUEIL MALMAISON Cedex	(1) 47 32 03 00	85-700,09
Imbach Biological Services (IBS)	20, rue Traversière; 92230 GENNEVILLIERS	(1) 47 33 61 69	85-400,30
Interdéchets	20, ZI des Longs Rideaux; 94450 LIMEIL-BREVANNES	(1) 43 39 51 45	85-600,31,40
Laurent Bouillet	3, Place Renault; 92508 RUEIL MALMAISON Cedex	(1) 47 52 78 00	85-420,11;85-700,06,09,10; 85-400,30; 85-600,06
Lurgi	127, Bureaux de la Colline; 92213 SAINT CLOUD	(1) 49 11 37 00	85-600,40
Metallgesellschaft	136, Bureaux de la Colline; 92213 SAINT CLOUD	(1) 47 71 16 16	85-600,06
Multiserv	39, rue de Paris; B.P. 176; 57104 THIONVILLE	82 82 26 00	85-700,06,09
Nationale de Chimie Fine	13, rue Foucault; 92110 CLICHY	(1) 42 70 58 02	85-700,06,09
Navarra	Avenue du Val de Leyre; MARCHEPRIME; B.P. 17; 33380 BIGANOS	56 23 13 23	85-700,10,11
O.P.N.	Avenue de l'Europe; Clairière de l'Anjoly; 13127 VITROLLES	42 89 95 64	85-400,30
Ocene	Avenue de Monthorin; 35420 LOUVIGNE DU DESERT	99 98 00 58	85-600,06,31,40
ONET	45, rue de Courcelles; 75008 PARIS	(1) 42 29 00 59	85-600,31,40
Orgatech	Z.I. des Iscles, avenue des Conignes B.P. N°24; 13834 CHATEAURENARD CEDEX	90 94 69 00	85-700,10,20

150	Nom	Adresse	Téléphone	Codes Kompass
	PECO S.A.	29, rue des Vinaigriers; B.P. 193; 75463 PARIS	(1) 42 0349 94	85-420,11; 85-400,30
	Reinier (Entreprise H.)	Traverse de Pomègues; 13008 MARSEILLE	91 23 22 21	85-700,10; 85-400,30
	S.a.r.l.p.	51-57, avenue de la Division Leclerc; 93430 VILLETANEUSE	(1) 48 21 61 75	85-420,8; 85-600,06
	S.A.T.C.	34, rue Fernand Piolé; B.P.2; 76750 BUCHY	35 34 31 39	85-600,31,36,40
	S.A.V.A.C.	Z.I. Saint Eloi; B.P. 7; 58018 NEVERS Cedex	86 36 03 77	85-420,8; 85-600,06
	S.e.r.e.p.	11, rue du Pont V; B.P. 7012 X; 76080 LE HAVRE Cedex	35 53 50 05	85-600,40
	S.G.A.D.	27, Boulevard Joseph Vernet; B.P. 98; 13267 MARSEILLE Cedex 08	91 76 33 33	85-600,31,40
	S.P.U.R.	Z.I. La Charotte; Rue Georges Sand; 42350 LA TALAUDIÈRE	77 33 12 58	85-420,8; 85-600,06
	S.T.D.F.	54, rue François Arago; 13005 MARSEILLE	91 42 30 80	85-600,31,32,36,40
	Sanilo	6, rue Jean Goujon; 75008 PARIS	(1) 42 25 25 53	85-600,31
	Saur	1, rue Eugène Freyssinet "Challenger"; 78064 SAINT QUENTIN EN YVELINE	(1) 30 60 22 60	85-600,31,40; 85-700,02,10
	Scori	10, rue Ampère; Parc Technologique; B.P. 45; 78390 MONTIGNY LE BRETONNEUX	(1) 30 58 36 36	85-700,10,11
	Secula (Els Etienne)	33, avenue des Sablières; B.P. 128; 21204 BEAUNE Cedex	80 22 27 53	85-700,09,10
	Seftiec	49, rue de la Vallée Barbot; 91580 ETRECHY	(1) 60 80 43 17	85-600,36,40
	SIAP	Boulevard de l'Industrie; 33530 BASSENS	56 31 72 22	85-420,8,11; 85,10,11
	SIDIC	28, Boulevard Carnélinat; B.P. 70; 92233 GENNEVILLIERS Cedex	(1) 47 99 80 80	85-600,31,40
	SIRA	Z.I. de l'Isloir; 38670 CHASSE SUR RHONE	78 07 17 17	85-420,8,11; 85-700,10,11

Nom	Adresse	Téléphone	Codes Compass
Sital	22, rue de Cherbourg; B.P. 19; 67026 STRASBOURG Cedex	88 39 6004	85-700,09,10
Sitrem	64-66, route de Paris; 93130 NOISY LE SEC	(1) 48 44 72 94	85-600,31
So.Mo.Net	Quartier de la Glacière; B.P. 11; 13220 CHATEAUNEUF LES MARTIGUES	42 07 31 86	85-420, 08,11; 85-400,30; 85-600,06; 85-700,06
SOCIETE NOUVELLE FAURE	86, avenue de Saint Ouen; 75018 PARIS	(1) 42 29 00 59	85-420,8; 85-400,30
Sogefa	Route de Séjanne; 51260 ANGLURE	26 42 72 65	85-700,10,17
SOLAMAT	Montée des Pins; B.P. 2; 13340 ROGNAC	42 87 06 72	85-420,8; 85-700,10,11
Somacom International	179, rue des Fauvelles; 92400 COURBEVOIE	(1) 47 88 44 00	85-600,31,32,36,40
Soprovid	145, avenue Roger Chieusse;!Estaque; 13016 MARSEILLE	91 46 11 99	85-420,8; 85-600,31,32,36,40; 85-700,06,09,11; 85-400,30
SOTREMO	Z.I. Sud; Rue Louis Bréguet; 72000 LE MANS	43 72 27 72	85-420,8,11; 85-700,10,11
T.I.R.U.	134, Boulevard Haussmann; B.P. 47608; 75008 PARIS	(1) 40 76 38 00	85-700,09,10
T.R.U.	62, rue de la Justice; B.P. 1063; 59011 LILLE Cedex	20 78 52 52	85-420,8
Technorga Ingénierie	10, rue de Massacan; Parc Industriel; 34740 VENDARGUES	67 70 50 06	85-700,09,10
Transfluide	74-80, rue Roque de Fillol; 92800 PUTEAUX	(1) 47 67 06 70	85-700,10
Transor	3, rue de la Rivière; B.P. 17; 78420 CARRIERES SUR SEINE	(1) 39 13 00 00	85-700,06,09,10
V.T.E.	133, rue du Général Mesny; B.P. 1; 59320 HAUBOURDIN	20 07 60 61	85-600,31,32,36,40
WEDECO	3 Bis, rue Barthélémy Thimonnier; Z.I. Bel Air; 78120 RAMBOUILLET	(1) 34 85 78 04	85-600,31,32,36
Yves Madeleine S.A.	Z.I. Route de Domfront; 61100 FLERS	33 66 39 00	85-420,8; 85-600,06

**RECENSEMENT DES ENTREPRISES IMPLIQUEES  
DANS LE TRAITEMENT DES DECHETS  
PRESENTEES A L'ACHEMA 1991 - FRANCFORT**

## BAYER AG Geschäftsbereich Pigmente und Keramik

A: Bayerwerk, D-W-5090 Leverkusen - ☎ (02 14) 3 01 -  
 Tx: 85103226 - Fax: (02 14) 3 06 64 11

### Umweltschutz - Betriebstechnik

Verfahren/Produkte zur Behandlung von:

#### Abwasser

• Turmbiologie<sup>®</sup> mit dem Injektor-Begasungssystem • Ertüchtigung vorhandener Beckenbiologien • Anaerob-Verfahren mit speziellen Trägermaterialien • Flotation zur Schlammabtrennung • Oxidative Vorbehandlung stark belasteter Abwasserteilströme (LOPROX<sup>®</sup>-Verfahren) • Aufbereitung von Altemulsionen/Altölen

#### Abluft

• Verbrennung explosionsfähiger Gasgemische (Tarex<sup>®</sup>-Verfahren) • Kondensationselektrofilter • Biowäsche

#### Abfall

• Sondermüllverbrennung • Verbrennung von Abwasserkonzentraten • Klärschlammverbrennung • Deponietechnik

### Pollution Control - Industrial Technology

Environmental protection technology/products for the treatment of:

#### Waste water

• Tower Biology with the injector aeration system • Modernization

of existing biological tanks • Anaerobic process with immobilization • Flotation of sewage sludge • Pre-treatment of selected waste water streams with the Low Pressure Wet Oxidation process (LOPROX<sup>®</sup> process) • Demulsifiers for used cutting oils/used emulsions

#### Waste air

• Thermal waste air purification (TAREX<sup>®</sup> incinerator) • "Wet wall" electrostatic precipitator • Biological scrubbing • Silicon oil scrubbing

#### Solid Waste

• Incineration of special solid, pasty and liquid wastes • Incineration of waste water concentrates • Incineration of sewage sludge • Landfill technologies

Biotim, Antwerpen

Halle 4.2, Stand E 19  
 ☎ 7 44 35 44

### BIOTIM N.V.

A: Theodoor van Rijswijkplaats 7, B-2000 Antwerpen -  
 ☎ (03) 2 26 10 10 - Tx: 32051 - C: (03) 2 26 06 77

### Umweltschutz - Betriebstechnik

Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:

Anaerobe Abwasserreinigung Verfahren und komplette Anlagen zur Reinigung industrieller Abwasser nach biologischen und physiko-chemischen Methoden.

### Pollution Control - Industrial Technology

Water, waste water, liquid media and sludges:

Anaerobic waste water treatment. Processes and complete plants for the treatment of industrial waste water by biological and physico-chemical methods.

Siehe auch Teil C / See also Part C / Voir aussi Partie C

#### Niederlassung/Vertretung - Branch/Agency

Zu erfragen am Stand - may be asked at: our stand

Bischoff, Essen

Halle 4.2, Stand FG 5-7

### Gottfried Bischoff GmbH & Co. KG

A: Gärtnerstr. 44, ☐ 10 05 33, D-W-4300 Essen 1 -  
 ☎ (02 01) 81 12-0 - Tx: 857779 - C: GASBISCHOFF ESSEN -  
 Fax: (02 01) 81 12-2 50

### Umweltschutz - Betriebstechnik

Planung Konstruktion und Bau von Anlagen zur Rauchgasentschwefelung Rauchgasreinigung, H<sub>2</sub>S-Abscheidung, Entstaubung, Schlammrocknung, Wertstoffrückgewinnung, Wirbelschichtverbrennung, Energietechnik, Abwasserbehandlung

### Pollution Control - Industrial Technology

Planning, design and construction of plants for flue gas desulfurization, flue gas cleaning, H<sub>2</sub>S-removal, dust removal, sludge drying, recovery of valuable substances, fluidized bed incineration, energy technology, waste water treatment.

### Umweltschutz - Betriebstechnik

Anlagen für den Umweltschutz. Anlagen für die Aufbereitung und Verwertung von festen Abfällen mittels folgender Verfahren:

• Kompostierung zur Herstellung von hochwertigem Kompost aus verschiedenen Rohstoffen, z.B. Garten- und Küchenabfällen (Bio-Müll), Naßmüll bzw. Restmüll, Gemischtmüll verschiedenster Zusammensetzung (subtropisch, europäisch, amerikanisch usw.) gegebenenfalls mit Zumischung von Kiärschlamm.

• Abfallaufbereitung, im wesentlichen bestehend aus den Verarbeitungsstufen Sortieren - Zerkleinern - Sieben - Mischen usw.

- als Vorschaltanlagen für Verbrennungsanlage

- als Behandlungs-Anlage für Wertstoffgewinnung

- als Behandlungs-Anlage vor Deponierung

- als Kombination aus den oberen Anlagen.

• Herstellung von Brennstoff aus Müll (BRAM). • Energiefraktionierung Herstellung durch Separieren und Weiterverarbeiten der kalorisch hochwertigen Müllkomponenten in transport- und lagerfähiger Form: lose, in Ballen, als Pellets, je nach Anforderungen teilweise getrocknet.

• Anlagen für die Verwertung von Baustellenabfällen

• Anlagen für die Trocknung von Klärschlamm mittels Kontakttrockner. • Filteranlage zur Reinigung größerer Staubmengen aus Gas-Feststoff-Gemische zwecks Materialrückgewinnung und Sauberhaltung der Abluft, beziehungsweise des Gases

### Pollution Control - Industrial Technology

Plants for pollution control, plants for the treatment and recycling of solid wastes by means of the following processes:

• Composting

• Waste treatment mainly consisting of the following process stages: sorting - crushing - screening - mixing, etc.

- as an upstream plant for incineration plants

- as a treatment plant for recycling of resources

- as a treatment plant before landfilling

- as a combination of the above plants

• Production of fuel from waste • Energy fraction production by separation and reprocessing of the waste components with a high calorific value in a transportable and storable form in bulk or bales, as pellets, depending on demands, partly dried

• Plants for the reprocessing of building site waste • Plants for the drying of sewage sludge by contact dryer. • Filtering plant for the purification of large volumes of dust or gas-solid mixtures for material recycling and purification of waste air and/or gas.

### Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Institut für Landwirtschaft

A: Bundesallee 50, D-W-3300 Braunschweig -  
 ☎ (05 31) 5 96-3 11 - Fax: (05 31) 5 96-3 63

### Umweltschutz - Betriebstechnik

#### Energieeinsparung

Das Institut befaßt sich mit der Entwicklung und Bewertung technischer Verfahren zur umweltgerechten Verwertung und Entsorgung fester, halbfester und flüssiger Reststoffe aus der Landwirtschaft und der Agrarindustrie. SchwerpunktmaÙig erfolgen die Arbeiten auf folgenden Gebieten:

**Anaerobe Abwasserreinigung:** Reinigung hochbelasteter Abwasser in Festbett-, Wirbelbett- und Schlammbettreaktoren

**Anaerobe Feststoffstabilisierung:** Ein- und zweistufige Methanisierung von pflanzlichen Preß- und Extraktionsrückständen sowie von Schlachthofabfällen unter Einsatz mechanisch durchmischter Schlaufenreaktoren.

**Kompostierung:** Substratspezifische Verfahren zur Stabilisierung von Grungut, Tierexkrementen, Klärschlamm, Schlachthofabfällen und pflanzlichen Verarbeitungsrückständen. Bewertung von Geräten zur Kompostierung.

**Nährstoffelimination:** Bewertung biologischer und physikalisch-chemischer Verfahren zur Stickstoff- und Phosphatentfernung

### Pollution Control - Industrial Technology

#### Energy Saving

The Institute works on the development and valuation of industrial processes for the utilization and disposal of solid, semi-solid and liquid residues from agriculture and agro-industry. The current activities are concentrated on the following subjects:

**Anaerobic waste water treatment:** Purification of high strength waste water with fixed bed, fluidized bed and sludge bed reactors

**Anaerobic solids stabilization:** One- and two-stage methanation of vegetable processing residues and slaughterhouse wastes using mechanical mixed loop reactors.

**Composting:** Processing of biomass, manure, municipal sludge, slaughterhouse wastes and vegetable residues to solid products. Valuation of machines for composting.

**Nutrients elimination:** Valuation of biological and physico-chemical processes for nitrogen and phosphate removal

## Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V.

A: Annastr. 67-71, ☎ 51 05 50, D-W-5000 Köln 51 -  
(02 21) 3 76 92-0 - Tx: 8882674 - C: KALKINDU KÖLN -  
Fax: (02 21) 3 76 92 14

### Umweltschutz - Betriebstechnik

Anwendungstechnische Beratung, Neutralisation, Fällung und Flockung von Schwermetallen, Phosphaten, Sulfaten, Fluoriden

u.w.s., Brauchwasseraufbereitung, Schlammkonditionierung, Verfestigung, Verwertung, Abgasreinigung, Labordienst

### Pollution Control - Industrial Technology

Consulting on application technology, neutralisation, precipitation and flocculation of heavy metals, phosphates, sulphates, fluorides etc., industrial process water, sludge conditioning, solidification, utilisation, waste gas purification, laboratory services.

Cavitron, Sprockhövel

Halle 1.1, Stand D 4  
(☎ 7 44 10 01)

### CAVITRON

#### vom Hagen & Funke GmbH

A: Am Leveloh 9, ☎ 12 04, D-W-4322 Sprockhövel 1 -  
(☎ 0 23 24) 76 33-35 - Tx: 8229923 - Fax: (0 23 24) 7 73 00

### Umweltschutz - Betriebstechnik

- Aufbereitung von Zuschlagstoffen für die Abwasserreinigung / • Zerkleinerung und Homogenisierung von Brauereitreiber und anderen biologischen Rückständen zur Weiterverarbeitung mit Mikroorganismen (Biogaserzeugung) • Mischer für hoch feststoffhaltige Medien (Minimierung des Wasser- und Lösemittelensatzes zur Vermeidung von Abwasser- und Abgasbelastungen) / • Aufbereitung von Altpapier (u.a. auch naßfeste Papiere) / • Dispergierung von Polymeren in Bitumen, Dichtwandmassen aus Quelltonen, • Aufbereitung von umweltfreundlichen Bindemitteln anstelle von Bitumen, Sulfitalaun, Phenolharzen, Melaminharzen, • Geschlossene Anlagen zur Verarbeitung von organischen Rohprodukten in Lösungsmitteln ohne den unkontrollierten Austritt von Lösungsmitteln

### Pollution Control - Industrial Technology

- Preparation of loading materials for waste water treatment • Size reduction and homogenization of brewery draff and other biological residues for further processing by microorganisms (biogas production) • Mixers for media with a high solids content (minimization of water and solvent consumption in order to avoid waste water and solvent consumption in order to avoid waste water and waste gas loading) • Reprocessing of waste paper (inter alia, wet-strength papers) • Dispersing of polymeres in bitumen, Sealing compounds from swelling clay • Preparation of binder for the substitution of bitumen Phenol-resin, Melamin-resin, Sulphite Liquor, • Closed plant for the processing of polymeres and solvents without Pollution

Wir sind daran interessiert, Lizenzen für folgende Arbeitsgebiete zu vergeben / we are interested in giving licenses for the following fields of activity: Maschinen für Streichfarben, Faserbearbeitung, Fest-/Flüssig-Bearbeitung, mechanische Verfahrenstechnik - Machines for paintings, fiber treatment, solid/liquid treatment, mechanical process technology - Machines pour peintures, traitement de fibres, traitement solide/liquide, technologie de procede mecanique

#### Niederlassung/Vertretung - Branch/Agency

Frankreich (F) AVENIR CONSEIL, 104, rue du Dôme, F-92100 Boulogne, T: (01) 14537010

Ver. Staaten v. Amerika (USA) STOLBERGER INC, 4702 Stockholm Court, Charlotte, N.C. 28273, T: (0704) 5637492

Japan (J) EUROTEC LTD, SHINJUKU-KU, TOKYO 160, T: 33501921

Chemnitzer Anlagenbau

Halle 4.2, Stand OP 20

### Chemnitzer Anlagenbau GmbH

A: Augustusbürger Str. 34, D-O-9010 Chemnitz -  
(☎ 0 71) 68 90 - Tx: 7195 - C: CAB CHEMNITZ -  
Fax: (0 71) 64 30 22

### Umweltschutz - Betriebstechnik

- Recycling von vermischten Kunststoffabfällen, aus dem Haushaltsbereich, der Kabel- und Faserindustrie, gebrauchte Kunststoffflaschen, spezielle Lösungen für Kunststoff-Folien-Abfälle der Verpackungsindustrie • Abwasserreinigung für die Textil- und Lederindustrie • Physikalisch-chemische und biologische Aufbereitungsverfahren - insbes. emissionsarme Prozesse, Wertstoffrückgewinnung, produktionsspezifische Anpassung • Abgasreinigung für Glas und Keramik: Entstaubung und Schadgasabtrennung mit Wärme- und Wertstoffrückgewinnung.

- Recycling of mixed plastic waste products, domestic waste, waste from the cable and fibre-making industries, used plastic bottles, special solutions for plastics foil waste of the packing industry • Waste-water treatment for the textile and leather industries, physico-chemical and biological recovery processes, in particular processes having low emission, useful materials recovery, adapted to the specific processes • Waste-gas cleaning for glass and ceramics, dedusting and removal of pollutant-containing gas with heat and useful materials recovery.

ClairTech, Utrecht

Halle 1.2, Stand B 15

### ClairTech b.v.

A: Groenewoudsedijk 5 M, ☎ 80 22, NL-3503 RA Utrecht -  
(☎ 0 30) 94 83 94 - Fax: (0 30) 93 75 29

### Umweltschutz - Betriebstechnik

#### Luft, Abgas, gasförmige Medien:

Herstellung von biologischen Abgasreinigungsanlagen zur Entfernung und Zersetzung von Geruchsstoffen, Kohlenwasserstoffen und versauernden Bestandteilen.

### Pollution Control - Industrial Technology

#### Air, waste gas, gaseous media:

Manufacture of biological waste gas purification systems for the removal and degradation of odors, hydrocarbons, and acid-forming components

Siehe auch Teil C / See also Part C / Voir aussi Partie C

Wir sind daran interessiert, Lizenzen für folgende Arbeitsgebiete zu vergeben / we are interested in giving licenses for the following fields of activity: Herstellung von biologischen Abgasreinigungsanlagen - Manufacture of biological waste air cleaning plant

#### Niederlassung/Vertretung - Branch/Agency

Bundesrepublik Deutschland (D) ClairTech b.v., Theodor-Heuss-Ring 19-21, 5000 Köln 1, T: (0221) 7710973, Fax: (0221) 7710931

CTP, München

Freigelände F 2, Stand D 6-8

(☎ 7 44 21 23)

(☎ 7 44 21 24)

### CTP Schroll + Dück GmbH

#### Chemisch-Thermische Prozeßtechnik

A: Bodenseestr. 29, D-W-8000 München 60 -  
(☎ 0 89) 83 60 66 - Fax: (0 89) 8 34 61 84

### Umweltschutz - Betriebstechnik

#### Geschäftsbereich: Abluft und Abgas

- Abluftreinigung und Lösemittelrückgewinnung durch Absorptions-, Adsorptions- und Kondensatanlagen • Katalytische und thermische Abluftreinigung • Verfahrenskombinationen für die Behandlung von hochgesättigten Abgasen • Prozeßintegrierte Verfahren zur Emissionsminderung.

#### Geschäftsbereich: Wasser und Sanierung

- Sanierungsverfahren und -anlagen für Boden und Grundwasser • Strip-Anlagen, Wasseraktivkohlefilter, Bodenluftabsauganlagen sowie zugehörige Abluftfilter (regenerierbar) • Anlagentechnik für

die Sanierung von LHKW-, CKW-, BTX-, PAK- und anderen organisch belasteten Schadensfällen und Altlasten • Aufbereitung von organisch- und nitratbelastetem Trinkwasser • Durchführung von kompletten Sanierungsmaßnahmen.

### Pollution Control - Industrial Technology

#### Waste air and waste gas division

- Waste air treatment and solvent recovery by absorption, adsorption and condensate plants • Catalytic and thermal waste air treatment • Process combinations for treatment of concentrated waste gases • Process-integrated solutions for minimization of emissions.

#### Water and decontamination division

- Decontamination processes and plants for soil and groundwater • Strip plants, water activated carbon filters, soil air suction plants and appertaining waste air filters (regenerative) • Plant technology for the decontamination of LHKW, CHC, BTX, PAC and other organic loads and existing contaminated sites • Treatment of organically and nitrate-loaded drinking water • Implement

Dechema-Institut, Frankfurt

Halle 1.2, Stand B 2

**DECHEMA  
Karl Winnacker Institut**

A: Theodor-Heuss-Allee 25, ☎ 97 01 46, D-W-6000 Frankfurt am Main 97 - ☎ (0 69) 75 64-3 42 - Tx: 412490 - C: DECHEMA FRANKFURTMAIN - Fax: (0 69) 75 64-2 01

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

**Umweltschutz - Meßtechnik**

Abgas-Meßlabor / Forschungsarbeiten: Biologische Abgasreinigung mit fixierten Bakterienmonokulturen, katalytische Abgasreinigung (Prof. Kirchner). Boden-Dekontaminierung durch freie und fixierte Mikroorganismen (Prof. Kirchner). Abbau von Halogenkohlenwasserstoffen mit Metallen, Korrosion und Korrosionsschutz von Anlagen und Apparaten (Prof. Heitz).

**Pollution Control - Industrial Technology**

**Pollution Control - Measurement**

Emission monitoring laboratory / research work: Biological waste gas treatment with bacteria monocultures, catalytic waste gas treatment (Prof. Kirchner). Soil-decontamination with free and fixed microorganisms (Prof. Kirchner). Degradation of halogenated hydrocarbons by metals, corrosion and corrosion protection of plants and equipment (Prof. Heitz).

Dt. Babcock Anlagen, Krefeld

Halle 4.0, Stand H 3-4

**Deutsche Babcock Anlagen AG**

A: Parkstr. 29, ☎ 4 + 6, D-W-4150 Krefeld 11 - ☎ (0 21 51) 4 48-0 - Tx: 853824 - C: BÜTTNER KREFELD-UERDINGEN - Fax: (0 21 51) 44 84 67

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

**Energieeinsparung**

**Energetische Anlagen:** • Kraftwerke • Heizwerke und Heizkraftwerke • Kombi-Kraftwerke • Kohlevergasung • Druckwirbelschicht-Kraftwerke/Systeme.

**Umwelttechnik:** • Elektro- und Gewebeenstauber • Rauchgasentschwefelungsanlagen • Anlagen zur Stickoxidreduzierung • Schadstoffabscheidung in Mulverbrennungsanlagen • Verbrennungsanlagen für Haus-, Industrie- und Sondermüll • Pyrolyseanlagen • Acfallaufbereitungsanlagen • Kompostierungsanlagen • Schlammbehandlungsanlagen

**Pollution Control - Industrial Technology**

**Energy Saving**

**Energy engineering plants:** • Power stations • heating plants and heating power stations • cogeneration power stations • coal gasification • pressurized fluidized bed power stations systems.

**Environmental engineering:** • Electric and fabric dust removal systems • flue gas desulphurisation plants • plants for NO<sub>x</sub> reduction • pollutant separation in waste incineration plants • incineration plants for domestic, industrial and hazardous waste • pyrolysis plants • waste reprocessing plants • composting plants • sludge treatment plants

Dt. Filterbau, Düsseldorf

Halle 4.2, Stand G 20

☎ 7 44 36 80)

☎ 7 44 36 85)

**DEUTSCHE FILTERBAU GMBH**

**Umweltschutz-Technologien**

A: Neusser Str. 111, ☎ 26 01 52, D-W-4000 Düsseldorf 1 - ☎ (02 11) 3 02 84 39 - Fax: (02 11) 3 02 84 38

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

**Energieeinsparung**

**Dienstleistungen**

Die DEUTSCHE FILTERBAU GMBH, Umweltschutz-Technologien, ist mit verschiedenen Verfahren für den industriellen und kommunalen Umweltschutz tätig, d.h. sie ist spezialisiert auf Beratung, Durchführung von Genehmigungsverfahren, Planung und Lieferung von kompletten Anlagen.

Eine Reihe von Eigenpatenten und Lizenzen auf den Gebieten Abwasserbehandlung, Schlammfäulung, thermische Schlammentwässerung stationär und mobil als Neuentwicklung, Entstaubungstechnik, Aktivkohle- und Gießerei-Altstand-Regenerierung sowie die langjährige Erfahrung der Mitarbeiter im Anlagenbau sichern eine auf den Kunden abgestimmte Problemlösung.

**Pollution Control - Industrial Technology**

**Energy Saving**

**Services**

DEUTSCHE FILTERBAU GMBH, Environmental Protection Technologies, is involved in different processes for industrial and municipal environmental protection, i.e. DEUTSCHE FILTERBAU GMBH is specialized in consulting, realization of licence procedures, projecting and delivery of complete plants.

Delivery Program: Sludge Treatment Plants - Stationary and Mobile, Sewage Treatment Plants, High Temperature Gasification of Hazardous Wastes, High Performance Multicyclone (for dust), Regeneration of Activated Carbon, Sand Drying Plants, Sand-Reclamation Plants.

Didier-Säurebau, Königswinter

Halle 9.0, Stand E 26-27

☎ 7 44 20 53)

**Didier-Werke AG, Säurebau**

A: Bachstraße, ☎ 21 60, D-W-5330 Königswinter 1 - ☎ (0 22 23) 72-0 - Tx: 885217 - C: DIDIERSAUREBAU BONN - Fax: (0 22 23) 2 24 70

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

• Behandlung und Aufbereitung industrieller Abwasser und Schlämme • Regenerierung von Prozeßflüssigkeiten • Entfernung von toxischen organischen Schadstoffen aus Grund- und Deponiesickerwasser durch Adsorption, Desorption, biologische Behandlung • Unschädlichmachung von Abgasen und Dämpfen und Schutz von Bauwerken und Produktionseinrichtungen gegen aggressive Medien.

**Pollution Control - Industrial Technology**

• Treatment and reconditioning of industrial waste water and sludges • regeneration of treatment liquids • disposal of toxic organic pollutants from ground water and dump seepage water by adsorption, desorption and biological treatment • neutralization of waste gases and fumes, protection of buildings and manufacturing equipment against aggressive agents

Dorr-Oliver, Wiesbaden

Halle 6.0, Stand F 11-14

☎ 7 44 35 86)

**DORR-OLIVER GMBH**

A: Friedrich-Bergius-Str. 5, ☎ 12 02 52, D-W-6200 Wiesbaden - ☎ (06 11) 2 04-0 - Tx: 4186756 - C: DORROLIVER WIESBADEN - Fax: (06 11) 20 42 55

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

**Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:**

Projektleitung, Maschinelle Ausrüstungen, biologische, thermische Verfahren, Kommunale und industrielle Abwasserreinigung, Schlammbehandlung, Trocknung, Wirbelschichtverbrennung, Komplette standardisierte, modular aufgebaute Systeme sowie problemspezifische Sonderlösungen, Projektleitung, Beratung, Problemanalyse, Durchführung von Laborversuchen und Betrieb von Pilotanlagen zur Ermittlung der Bemessungs- und Betriebsparameter, Auslegung, Bau, Inbetriebnahme, Wartung, Kundendienst.

**Pollution Control - Industrial Technology**

**Water, waste water, liquid media and sludges:**

Project Management, Mechanical-electric equipment, secondary, tertiary and thermal processes, Municipal and industrial waste effluent purification, sludge (incl. hazardous) treatment, drying, fluid bed incineration, Complete standardized modular systems, tailor-made solutions, project management, consultation, problem analysis, lab and pilot tests to achieve design and operating parameter, layout, engineering and erection, start-up, maintenance and after sales service.

Dürr, Stuttgart

Halle 4.1, Stand D 14

**Dürr GmbH**

**Produktbereich Umwelttechnik**

A: Spitalwaldstr. 18, ☎ 40 02 60, D-W-7000 Stuttgart 40 - ☎ (07 11) 82 05-0 - Tx: 722303 - Fax: (07 11) 82 05-4 55

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

**Umwelttechnik:** Abluftreinigungsanlagen, Abgasreinigungsanlagen, Abwasserreinigungsanlagen, Wasseraufbereitungsanlagen.

**Pollution Control - Industrial Technology**

**Environmental systems:** Air purification systems, exhaust air purification systems, water and waste water treatment systems

**Ecole Centrale Paris**A: F-92295 Chatenay-Malabry CEDEX - ☎ (01) 46 83 64 64 -  
Tx: 250659 - Fax: (01) 46 83 64 37**Umweltschutz - Betriebstechnik**LABORATOIRE DE GENIE ET INFORMATIQUE CHIMIQUES  
(Dominique DEPEYRE, Direktor, Professor in Ecole Centrale Paris):Forschungsprojekte über Reinigung von Industrieabwässern. Fest-Bett-Methanisation. Beseitigung von H<sub>2</sub>S mit Bakterien. aerobische Behandlung radioaktiver Abwässer (C<sup>14</sup>) Ultra- und Micro-Filtration. dynamische Prozeß-Simulation. Automatisierung.

LABORATOIRE DE CHIMIE NUCLEAIRE ET INDUSTRIELLE

(Gérard DURAND, Direktor, Professor in Ecole Centrale Paris):  
Forschungsprojekte über physikalisch-chemischen Abwasser-trennverfahren. Flüssig-Flüssig Extraktion. Membranverfahren. Ultrafiltration. Elektrodialyse. elektrochemische Verfahren. Beseitigung von Schwermetallen und toxischen Anionen. Aufwertung der Abwasser.**Pollution Control - Industrial Technology**LABORATOIRE DE GENIE ET INFORMATIQUE CHIMIQUES  
(Dominique DEPEYRE, Manager, Professor at Ecole Centrale Paris):Researches on depollution and valorization of agro-food effluents, methanogenic fermentation, bacterial desulphurization, aerobic treatment for C<sup>14</sup> effluents, ultra- and micro-filtration, dynamic simulation, process control.

LABORATOIRE DE CHIMIE NUCLEAIRE ET INDUSTRIELLE

(Gérard DURAND, Manager, Professor at Ecole Centrale Paris):  
Researches on physico-chemical processes for liquid effluents separation, solvent extraction, membrane processes, ultrafiltration, electro dialysis, electrochemical processes, elimination of heavy metals and of toxic anions, valorization of wastes.

Fraunhofer-IGB, Stuttgart

Halle 1.2, Stand B 17

(☎ 7 44 13 66)

(☎ 7 44 20 66)

**Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB)**A: Nobelstr. 12, D-W-7000 Stuttgart 80 - ☎ (07 11) 9 70 00 -  
Tx: 7255168 - Fax: (07 11) 9 70 42 00**Umweltschutz - Betriebstechnik****Umweltschutz - Meßtechnik****Energieeinsparung**

Auftragsforschung im Bereich Umweltschutz: Membrantechnologie in der Umwelttechnik. Mikro- und Ultrafiltration. Elektrodialyse für die Abwasserbehandlung. Lösemittelrückgewinnung durch Absorber. Membrantechnik. Sensoren für Cyanid und andere Umweltchemikalien. Abbaubarkeitsstudien für Problemstoffe: biologische Verfahren zur Reinigung von Abluft, Wasser und Boden: biologische Abfallverwertung: mikrobielle und enzymatische Wertstoffproduktion aus Abfallstoffen: regenerative Energiequellen.

**Pollution Control - Industrial Technology****Pollution Control - Measurement****Energy Saving**

Contract research in the area of environmental protection: membrane technology for environmental improvements: microfiltration, ultrafiltration and electro dialysis for waste water treatment: solvent recovery by adsorption/pervaporation: sensors for cyanide and other environmental pollutants: feasibility studies for biodegradation of xenobiotics: biological techniques for cleaning waste air, water and soil: biotreatment of municipal and hazardous waste: microbial and enzymatic formation of valuable products from waste material: regenerable sources of energy.

**Umweltschutz - Betriebstechnik****Umweltschutz - Meßtechnik****Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:**

Neuentwickeltes Nitrat-Meßverfahren mit vollautomatischer Steuerung der 3. Reinigungsstufe in Klarwerken (Denitrifikation) und vollautomatischer Steuerung zur biologischen Phosphatelimination

**Pollution Control - Industrial Technology****Pollution Control - Measurement****Water, waste water, liquid media and sludges:**

Newly developed nitrate measuring procedure with fully automatic control of the 3rd stage of purification in clarification plants (denitrification) and fully automatic control for biological phosphate elimination.

Hegemann Engineering, Bremen Freigelände F 1, Stand AB 4

(☎ 7 44 32 04)

**Detlef Hegemann Engineering GmbH**A: Strotthoffkai 19, ☐ 10 23 07, D-W-2800 Bremen 44 -  
☎ (04 21) 41 07-0 - Fax: (04 21) 41 07-1 51 - Ttx: 4212211**Umweltschutz - Betriebstechnik****Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:****Abfall, Bodenschutz:**

Wasseraufbereitung - Frischwasseranlagen. Schwerpunkt: Modernisierung von Trinkwasseraufbereitungsanlagen ohne Betriebsunterbrechung

Abwasseraufbereitung - insbesondere von hochbelasteten Abwässern aus Produktionsbetrieben, wie z.B. Molkereien, Konservenfabriken, Farbereien, galvanischen Anlagen, mit gleichzeitiger Wertstoffrückgewinnung und deponie-gerechter Schlammaufbereitung. Bodensanierung: Biologische In situ- und On site-Verfahren. Extraktions- und Waschverfahren.

**Pollution Control - Industrial Technology****Water, waste water, liquid media and sludges:****Waste, soil protection:**

Water treatment - Fresh water plants. Specialty: Modernisation of drinking water plants without interruption of operation.

Waste water treatment - particularly of highly contaminated waste waters from production units such as dairies, canning factories, dyeing plants, galvanizing plants with simultaneous recycling/recovery of valuable materials as well as sludge treatment for dumping purpose

Soil remediation: biological in situ and on site processes, extraction and washing processes

Wir sind daran interessiert, Lizenzen für folgende Arbeitsgebiete zu übernehmen / we are interested in taking over licenses for the following fields of activity:

Stofftrennung thermische, sonstige im Bereich thermische und mechanische Verfahrenstechnik. Wasser- und Abwasser-Aufbereitung - Thermal and other separation technologies in the field of thermal and mechanical process engineering: water and wastewater treatment - Separation thermique et dans autres domaines de la technique des procedes thermique et mecanique: traitement d'eau et des eaux residuaires

Herding, Amberg

Halle 1.1, Stand EF 10

(☎ 7 44 22 05)

**Herding GmbH****Filtertechnik**A: August-Borsig-Str. 3, ☐ 15 20, D-W-8450 Amberg -  
☎ (0 96 21) 6 30-0 - Fax: (0 96 21) 6 30 25 - Ttx: 9621830**Umweltschutz - Betriebstechnik****Luft, Abgas, gasförmige Medien:**

Filteranlagen zur Abscheidung von Stäuben und Nebeln aus Gasen mittels gesinterten Filterelementen aus Thermoplasten (bis 160 °C) und Oxidkeramik (&gt; 200 °C).

**Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:**

Anlagen zum anaeroben Abbau organisch belasteter Abwässer

**Pollution Control - Industrial Technology****Air, waste gas, gaseous media:**

Filtering systems for the separation of dusts and mists from gases by means of sintered filtering elements made of thermoplastics (up to 160 °C) and oxide ceramics (&gt; 200 °C).

**Water, waste water, liquid media and sludges:**

Plants for the anaerobic degradation of organically loaded waste waters.



**Hoelzle & Chelius GmbH**

A: Hugenottenallee 150, ☎ 14 02, D-W-6078 Neu-Isenburg -  
☎ (0 61 02) 29 01-0 - Tx: 4185602 - Fax: (0 61 02) 29 01 73

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

**Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:**  
Trinkwasser: Verfahren zur Nitratentfernung.

**Umweltschutz - Meßtechnik**

**Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:**  
Test Kits Taschen-pH- und Leitfähigkeitsmeßgeräte. Sauerstoff- und Temperaturmeßgeräte. BSB.-Geräte und Thermostatschranke Trübungsmeßgerät. Fotometer einschl. Reagenziensätzen. Floc-Tester. Schlammschichtmeßgerät. CSB-Meßplätze. Probenentnahmegerate

**Pollution Control - Industrial Technology**

**Water, waste water, liquid media and sludges:**  
Drinking water: process for removal of nitrate.

**Pollution Control - Measurement**

**Water, waste water, liquid media and sludges:**  
Test Kits. Pocket pH and Conductivity measuring instruments. Dissolved oxygen and temperature measuring instruments. BOD measuring instruments with thermostatically controlled cabinets. Turbidimeter. Photometer with reagent sets. Floc tester. Sludge blanket detector. COD Measuring units. Water samplers

HP-biotechnologie, Witten

Halle 1.2, Stand A 18

**HP-biotechnologie GmbH**

A: Brauckstr. 51, ☎ 62 20, D-W-5810 Witten 6 -  
☎ (0 23 02) 66 83 11 - Fax: (0 23 02) 66 81 19

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

**Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:**  
**Abfall, Bodenschutz:**

Die biologische Abbaubarkeit von Schadstoffen wird nach standardisierten Verfahren im Labor getestet. Verunreinigte Böden werden in Biobeeten oder transportablen Bioreaktoren und verschmutztes Wasser in speziellen Abwasserkläranlagen aufbereitet. Neben der Sanierung mineralölbelasteter Böden werden polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) in Altlasten abgebaut. Für die Reinigung von Industrieabwässern werden spezielle Reinigungsverfahren angeboten oder entwickelt.

**Pollution Control - Industrial Technology**

**Water, waste water, liquid media and sludges:**  
**Waste, soil protection:**

The biodegradability of pollutants is tested in laboratory in accordance with standardised methods. Contaminated soils are processed in biological beds or mobile bioreactors and contaminated water is treated in special waste water treatment plants. Apart from the decontamination of crude oil-contaminated soils, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) are degraded on contaminated sites. Special purification processes are developed and supplied for the treatment of industrial waste water.

Niederlassung/Vertretung - Branch/Agency

Bundesrepublik Deutschland (D) Brauckstr. 51 D-W-5810 Witten  
Gartenstr. 38D-W-5180 Eschwege

IAB Leipzig

Halle 4.2, Stand OP 20

**Ingenieurbetrieb Anlagenbau Leipzig GmbH**

A: Georgiring 1-3, D-O-7010 Leipzig - ☎ (0 41) 7 95 30 -  
Tx: 51375 - C: IAB LEIPZIG - Fax: (0 41) 2 87-4 89

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

• Biologische Reinigung von industriellen und kommunalen Abwässern • Leicht- und Feststoffabscheidung • Schlammbehandlung • Wertstoffrückgewinnung bei schwermetallhaltigen Abwässern • Aufbereiten von Ballast- und Bilgewasser • Anlagen zur Verbrennung fester, flüssiger und gasförmiger Abprodukte mit Abwärmenutzung • Endreinigung schadstoffhaltiger Abgase • Katalytische Nachverbrennung • Fackelsystem mit optoelektrischer Steuerung • H<sub>2</sub>S-Entfernung aus Raffinerie- und Naturgasen mit Schwefelgewinnung (Clausprozeß).

**Pollution Control - Industrial Technology**

• Biological cleaning of industrial and communal waste water • lightsolids and mud removal • sludge treatment • Recovery of useful materials from heavy-metal containing waste water • Treatment of bilge and ballast water • Plants for the combustion of solid, liquid and gaseous waste products using waste heat • Final cleaning of pollutant-containing waste gases • Catalytic combustion • Torch system with optoelectric control • H<sub>2</sub>S-removal from refinery and natural gases with sulphur production (Claus process)

**IBERO Anlagentechnik GmbH**

A: Heinrich-Krumm-Str. 7, ☎ 10 08 24, D-W-6050 Offenbach  
1 - ☎ (0 69) 89 00 01-0 - Tx: 4152738 - Fax: (0 69) 89 00 01 80

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

**Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:**

Kombinierte Belebtschlammverfahren mit Tauchropfkörper (TTK) vereinigen die spezifischen Vorteile einer Belebungsanlage (konvent. Belüftungsverfahren) und einer Tauchkörperanlage (konvent. Festbettverfahren). Belebungsanlagen weisen durch Veränderung der Bakterienmasse eine große Flexibilität und Reinigungsleistung auf. Tauchkörperanlagen schreibt man eine große Prozeßstabilität, einfachen Betrieb und niedrige Baukosten zu. IBERO bietet biologische Abwasserreinigungsanlagen in Container- und Beton-Bauweise mit dem ausgewählten TTK nach dem STÄHLERMATIC-System an.

**Pollution Control - Industrial Technology**

**Water, waste water, liquid media and sludges:**

IBERO waste water treatment plants equipped with biowheels of the STÄHLERMATIC-System, do combine the specific advantages of the activated sludge and the fixed film process.

IMA, Frankfurt

Halle 4.2, Stand N 20

**I M A****Ingenieurgesellschaft mbH**

A: Wasgaustr. 31, D-W-6230 Frankfurt 80 - ☎ (0 69) 30 30 96 -  
Fax: (0 69) 31 83 03

A: Kunstfeldstraße 3, D-W-5090 Leverkusen - ☎ (02 14)  
7 50 30 - Fax: (02 14) 7 75 28

A: IMA N.V. Studie & Ingenieurbureau Steenlandlaan 3,  
B-9130 Beveren-Kallo - ☎ (03) 7 55 10 69 - Fax: (03) 7 55 10 39

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

**Wasser, Abwasser:** Planung, Lieferung und Montage von biologischen Abwasserreinigungsanlagen nach dem SBR-Verfahren für den Einsatz in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie/Grundwasseranierung/Konzeptfindung bei der Behandlung von Problemabwässern.

**Tanklager:**

Planung, Lieferung und Montage von Tanklagern nach TRbF und WHG/Sicherheitsanalysen nach dem PAAG-Verfahren.

**Bodenschutz:** Konzeptfindung bei der Behandlung von kontaminierten Böden.

**Pollution Control - Industrial Technology**

**Water, waste water:** Design, delivery and mounting of biological waste water treatment plants based on the SBR process for use in the food and beverage industry / Groundwater decontamination / Concept elaboration for the treatment of problematic waste waters.

**Tank farms:** Design, delivery and mounting of tank farms according to TRbF (German regulations on inflammable liquids) and the German Water Management Act / Safety audits based on the PAAG method.

**Soil protection:** Elaboration of concepts for the treatment of contaminated soils.

Niederlassung/Vertretung - Branch/Agency

Bundesrepublik Deutschland (D) Büro Krefeld Alte Krefelder Str. 6 D-W-4150 Krefeld 11

Büro Wuppertal Friedrich-Ebert-Str. 125-131, D-W-5600 Wuppertal 1  
Büro Ludwigshafen, Ruthengewannstraße 8 D-W-6700 Ludwigshafen

KCH, Siershahn

Halle 9.0, Stand KL 22-24

(☎ 7 44 20 00)

(☎ 7 44 20 01)

**KERAMCHEMIE GMBH**

A: ☎ 11 63, D-W-5433 Siershahn - ☎ (0 26 23) 6 00-0 -  
Tx: 863116 - Fax: (0 26 23) 6 00-5 13 - Ttx: 262396

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

**Anlagen:** • Anlagen für die Reinigung von Industrieabluft mit biologischen, chemischen und physikalischen Verfahren. • Lösemittelrückgewinnung aus Abluft. • Entlüftungs- und Belüftungsanlagen, Kunststoffventilatoren.

• Anlagen für Industrieabwasser-Behandlung, Neutralisation und Entgiftung • Schlammbehandlung • Lösemittelrückgewinnung aus Grundwasser und Prozeßwasser.

• Regenerierungsanlagen für verbrauchte Beizbäder.

**Behälter, Apparate und Rohrleitungen** aus Duroplasten, Thermoplasten und GFK-Verbundwerkstoffen.

**Korrosionsschutz in Anlagen für den Umweltschutz** mit Baustellen- und Autoklavgummierungen, Kunstharzbeschichtungen, keramischen Belägen und Auskleidungen • Oberflächenschutzsysteme für Auffangwannen und -räume für wassergefährdende Stoffe mit Ift-Prüfzeichen

**Pollution Control - Industrial Technology**

**Plant and installation:** • Installations for the treatment of industrial waste air with biological, chemical and physical processes. • Solvents recovery from waste air. • Ventilation plants. Plastic fans. • Installations for the treatment of industrial waste water by neutralisation and detoxification • Sludge treatment • Solvents recovery from process water and ground water. • Recovery plants for used pickling baths.

**Tanks, appliances and pipe work** made from thermosetting and thermoplastic plastics as well as from GRP and GRP compound products.

**Corrosion protection in environmental protection installations** with rubber linings on site and in autoclave, synthetic resin coating systems, as well as ceramic linings. • Surface protection systems for collection pits and rooms for water toxifying products.

Krämer, Daaden

Halle 1.1, Stand G 9-10  
(☎ 7 44 17 09)**Walter Krämer GmbH  
Apparatebau Biersdorf**

**A:** Betzdorfer Straße, ☐ 20, D-W-5244 Daaden/Sieg -  
☎ (0 27 43) 80 10 - **Tx:** 876364 - **C:** APPARATEBAU DAADEN -  
**Fax:** (0 27 43) 8 01 28

**Umweltschutz - Betriebstechnik****Abgas-, Abluftreinigung:**

Auslegung, Bau und Vertrieb von Biofiltern. Entfernung von toxischen Gasinhaltsstoffen (z.B. H<sub>2</sub>S, CS<sub>2</sub> und Kohlenwasserstoffe) mit speziell adaptierten Mikroorganismen bei hohem Reinigungsgrad. Überführung der Schadstoffe in ökologisch unbedenkliche Endprodukte.

**Pollution Control - Industrial Technology****Treatment of waste air, waste gas:**

Planning, construction and distribution of biofilters. High efficient removal of toxic gases (e.g. H<sub>2</sub>S, CS<sub>2</sub>, hydrocarbons) with specially adapted microorganisms. Transformation of contaminants into ecologically harmless end products.

**Niederlassung/Vertretung - Branch/Agency**

**Bundesrepublik Deutschland (D)** HOLZEMANN, Metallverarbeitung GmbH, Postfach 6, 5244 Daaden

Krüger, Søborg

Halle 4.2, Stand M 17

**I. Krüger AS**

**A:** Gladsaxevej 363, DK-2860 Søborg - ☎ (0) 31 69 02 22 -  
**Tx:** 27033 - **Fax:** (0) 31 69 08 06

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

Verfahrenstechnik und Anlageprogramm für Aufbereitung von Trink- und Brauchwasser, Abwasserreinigung, Recycling und Entsorgung von Abfall und Schlamm, Abgasreinigung, Biogasgewinnung und Bodenschutz.

**Pollution Control - Industrial Technology**

Process know-how and plants for treatment for potable water, process water and waste water, treatment of solid wastes and sludge, air purification, groundwater and soil protection, biogas utilization.

**Niederlassung/Vertretung - Branch/Agency**

**Bundesrepublik Deutschland (D)** Krüger, Holter Wassertechnik GmbH, Max-Planck-Str. 23, 6382 Friedrichsdorf 1

**Frankreich (F)** I. Krüger S.A., 135 Route de la Reine, F-92100 Boulogne - Billancourt

**Ungarn (H)** Krüger Representation Office, Váci-Utca 36, Budapest 1056

**Irland, Republ. (IRL)** Krüger Engineering Ltd, Irish Permanent House, The Parade, Kilkenny

Linde V + A, Höllriegelskreuth

Halle 4.2, Stand HJ 5-7  
(☎ 7 44 33 47)**Linde AG****Werksgruppe Verfahrenstechnik und Anlagenbau**

**A:** Dr. Carl von Linde Str. 6-14, D-W-8023 Höllriegelskreuth -  
☎ (0 89) 72 73-1 - **Tx:** 5283270 - **C:** SAUERSTOFF  
HOELLRIEGELSKREUTH - **Fax:** (0 89) 72 73 29 46

**Umweltschutz - Betriebstechnik****Luft, Abgas, gasförmige Medien:**

Benadlung von Abluft und Abgas, Entfernung von Schadstoffen wie z.B. SO<sub>2</sub>, Kohlenwasserstoffen, Lösemitteln und Rückgewinnung von Wertstoffen, Schwefelrückgewinnung aus Claus-Gas, Biogas und Claus-Abgasreinigung.

**Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:**

Abwasserreinigung und Schlammbehandlung für Industrie und Kommunen.

**Radioaktivität, Umweltschutz bei kerntechnischen Anlagen:**

Abgasaufbereitung und Gasreinigung für kerntechnische Anlagen.

**Pollution Control - Industrial Technology****Air, waste gas, gaseous media:**

Treatment of vent air and off-gas, removal of noxious substances e.g. SO<sub>2</sub>, hydrocarbons, solvents and recovery of valuable materials. Sulfur recovery from Claus feed, biogas and Claus tail gas treatment.

**Water, waste water, liquid media and sludges:**

Waste water and sludge treatment for industry and municipalities.

**Radioactivity, pollution control for nuclear plants:**

Gas processing and gas purification for nuclear plants.

Siehe auch Teil C / See also Part C / Voir aussi Partie C

**Niederlassung/Vertretung - Branch/Agency**

**Australien (AUS)** Linde (Australia) Pty Ltd., 1st Floor, 54 Neridan Street, Chatswood N.S.W. 2067

**Chinesische Volksrep. (TJ)** Linde AG, Process Engineering and Contracting Division, Beijing Representative Office, 5th Floor, Block A-1, Commercial Bldg, Lido Centre, Jichang Road, Beijing

**Frankreich (F)** S.A.T. Linde, Tour Albert Ier, 65, Ave. de Colmar, 92507 Rueil-Malmaison

**Hongkong (HK)** Linde AG, Far East Representative Office, 1107 East Tower Bond Centre, 89, Queensway Central, Hongkong

**Indien (IND)** Linde Process Technologies India Private Limited, 3rd Floor, Natubhai Centre, Meeraj Complex, Gotri Road, Baroda - 390 007 Gujarat

**Kanada (CDN)** Lotepro Plants Ltd., 510 808 4th Avenue S.W., Calgary, Alberta T2P 0K 4

**Saudi-Arabien (SA)** Linarco Ltd., P.O. Box 9285, Riyadh 11413

**Ver. Staaten v. Amerika (USA)** Lotepro Corporation, Mt. Pleasant Corporate Center, 115 Stevens Ave., Valhalla, N.Y. 10595

Lurgi, Frankfurt

Halle 4.2, Stand K-P 10-11  
(☎ 7 44 43 46)  
(☎ 7 44 43 47)**Lurgi AG**

**A:** Lurgi-Allee 5, ☐ 11 12 31, D-W-6000 Frankfurt 11 -  
☎ (0 69) 58 08-0 - **Tx:** 412360 - **Fax:** (0 69) 58 08 38 88

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

Lurgi informiert über das komplette Programm für Wasser, Boden, Luft:

**Wasser/Schlamm**

• Abwasserbehandlung nach allen Verfahrensvarianten, Prozeßrechnerysteme für klartechnische Einrichtungen, Klärschlammverbrennung einschließlich Gasreinigung • Grundwassersanierung mit

mobilen Aktivkohle-Anlagen sowie Regenerierung der erschöpften Aktivkohle.

**Entsorgung von Müll/Abfall/Altlasten**

• Sanierung von Industriestandorten und -Bauteilen • Behandlung von Hafenschlick und Baggergut nach thermischen und Naßverfahren • Technische Lösungen für Recycling-Probleme z.B. für Baustoffe oder Gleisschotter • Integrierte Konzepte zur Entsorgung von Müll und Abfall, einschließlich Recycling von Wertstoffen, Kompostierung, thermischer Behandlung zur Energiegewinnung • Entfernung von Flugstaub und gasförmigen Schadstoffen aus dem Verbrennungsabgas, Verglasung von Asche und Filterstäuben sowie deren Deponie • Verbrennung von industriellen Rückständen und Sonderabfall in verschiedenen Ofentypen.

**Service-Leistungen für Entsorgungs-Projekte**

• Beteiligung an Realisierung und Betrieb von Anlagen oder Entsorgungszentren wie z.B. Entsorgung und Verwertung von Haus-, Gewerbe- und Sonderabfall, Altlastensanierung, Reinigung von Abwässern und Verbrennung von Klärschlamm, Vermarktung der anfallenden Stoffströme.

**Energie aus Abfall**

• Z.B. Verbrennung von Sedimentschlamm aus Papierfabriken oder von Resten aus der Holzindustrie • Eindampfung von Wollwaschwasser mit Energieversorgung aus den daraus resultierenden festen Rückständen.

**Gasreinigung**

• Reinigung kommunaler und industrieller Nutz- und Abgase aller Art einschließlich Behandlung bzw. Unschädlichmachung der separierten Bestandteile unter Ausnutzung aller Möglichkeiten zum Recycling z.B. Gewinnung von CO aus Stahlgas.

**Erzeugung sauberer Energie**

• Verbrennung und Vergasung von fossilen Brennstoffen und Abfällen in der Zirkulierenden Wirbelschicht mit minimierter Stickoxidbildung und Entschwefelung der Rauchgase bereits in der Brennkammer • Kohle-Kombikraftwerke mit Gas- und Dampfturbinen erzeugen bis zu 20 % weniger Abgas, d.h. nicht nur der Schadgas- sondern auch der CO<sub>2</sub>-Ausstoß ist beträchtlich vermindert.

**Pollution Control - Industrial Technology**

Lurgi presents its complete programme for water, soil and air:

**Water/Sludge**

• Waste water treatment by state-of-the-art treatment processes, computer process control of waste water treatment plants, sewage sludge incineration complete with add-on flue gas cleanup systems • Groundwater rehabilitation by mobile activated carbon plants and regeneration of spent activated carbon.

**Waste and Residue Disposal / Recycling and Remedial Site Treatment**

• Cleanup of abandoned industrial sites and facilities • Treatment of river and harbour sediments by sorting, classifying and thermal processes • Establishing commercial uses for treatment residues e.g. building materials or track ballast • Integrated waste management concepts encompassing recycling of valuable materials, composting, energy recovery by thermal treatment • Removal of fly ash and gaseous pollutants from flue gases, vitrification of ash and filter dust and their disposal • Incineration of industrial residues and hazardous waste in a variety of combustion systems.

**Services for Waste Management Concepts**

• Participation in the construction and operation of waste treatment plants or centres, e.g. for the disposal or reprocessing of municipal, industrial and hazardous wastes, remedial site treatment, waste water treatment and sewage sludge incineration, marketing of recovered products.

**Waste-to-Energy Concepts**

• Incineration of sediment sludges from the pulp and paper industry or wood waste from the wood industry • Autothermal process for the evaporation of concentrated wool scouring water.

**Gas Cleaning**

• Cleanup of all kinds of industrial process and waste gases including treatment and/or safe disposal of cleanup residues using all possibilities of recycling, e.g. CO recovery from steel gas.

**Clean Power Generation**

• Circulating fluidized bed combustion and gasification of fossil fuels and wastes with suppression of nitrogen oxides formation and in-situ desulfurization of the flue gases • Combined-cycle power plants employing a combination of gas and steam turbines produce up to 20% less flue gas, i.e. this leads to a marked reduction in emissions of both gaseous pollutants and CO<sub>2</sub>.

Siehe auch Teil C / See also Part C / Voir aussi Partie C

Niederlassung/Vertretung - Branch/AgencyTochtergesellschaften/Subsidiary companies /Filiales:

**Australien (AUS)** Lurgi (Australia) Pty Ltd 230 Albert Road South Melbourne Victoria 3205

**Belgien (B)** Lurgi Benelux S A 127 Avenue Leopold Wiener B-1170 Bruxelles

**Frankreich (F)** Lurgi S A Les Bureaux de la Colline de Saint-Cloud 127 F-92213 Saint-Cloud

**Großbritannien (GB)** Lurgi (U.K.) Ltd Duke's Court, Duke Street Woking Surrey GU21 5BH

**Indien (IND)** Lurgi India Company Private Ltd 18 - 20 Kasturba Gandhi Marg 12th Floor Hindustan Times House New Delhi 110001

**Japan (J)** Lurgi K. K. ABS Building 2-4-16 Kudan Minami Chiyoda-Ku Tokyo 102

**Kanada (CDN)** Lurgi Canada Ltd 100 Adelaide Street West Toronto M5H 1S3 Ontario

**Mexico (MEX)** Lurgi Mexicana S A de C V Apartado Postal 105-191 Presidente Masaryk 191 Mexico 5 D F

**Niederlande (NL)** Lurgi Nederland B V Backersnagen 97 NL-1082 GS Amsterdam

**Österreich (A)** Lurgi Verfahrenstechnik GmbH Währingerstraße 15 A-1090 Wien

**Schweden (S)** Svenska Lurgi AB P O Box 41 25 S-17104 Solna

**Schweiz (CH)** Lurgi Zurich AG Kreuzpühlstraße 8 CH-8032 Zurich

**Spanien (E)** Lurgi Española S A Edificio Eurocentro Avenida General Peron 29 Madrid 20

**Ver. Staaten v. Amerika (USA)** Lurgi Corporation Suite 746 600 South Cherry Street Denver Colorado 80222

666 Kinderkamack Road River Edge New Jersey 07661

**Beteiligungsgesellschaften/Holding companies/ Les holding**

**Italien (I)** Lurgi Italiana S p A Via de Amicis 49 I-20123 Milano

**Südafrika, Republ. (ZA)** Lurgi South Africa (Pty) Ltd P O Box 79 665 2145 Senderwood The Oaks Riverwoods Office Park Johnson Road St Andrews 2008 Bedfordview

**Taiwan (RC)** Far East Lurgi (Taiwan) Environmental Engineering Ltd IFEL 12th Floor 164 Nanking East Road Section 4 Taipei Taiwan

MAB Grimma Halle 4.2, Stand OP 20

**Maschinen- und Anlagenbau Grimma GmbH**

A: Bahnhofstr. 3/5, D-O-7240 Grimma - ☎ (04 06) 6 30 -  
Tx: 512025 - C: GRIMMA CLG - Fax: (04 06) 40 59

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

**Umweltschutz - Meßtechnik**

• Behandlung kontaminierter Boden mittels mechanischer und biologischer Verfahren, Behandlung von Deponien und Sickerwasser analytische Deponiekontrolle • Verfahren Anlagen und Apparate zur Behandlung und Reinigung kommunaler und/oder industrieller Nutz- und Abwasser, einschließlich Kompakt-Klaranlagen, Tropfkörper • Lösungsmittelrückgewinnungsanlagen zur destillativen Aufarbeitung • Anlagen für Recycling von Plastikabfällen (einschließlich Haushalt) • Anlagen zur Güllebehandlung und Biogasergzeugung, Reinigung und Lagerung.

**Pollution Control - Industrial Technology**

**Pollution Control - Measurement**

• Treatment of contaminated soil using mechanical and biological processes, treatment of disposals and drainage water, analytical supervision of disposals • processes, plants and apparatuses for the treatment and clarification of communal and/or industrial process and waste waters, incl. compact sewage treatment plants bacteria beds • solvent-recovery plants for the processing by distillation • plants for the recycling of plastic wastes (incl. domestic waste) • plants for the liquid-manure treatment and biogas production, clarification and storage.

Maschinenfabrik Sangerhausen Halle 4.2, Stand OP 20

**Maschinenfabrik Sangerhausen GmbH**

A: Walter-Telemann-Str. 2/4, D-O-4700 Sangerhausen -  
☎ 4 40 - Tx: 48727 - C: MASCHINEN - Fax: 29 29

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

**Dienstleistungen**

**Wasser, Abwasser, Schlämme, Abfall:**

• Klärschlamm-Entwasserungsanlagen mittels Dekantierzentrifugen Bauart Sangerhausen als Kernstück • Klärschlamm-Trocknung • Klärschlamm-Vergasung • Anlagen zur abwasserfreien Gülleaufbereitung • Hausmüllkompostierungsanlagen • Anlagen zur Tierkörperverwertung  
Engineering - Fertigung - Montage - Inbetriebnahme - Service

**Pollution Control - Industrial Technology**

**Services**

**Water, waste water, sludges, waste:** • Decanters for sewage sludge dewatering • Drying and gasification of sewage sludge • Treatment of manure without waste water • Composting of garbage • Rendering plants  
Engineering - manufacture - setting up and start-up - service

Mehrer, Balingen

Halle 8.0, Stand W 17 **160**  
(☎ 7 44 12 09)

**Josef Mehrer GmbH & Co  
Maschinenfabrik**

**A:** Rosenfelder Str. 35, ☐ 10 07 53, D-W-7460 Balingen 1 -  
☎ (0 74 33) 26 05-0 - **Tx:** 17743388 - **Fax:** (0 74 33) 26 05 41 -  
**Ttx:** 743388

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

• Bio-/Faulgasverdichter • Öl-Wasser-Trennsystem • Peripheriege-  
rate zur Rauchgasentstickung • Schalldämmboxen für Kompresso-  
ren

**Pollution Control - Industrial Technology**

• Biogas / Manure gas compressors • Oil-water separating system  
• Periphery units for removal of nitrogen out of flue gas • Sound in-  
sulating boxes for compressors

**Niederlassung/Vertretung - Branch/Agency**

**Belgien (B)** N.V. Atracom Industries S.A. Asiadok 28 D (Noorderlaan) B-  
2030 Antwerpen

**NSW Umwelttechnik, Nordenham** Halle 4.2, Stand OP 13  
(☎ 7 44 40 25)

**Norddeutsche Seekabelwerke AG**

**A:** Kabelstraße, ☐ 14 64, D-W-2090 Nordenham -  
☎ (0 47 31) 82-0 - **Tx:** 238315 - **C:** KABELWERKE  
NORDENHAM - **Fax:** (0 47 31) 8 23 01

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

**Aerosolabscheider** zur Erfassung und Abscheidung feinsten Nebel  
( $< 0.1 \mu$  bis ca.  $10 \mu$ ) aus Prozeß- und Abgasströmen. Die Abschei-  
deelemente sind wartungsfrei und erreichen mehrjährige Standzeiten.  
NSW-Aerosolabscheider werden in Stahl- und Edelstahl sowie  
in korrosionsfester Vollkunststoffbauweise geliefert. Zur Entfer-  
nung absorbierbarer Gasbeladung wird der Abscheider in Kombi-  
nation mit einem Füllkörperwascher geliefert.

**Stripper** für den Einsatz in Verfahren zur Beseitigung fluchtiger  
Substanzen (z.B. CKW) oder zur Entfernung von Stickstoffverbind-  
ungen aus Wasser/Abwasser.

**Chemische Naßoxidation** (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Verfahren) zur Entfernung von  
organischen Wasserinhaltsstoffen (z.B. CKW, AOX).

**Füllkörper:** Zylindrische Gitterfüllkörper (NOR-PAC<sup>®</sup>) aus Kunst-  
stoff zur Ausrüstung von Trennkolonnen.

**Biologische Verfahren in der Abwassertechnik:** Aerobe und ana-  
erobe Festbettreaktoren, ausgeführt als Tauchkörper, Tropfkörper  
oder getauchtes Festbett. Weitergehende Abwasserreinigung mit  
Stickstoff- und Phosphorelimination Meß-, Steuer- und Regeltech-  
nik im Kläranlagenbereich für kommunale und industrielle Anwen-  
der.

**Pollution Control - Industrial Technology**

**Aerosol separators** for the detection and separation of fine mists  
( $< 0.1 \mu$  to approx.  $10 \mu$ ) from process and waste gas streams.  
The separation elements are maintenance-free and reach a service  
life of several years. NSW aerosol separators are supplied in steel  
and special steel and in corrosion-proof plastics design. For the  
removal of absorbable gas loads the separator is supplied in com-  
bination with a packing scrubber.

**Stripper** for use in processes for the removal of volatile sub-  
stances (e.g. CHC) or for the removal of nitrogen compounds from  
water/waste water.

**Chemical wet oxidation** (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process) for the removal of or-  
ganic water ingredients (e.g. CHC, AOX).

**Packings:** Cylindrical grid packings (NOR-PAC<sup>®</sup>) of plastics for se-  
parator columns.

**Biological processes for waste water technology:** Aerobic and  
anaerobic fixed bed reactors, designed as submerged contact aer-  
ator percolation filter and submerged fixed bed. Extended waste  
water treatment with nitrogen and phosphorus removal. Measure-  
ment and control systems for sewage treatment plants for munici-  
pal and industrial users.

**Niederlassung/Vertretung - Branch/Agency**

**Bundesrepublik Deutschland (D)** Verkaufsbüro Umwelttechnik Jo-  
sephsburgstraße 4 D-W-8000 München 80 T (089) 4315500 Fax  
(089) 43198520

Verkaufsbüro Umwelttechnik NRW R-von-Scheven-Straße 42 D-W-5160  
Düren T (02421) 57252 Fax (02421) 58088

Freigelände F 2, Stand D 6-8

**Otto Oeko-Tech GmbH & Co. KG**

**A:** Gustav-Heinemann-Ufer 54, D-W-5000 Köln 51 -  
☎ (02 21) 37 73-0 - **Fax:** (02 21) 37 73-1 51

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

**Luft, Abgas, gasförmige Medien:**

• Verfahren zur Abluftreinigung und Rückgewinnung von Lösemitteln durch Adsorption, Absorption sowie katalytische und thermische Verbrennung

**Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:**

• Biologisches Verfahren zur Reinigung hochbelasteter Abwasser mittels HCR-Technik. • Verfahren zur Nitratentfernung bei der Trinkwassergewinnung durch Elektrodialyse (NITREM).

**Pollution Control - Industrial Technology**

**Air, waste gas, gaseous media:**

• Process for air purification and solvent recovery via adsorption/absorption as well as catalytical and thermal oxidation.

**Water, waste water, liquid media and sludges:**

• Biological process for purification of high loaded effluents via HCR technique. • Process for nitrate removal for water treatment via electro dialysis (NITREM).

**Niederlassung/Vertretung - Branch/Agency**

**Italien (I)** Otto Oeko Italia s.r.l. Alte Mendelstraße 102 I-39100 Bozen  
**Bundesrepublik Deutschland (D)** Otto Oeko-Tech GmbH & Co. KG Nieder-  
lassung Weimar, Rießner Straße 25 O-5300 Weimar

**Schott Apparatebau, Mainz** Halle 4.0, Stand KL 7-10  
(☎ 7 44 30 21-23)

**SCHOTT GLASWERKE**

**Geschäftsbereich Chemie-Apparatebau**

**A:** Hattenbergstr. 36, ☐ 24 80, D-W-6500 Mainz -  
☎ (0 61 31) 62 32 05 - **Tx:** 41879270 - **C:** GLASWERK MAINZ -  
**Fax:** (0 61 31) 62 33 99

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

**Luft, Abgas, gasförmige Medien:**

Gaswascher, Adsorber und Absorber für aggressive Abgase wie  
z.B. SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl, Cl<sub>2</sub>, Tri- und Perchloroethylen u.a. Rückfüh-  
rung der gewonnenen Säuren bzw. Lösemittel in den Fabrikations-  
prozeß.

**Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:**

Rückgewinnung und Reinigung verbrauchter Lösemittel-Wasser-  
Gemische / Aufarbeitung von nitrit- und nitrat-haltigen Spulwassern  
aus Härtereien und aluminiumverarbeitenden Betrieben. Hochie-  
stungsträger zur Immobilisierung von Mikroorganismen.

**Energieeinsparung**

**ZYCLODEST:** Wasserdestillationsanlagen mit Hochtemperatur-  
Wärmepumpe im Sekundärkreislauf, mit Leistungsbereichen von  
100 - 1800 l/h Reinstwasser. Energiebedarf 0,03 kWh/l Destillat;  
kein Kühlwasserbedarf.

**Pollution Control - Industrial Technology**

**Air, waste gas, gaseous media:**

Washers, adsorbers and absorbers for corrosive waste gases,  
such as SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl, Cl<sub>2</sub>, trichloroethylene and perchloro-  
ethylene etc. / Recycling of recovered acids resp. solvents in pro-  
duction processes.

**Water, waste water, liquid media and sludges:**

Recovery and purification of spent solvent-water-mixtures. Pro-  
cessing of rising liquids containing nitrites and nitrates from metal  
hardening shops and aluminium processing factories. Highly effi-  
cient carriers for the immobilization of microorganisms.

**Energy Saving**

**ZYCLODEST** water distillation units, capacity 100 to 1800 l/h high  
purity water, with high-temperature heat pump in a secondary cir-  
cuit. Energy consumption: 0,03 kWh/l distillate. No cooling water  
required.

**Schott Engineering GmbH**

A: Hattenbergstr. 36, ☎ 24 80, D-W-6500 Mainz -  
 ☎ (0 61 31) 62 32 05 - Tx: 41879270 - C: GLASWERK MAINZ -  
 Fax: (0 61 31) 62 33 99

**Umweltschutz - Betriebstechnik****Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:**

• Anlagen zur anaeroben Reinigung hochbelasteter Industrieabwasser • Aufarbeitung und Konzentrierung von Schwefelsäure bzw. Schwefelsäure-Salpetersäure-Gemischen anstelle Neutralisation.

**Abfall, Bodenschutz:**

• Aufarbeitung von Abfallsäuren der chemischen und Sprengstoff-Industrie zum Zwecke des Wiedereinsatzes.

**Pollution Control - Industrial Technology****Water, waste water, liquid media and sludges:**

• Complete plants and technology for anaerobic effluent treatment  
 • Recovery and concentration of sulphuric acid or sulphuric acid-nitric acid mixtures instead of neutralization.

**Waste, soil protection:**

• Recovery of waste acids in explosives and chemical industry for recycling.

Tech-Sep, Miribel

Halle 4.2, Stand L 20

**TECH-SEP Groupe Rhône-Poulenc**

A: Rue Penberton St. Maurice de Beynost, F-01703 Miribel  
 CEDEX - ☎ (0) 72 01 27 27 - Tx: 305445 - Fax: (0) 72 25 88 99

**Umweltschutz - Betriebstechnik****Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:**

Abwasserreinigung, Metallverarbeitung, Oberflächenbehandlung, Membranfiltrationsanlagen, Anwendung z.B. für Elektrotauchlackier-Abwasser, Schneid- und Bohrole, Entfettungsbäder, Textilabwasser, Leuchtstoff-Rückgewinnung und Farbstoff-Rückgewinnung chemische Industrie, Nuklearindustrie, Papierindustrie.

**Pollution Control - Industrial Technology****Water, waste water, liquid media and sludges:**

Wastewater treatment, metal processing, surface treatment, cross-flow ultrafiltration and microfiltration processes and equipment. Applications e.g. for paint recovery from waste water, cutting oils,

degreasing baths, textile effluents, dye recovery, chemical industry, nuclear and paper industries.

**Niederlassung/Vertretung - Branch/Agency**

Bundesrepublik Deutschland (D) TECH-SEP GmbH Groupe Rhône-Poulenc, Stadelstraße 10 Postfach 700862, 6000 Frankfurt am Main 70 T. (069) 60930 Fax (069) 6093333

Then, Schwäbisch Hall

Halle 1.2, Stand C 4

☎ 7 44 20 49

**THEN****Maschinen- und Apparatebau GmbH**

A: ☎ 40 01 71, D-W-7170 Schwäbisch Hall 4 -  
 ☎ (07 91) 4 03-0 - Tx: 74873 - Fax: (07 91) 40 31 66 -  
 Ttx: 791105

**Umweltschutz - Betriebstechnik**

**Thermische Desinfektionsanlagen:** Thermische Desinfektion biologisch belasteter Abwasser aus Sicherheitsbereichen, z.B. L3.

**Fermenter:**

Gewinnung von Wertstoffen aus kontinuierlicher Fermentation von Flüssig-Abfällen, z.B. Molke.

**Pollution Control - Industrial Technology**

**Thermal disinfection plants:** Thermal disinfection of biologically loaded waste waters from safety areas, e.g. L3.

**Fermenters:** Recovery of resources from the continuous fermentation of liquid wastes, e.g. whey.

**Udde GmbH**

A: Friedrich-Udde-Str. 15, ☎ 10 50 62, D-W-4600 Dortmund  
 1 - ☎ (02 31) 5 47-0 - Tx: 8228410 - C: UHDE DORTMUND -  
 Fax: (02 31) 5 47 30 32

**Umweltschutz - Betriebstechnik****Luft, Abgas, gasförmige Medien:**

Planung und Lieferung von Anlagen für Abgas/Rauchgasreinigung zur simultanen Entschwefelung und Entstickung nach dem Bergbau-Forschung/Udde-Verfahren sowie zur NO<sub>x</sub>-Entfernung nach dem SCR-Hitachi-Verfahren.

**Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:**

Abwasserreinigung mit aeroben (BIOHOCH<sup>®</sup> Reaktor), anaeroben (zweistufiges Udde/Schwartzing-Verfahren) und adsorptiven Prozessen (mit integrierter Regenerierung, BF-Verfahren)

Schlammfällung mit energiegeprägter Vorbehandlung und Verbrennung im Wirbelschichtofen oder anaerobe Behandlung.

**Pollution Control - Industrial Technology****Air, waste gas, gaseous media:**

Engineering and supply of facilities for waste-/flue-gas treatment with simultaneous desulphurization and NO<sub>x</sub> removal by the Bergbau-Forschung/Udde Process and for NO<sub>x</sub> removal by the Hitachi SCR Process.

**Water, waste water, liquid media and sludges:**

Waste water treatment with the aid of aerobic (BIOHOCH<sup>®</sup> reactor) anaerobic (two-stage Udde/Schwartzing Process) and adsorption processes (with integrated adsorbent regeneration, BF Process).

Sludge disposal with energy-saving pretreatment and incineration in a fluidized-bed incinerator or anaerobic treatment.

**Niederlassung/Vertretung - Branch/Agency**

Bundesrepublik Deutschland (D) Udde GmbH, Friedrich-Udde-Straße 2

Postfach 1529, D-W-6232 Bad Soden Taunus, T. (06196) 205-0, Tx. 407504ud d Fax (06196) 205420

Udde GmbH Werk Hagen, Buschmühlenstraße 20, Postfach 4260, D-W-5800 Hagen 1T, (02331) 6920, Tx. 823798, udde d Fax (02331) 692370

Udde Services and Consulting GmbH, Karl-Marx-Straße 56, Postfach 104051, D-W-4600 Dortmund 1, T. (0231) 575870, Tx. 8228413uscd d

Udde Anlagenbau GmbH, Steinplatz 1, D-W-100 Berlin 12, T. (030) 3122038, Tx. 183421, noelb d

Udde GmbH Büro Leipzig, Gustav-Adolf-Str. 28, D-O-7010 Leipzig, T. (041293098, Fax (041) 29450, Tx. 512136, hoizg (dd)

Frankreich (F) Udde S.A. 71, Quai de Dion Bouton, Paris la Defense, F-92806 Puteaux Cedex, T. (11) 7781621, Tx. udde 611331 f Fax (11) 7762334

Italien (I) Hoechst Italia S.p.A. Div. Udde, Piazza S. Tuerr 5, I-20149 Milano, T. (02) 231071, Tx. 320165, noelb; Fax (02) 33104074

Ver. Staaten v. Amerika (USA) Hoechst-Udde Corporation (HUC), 560 Sylvan Avenue, Englewood Cliffs, NJ 07632, USA, T. (201) 5690100, Tx. 0135476, undechern egwa, Fax (201) 5697685

Großbritannien (GB) Udde Limited, Hoechst House, Salisbury Road, Hounslow, Middlesex TW4 6JH, GB, T. (11) 5722142, Tx. 8553883, undeuk g Fax (11) 2365336

Südafrika, Republ. (ZA) Udde (Pty. Limited), P.O. Box 52762, Saxonwold 2132, Unde House, St. David's Place, Parktown 2193, Johannesburg, T. (11) 4843970, Tx. 425875, Fax (11) 6426995

Brasilien (BR) Inter-Udde Engenharia Quimica Ltda, Edifício Anorau, Rua Pedro Americo 32-25, andar BR-01045, São Paulo, T. (11) 2222133, Tx. 1125840, lueq br Fax (11) 2222113

Mavi Udde Maquinas Vibratorias Ltda, Rua Robert Bosch 150, BR-01141, São Paulo, T. (11) 666920, 8266201, Tx. 1134958, unde br

Indien (IND) Udde India Ltd, Unde House, L.E. Shastri Marg, Vikhrol (West) Bombay-400083, T. (22) 557701, Tx. 1171654, unde in Fax (22) 5115017

Mexico (MEX) Grupo Udde Mexico S.A. de C.V., Bvto. A. Camacho Camacho 6-A, 12, Piso 53390, Naucapán, Edo. de Mexico, Mexico, T. (5) 557-6863, Tx. 1775662, Fax (5) 3952858

Sowjetunion (SU) Udde Büro Moskau c/o Hoechst, Vertretung Moskau, International Post Office, P.O. Box 78, Tryokhnrdny Per. 11 13, 103000, Moskau, T. (95) 2998285, Tx. 413138, noemo su, Fax (95) 2002206

Chinesische Volksrep. (TJ) Udde Office Beijing, Office 1504, CITIC-Building 19, Jianguomenwai Dajie, Beijing, T. (11) 5003675, Tx. 22674, unde cn Fax (11) 5004456

Australien (AUS) Udde Office Australia, c/o Snedden Pacific Pty. Limited, 136, Buckhurst Street, South Melbourne, Victoria 3205, T. (3) 6906055, Tx. 38110, Fax (3) 6992279

TU Clausthal, Therm. Verfttechnik

Halle 1.2, Stand A 2

☎ 7 44 17 26

**Institut für Thermische Verfahrenstechnik der TU Clausthal**

A: Leibnizstr. 15, D-W-3392 Clausthal-Zellerfeld -  
 ☎ (0 53 23) 72 24 22 - Tx: 953828 - Fax: (0 53 23) 72 35 00

**Umweltschutz - Betriebstechnik****Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:**

Verfahren zur biologischen Abwasserreinigung, Entwicklung von Hochleistungssystemen und Verfahrenskombinationen - Kohlenstoffelimination, Nitrifikation, Nitrat- und Nitritreduktion - Prozeßsysteme zur biologischen Abwasserreinigung / Naßoxidation, Belüftungsschlammflockung / Schlammkonditionierung und -behandlung, Charakterisierung von Schlämmen.

Abfall-Bodenschutz:  
Kompostierung / Anaerobe Abfallbehandlung / Deponietechnik  
Recycling / Sortierung / Müllaufbereitung

### Dienstleistungen

Erstellung von Studien für Abwasser-, Schlamm- und Abfallbehandlung / Beratung und Entwicklung von Konzepten / Durchführung von Pilotversuchen / Analytik / Altlastenanalyse und Sanierungskonzepte

### Pollution Control - Industrial Technology

#### Water, waste water, liquid media and sludges:

Processes for biological waste water treatment / development and design for high performance systems and process-combinations - removal of carbon, nitrification, nitrate and nitrite reduction - process control systems for biological waste water treatment - wet oxidation / sludge flotation / sludge conditioning-treatment and characterisation

#### Waste, soil protection:

Composting / anaerobic waste treatment / landfilling disposal technology recycling / classification, grading / waste conditioning

### Services

Studies on waste water, sludge and solid waste treatment / consultancy and development of concepts for treatment / pilot plant studies / analytical / sanitary concepts

TU Graz, Inst. Verf.technik

Halle 1.2, Stand D 18

### Technische Universität Graz Institut für Verfahrenstechnik

A: Inffeldgasse 25, A-8010 Graz - ☎ (03 16) 8 73-74 60 -  
Tx: 311221 - Fax: (03 16) 82 76 85

### Umweltschutz - Betriebstechnik

#### Abteilung "Grundlagen der Verfahrenstechnik":

In dieser Abteilung gibt es bezüglich des Problemkreises "Umwelt" zwei Schwerpunkte:

- Energietechnik: Wärmerückgewinnung und Schadstoffminderung durch Nutzung von Rauch- und Abgasen
- Integrierter Umweltschutz: Studien, Konzepte, Modelle und Technologien zu Abfall- und Emissionsvermeidung.

#### Abteilung "Bioverfahrenstechnik":

Das Hauptarbeitsgebiet der Abteilung ist die biologische Abwasserreinigung. Die neuentwickelte Anlage für die dezentrale Abwasserreinigung ist inzwischen in 15 Großanlagen für die Reinigung von Kommunal- und Industrieabwasser im Einsatz; die Frage der Einleitung von Fäkalien in diese Anlagen konnte geklärt werden. Ein wichtiges Arbeitsgebiet ist derzeit die Kombination der biologischen Abwasserreinigung mit Adsorptionsverfahren. Eine für ein afrikanisches Entwicklungsland entworfene kombinierte Tropfkörper-Lagunenanlage ist in den letzten Monaten angefahren.

Daneben beschäftigt sich die Abteilung mit biologischen Verfahren der Bodenreinigung, sowie mit der Kompostierung von Abfälle.

#### Abteilung "Apparatebau und Mechanische Verfahrenstechnik":

Die Abteilung für Apparatebau und Mechanische Verfahrenstechnik verfügt über umfangreiche Erfahrungen an kommerziellen Anlagen zur Rauchgasentschwefelung mit sowohl trockenen (Kalk-Adsorption) als auch mit nassen Verfahren. Zur Messung der Partikelgröße und Partikelgrößenverteilung wurde ein eigenes Meßgerät entwickelt.

### Pollution Control - Industrial Technology

#### Department "Chemical Engineering Fundamentals":

Activities in this department regarding environmental protection concentrate on two aspects:

- Energy technology: Heat recovery and waste reduction in waste and flue gases
- Waste reduction in industrial processes through better management and new technologies.

#### Department "Bio-Chemical Engineering":

The main field of activity of the department is biological waste water treatment. The newly developed plant for decentralized waste water purification is now operating in 15 installations (up to 2500 population equivalents) for the treatment of domestic and industrial waste water; the introduction of faecal matter from function chambers has been investigated. Another important field of activity is the combination of biological waste water purification with adsorption processes.

A plant combining trickle bed filters and lagoons designed for a slaughterhouse in a developing country in Africa started operation during the last months.

Besides this the department deals with biological processes for soil purification and with composting of waste materials.

#### Department "Design of Pressure Vessels and Powder Technology":

In this department a wide spread experience is available for flue gas desulfurisation in conventional plants for dry and wet technologies. For the experimental evaluation of particle sizes and distribution a measuring instrument has been developed.

162 Uni Hannover, Inst. Techn. Chemie

Halle 1.2, Stand C 13  
(☎ 7 44 14 04)

### Universität Hannover

### Institut für Technische Chemie

A: Callinstr. 3, D-W-3000 Hannover - ☎ (05 11) 7 62-22 69 -  
Tx: 923868 - Fax: (05 11) 7 62 30 04

### Umweltschutz - Betriebstechnik

#### Abfall, Bodenschutz:

Verfahren zur mikrobiologischen Bodensanierung: In Zusammenarbeit mit der Industrie wird am Institut ein horizontaler Bio-Bodenmischer im Technikumsmaßstab zur mikrobiellen Reinigung betrieben. Das Verfahren stellt ein geschlossenes System dar, wodurch Schadstoffverlagerung verhindert wird. Bei den bisher mikrobiell schwer abbaubaren polyaromatischen Kohlenwasserstoffen werden problemlos die B-Werte der "Holland Liste" erreicht. Das Verfahren ist auch erfolgreich bei feinstkörnigen, plastischen Böden und Separationsschlämmen aus Bodenwaschungen.

### Pollution Control - Industrial Technology

#### Waste, soil protection:

Process for microbial soil cleaning: In cooperation with industry the Institute of Tech. Chemistry is developing a horizontal bioreactor for soil cleaning on a technical scale. The process comprises a closed system to avoid emission of toxicants. The resulting concentration of polyaromatic hydrocarbons is lower than the B-values of the "Dutch list". Decontamination is even successful with finest-grain soils of plastic behaviour and separation slurries from soil washing processes.

Uni-GH Paderborn, Techn. Chemie

Halle 1.2, Stand B 12

### Universität-Gesamthochschule Paderborn Technische Chemie und Chemische Verfahrenstechnik

A: Warburger Str. 100, ☎ 16 21, D-W-4790 Paderborn -  
☎ (0 52 51) 60 25 97 - Tx: 936776 - Fax: (0 52 51) 60 25 19

### Umweltschutz - Betriebstechnik

#### Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:

Mikrobieller Abbau von oxidativer Behandlung von persistenten Substanzen. Reaktorentwicklung: Prozeßführung mikrobieller Abbauprozesse: physikalische und chemische Vorklämung (Ozonung, Flotation)

### Pollution Control - Industrial Technology

#### Water, waste water, liquid media and sludges:

Microbial degradation and treatment by oxidation of persistent substances: reactor development: process control of microbial degradation processes: physical and chemical preliminary treatment (ozonation, flotation)

Walhalla-Kalk, Regensburg

Freigelände F 1, Stand G 1-3

### Walhalla-Kalk

### Entwicklungs- und Vertriebsgesellschaft mbH

A: Donaustauer Str. 207, ☎ 12 05 04, D-W-8400 Regensburg  
12 - ☎ (09 41) 4 50 81 - Fax: (09 41) 40 25 38

### Umweltschutz - Betriebstechnik

#### Wasser, Abwasser, flüssige Medien und Schlämme:

Industrieabwasserbehandlung - neuester Stand der Technik: Schwermetalle < Rahmen-Abw. VwV Sulfat < 50 mg/l Arsen, Antimon < 0,3 mg/l. Trennung der Schlammfraktionen in schwermetall-belastet und unbelastet.

### Pollution Control - Industrial Technology

#### Water, waste water, liquid media and sludges:

Industrial waste water treatment - most recent state of the art: Heavy metals < administrative regulation values sulphate < 50 mg/l arsenic, antimony < 0,3 mg/l; Separation of sludge fractions in heavy metal-polluted and non-polluted sludges

Wir sind daran interessiert, Lizenzen für folgende Arbeitsgebiete zu vergeben / we are interested in giving licenses for the following fields of activity: Weitergehende Fällung von Sulfat und Schwermetallen - Advanced precipitation of sulfates and heavy metals - Précipitation avancée de sulfates et métaux lourds

Des ouvrages suivants :

- Microbiologie générale, de J.C. Senez
- Bactéries et bactériophages, de l'Institut Pasteur
- Biotechnologie, de R. Scriban
- On site bioreclamation, de R.E. Hinchee et R.F. Olfenbuttel
- Biofutur

ont été empruntés certains passages et figures.



**LE TRAITEMENT DES DECHETS  
PAR VOIE BIOLOGIQUE  
AUX ETATS-UNIS**

**20-3-1992**



# LE TRAITEMENT DES DECHETS PAR VOIE BIOLOGIQUE AUX ETATS-UNIS

<b>1- Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2- Les perspectives de la biodégradation</b>	<b>4</b>
<b>2-1 Les études théoriques de TreaTek</b>	<b>5</b>
<b>2-2 Le concept de base de l'Université de Notre Dame</b>	<b>6</b>
<b>3- Les différentes techniques</b>	<b>7</b>
<b>3-1 Aérobie ou anaérobie</b>	<b>8</b>
<b>3-1-1 Les sources d'oxygène</b>	<b>8</b>
<b>3-1-2 Le traitement anaérobie</b>	<b>14</b>
<b>3-2 In-situ ou en réacteur</b>	<b>18</b>
<b>3-2-1 In situ</b>	<b>18</b>
<b>3-2-2 En réacteur : la configuration</b>	<b>29</b>
<b>3-3 Le choix : micro-organismes, végétaux, enzymes</b>	<b>37</b>
<b>3-3-1 Le " feast-famine" de l'University of Notre-Dame</b>	<b>39</b>
<b>3-3-2 Les micro-organismes</b>	<b>40</b>
<b>3-3-3 Les végétaux supérieurs</b>	<b>49</b>
<b>3-3-4 Les enzymes</b>	<b>50</b>
<b>3-3-5 La chitine</b>	<b>51</b>
<b>3-4 Les techniques</b>	<b>51</b>
<b>3-4-1 La caractérisation du site</b>	<b>52</b>
<b>3-4-2 Les procédés, valorisation et pré-traitement</b>	<b>53</b>
<b>3-4-3 Les problèmes</b>	<b>82</b>
<b>4- Les développements futurs</b>	<b>85</b>
<b>4-1 Le DOE Deep Subsurface Microbiology Program</b>	<b>85</b>
<b>4-2 Le cas du PCB</b>	<b>86</b>
<b>4-3 Les collections de micro-organismes : Sybron</b>	<b>88</b>

4-4 Les recherches futures	89
4-5 Le cas particulier des déchets de laboratoires	89
4-5 Le traitement des déchets radioactifs	90
5- Le marché	91
5-1 Evaluation de Technical Insight	91
5-2 Comparaison des coûts de traitement	93
5-3 Les limites du traitement biologique	94
6- Conclusions	95
<i>Références</i>	97

# LE TRAITEMENT DES DECHETS PAR VOIE BIOLOGIQUE AUX ETATS-UNIS

## 1- Introduction

Le traitement par voie biologique des déchets municipaux et des eaux urbaines est pratiqué depuis plusieurs décennies. La dégradation de ces substances organiques est naturelle mais elle peut être activée par divers procédés, en particulier par l'aération qui permet aux organismes de se multiplier plus rapidement. En général la concentration des substances d'origine chimique dans les unités de traitement ne dépasse pas 200 ug/l alors que dans les eaux souillées industrielles elle peut atteindre des concentrations de 1 à plusieurs milligrammes par litre (1--3). Il faut dans ce cas adapter la technique ou plutôt les techniques en fonction de la nature du ou des contaminants. Certaines molécules toxiques d'origine chimique peuvent contaminer accidentellement ces unités et détruire les micro-organismes indigènes.

De nombreux procédés ont été mis au point pour traiter les déchets dangereux toxiques afin de les rendre inoffensifs tant pour l'homme que pour l'environnement. Une centaine de nouvelles techniques ou nouveaux procédés sont actuellement à divers stades de développement aux Etats-Unis. Il a fallu attendre le vote en 1976 du Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) pour que les déchets dangereux soient réellement pris en considération. En 1984 le Congrès vote l' "Hazardous and Solid Waste Amendments " (HSWA), dont le but est de réduire la dépendance des industriels vis à vis des décharges et de forcer les producteurs de déchets dangereux à traiter leurs rejets afin de réduire d'une part leur toxicité et d'autre part leur volume. La position de l'Environmental Protection Agency (EPA) en ce domaine est nette et précise. Les déchets dangereux doivent être traités avant leur mise en décharge sauf si l'on est à même de démontrer soit qu'il n'y aura pas de migration de substances toxiques, soit que la dégradation sera totale avant qu'un écoulement ait lieu. ( ... *land disposal facilities will have to prove either that no migration will occur, or that the wastes will be degraded prior to any potential migration*). Une nouvelle branche d'activité de l'industrie a vu le jour pour répondre aux normes et aux directives contenues dans le RCRA et le HSWA. Il a fallu ainsi identifier pour chaque déchet la " *Best Demonstrated Available Technology* " (BDAT), c'est à dire choisir l'approche la plus efficace et le meilleur rapport qualité/prix.

En dépit des milliards de dollars consacrés à la mise au point de procédés de destruction des déchets aucune technique unique et universelle n'a pu être trouvée. Il n'y a pas de remède miracle.

L'approche biologique est l'une des diverses techniques. Ce n'est que depuis une vingtaine d'années que les compagnies agro-alimentaires utilisent des organismes pour réduire la toxicité des polluants organiques qu'elles rejettent dans les rivières. Etrangement c'est l'un des secteurs d'activité le moins innovant, celui de la récupération et du traitement des déchets, qui a devancé toutes les autres branches industrielles. Les compagnies chimiques et pharmaceutiques ont adopté ce procédé pour traiter tout ou partie de leurs déchets, hydrocarbures, composés aromatiques et chlorés. Dans bien des cas il suffit d'activer ou comme les américains l'écrivent "d'encourager" la croissance des organismes qui se développent naturellement dans le milieu (2--4).

En 1968 les réservoirs du célèbre Queen Mary furent traités par voie biologique avant que le navire n'aille prendre sa retraite sur les bords des quais de Long Beach (Californie).

Cette technique est aussi utilisée pour concentrer des métaux comme le cuivre, le plomb, le cadmium, le mercure,...dégradation et recyclage ne font alors plus qu'un!

La compréhension des phénomènes de dégradation qui font appel à l'action des micro-organismes est encore incertaine mal comprise. Les traitements physiques, chimiques, et thermiques font peur du fait de la complexité des procédés utilisés et des résidus de l'opération qu'il faut ensuite mettre en décharges, résidus qui présenteront à moyen ou long terme un danger potentiel. Il faudrait combiner les techniques. En 1986 lors de la conférence organisée à Arlington (Virginia) par le Consortium for Biological Waste Treatment Research and Technology il a été précisé ... *"management application is enhanced by the potential to apply biological treatment in sequence with other chemical and thermal processes"* (1--26).

La concentration par des organismes vivants des agents polluants peut représenter une séquence intéressante du traitement (1--28). Les micro-organismes concentrent des constituants organiques ou inorganiques qui seront ensuite traités par voie thermique.

Le traitement biologique des déchets dangereux peut faire appel à des techniques de pointe. Les manipulations génétiques ouvrent la voie à un champ d'application très étendu comme par exemple l'emploi d'enzymes modifiées et immobilisées. Cette méthode n'est en fait qu'un prolongement de techniques développées à d'autres fins par les industries agro-alimentaires et pharmaceutiques. Aux Etats-Unis l'instinct grégaire pousse les compagnies à se regrouper pour défendre leurs intérêts.

En 1989, 40 firmes américaines productrices et utilisatrices de micro-organismes fondèrent l' Applied BioTreatment Association (ABTA) pour promouvoir et divulguer les informations concernant les derniers développements techniques et les applications potentielles (3). Le gouvernement fédéral qui souhaitait suivre les activités créa en parallèle en 1990, le Bioremediation Action Committee (BAC), regroupant 27 représentants du gouvernement fédéral, de l'industrie et des universités. Le BAC est lui-même constitué de quatre sous-comités: Spill Response Subcommittee, Treatment Protocols Subcommittee, Data Subcommittee, et Research and Education Subcommittee. Sans l'accident de l'Exxon Valdez le BAC n'aurait sans doute jamais vu le jour. Le scepticisme disparaît. La dégradation par voie biologique d'hydrocarbures qui contaminaient les rivages de l'Alaska fut largement reprise par les médias. Quelques mois plus tard, l'observation de la destruction naturelle des PCBs (polychlorobiphényle) dans les sédiments des Grands Lacs et de l'Hudson River a multiplié l'intérêt des américains. Depuis ces deux événements le public semble "pousser", quant aux industriels ils ont pour la plupart une attitude que l'on peut qualifier de "*show me*". Ils privilégient des procédés performants comme l'incinération et la vitrification qui réduisent les volumes ou prennent en masse les déchets sans être à l'abri de problèmes dans le futur. Le traitement biologique est donc une des alternatives qui présente des avantages et des inconvénients. La fragilité du procédé biologique est souvent mise en cause. Même si un micro-organisme est capable de détruire une molécule, un changement de température, d'humidité, ou la présence de métaux toxiques, peut arrêter la destruction ou modifier. Tous les procédés ont leurs limites, chaque pollution est un cas particulier, la biodégradation est une des procédures que l'on doit envisager au même titre que les autres, incinération ou solidification par exemple.

## 2- Les perspectives de la biodégradation : les options

Les techniques de traitement des déchets dangereux sont de plus en plus variées. Grâce à des programmes nationaux comme celui du Superfund les compagnies développent de nouvelles méthodes. La biodégradation est l'une d'entre elles. Elle est utilisée aujourd'hui aux Etats-Unis dans un peu plus de 10 % des traitements (4--27). Ce pourcentage devrait fortement augmenter dans les années à venir car les interventions in-situ au niveau des terrains contaminés et eaux polluées sont, comme nous le verrons, beaucoup moins chères que les autres techniques. D'après Louis Fernandez, CEO (Chairman Executive Officer) de la compagnie Celgene, 20 % des décharges de la liste du Superfund, décharges abandonnées du type Love Canal, peuvent être nettoyées par voie biologique.

Cette évolution vers le développement des techniques biologiques est la conséquence directe de la compréhension des mécanismes cellulaires.

La première manipulation génétique a juste quinze ans. On admet que la connaissance des mécanismes cellulaires double tous les sept ans. Après des années d'empirisme les processus enzymatiques commencent à être compris. Ils présentent des avantages économiques importants comparés à des procédés très coûteux comme l'incinération, la prise en masse, les traitements physiques... et comme l'a fait remarquer un américain lors de la conférence d'Arlington (Virginie) sur ce sujet : *"les bactéries travaillent 24h/24 et ne font jamais grève!"*.

Depuis le vote en 1976 du RCRA (Resource Conservation and Recovery Act) et en 1980 du CERCLA (Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act) il est spécifié que le traitement doit être privilégié par rapport au stockage ou à l'injection souterraine. Cette dernière pratique est encore très répandue aux Etats-Unis. Elle permet aux Etats du Sud, Texas et Louisiane de pousser vers la tête des puits le pétrole et de se débarrasser des substances toxiques.

Le paragraphe 121 (b) du SARA note ainsi : ... *"Remedial actions in which treatment permanently and significantly reduces the volume, toxicity or mobility of the hazardous substances, pollutants, and contaminants as a principal element, are to be preferred over remedial actions not involving such treatment. The off-site transport and disposal of hazardous substances or contaminated materials without such treatment should be the least favored alternative remedial action where practicable treatment technologies are available..."*

Les traitements par voie thermique et biologique sont donc clairement privilégiés car ils offrent une solution permanente. Ils réduisent les volumes, la toxicité et peuvent être effectués in-situ.

On peut se demander pourquoi le traitement des déchets par voie biologique est encore si peu répandu alors que Mr. Thomas Zitrides, Président de Bioscience Management Inc. estime que 90% des substances chimiques classées comme dangereuses sont biodégradables (5--18). Certains affirmaient que les déchets dangereux étaient toxiques pour les micro-organismes, les rendant contre performant. Les molécules rejetées, synthétisées par voie chimique sont, pour la plupart, de production relativement récente, il était difficile jusqu'à ces dernières années de concevoir que des micro-organismes aient naturellement acquis la capacité de les dégrader (6--7). La capacité d'adaptation des organismes à décomposer des substances synthétisées par voie chimique est beaucoup plus grande et surtout beaucoup plus rapide qu'on ne l'a pensé jusqu' alors. Le pouvoir de mutation des micro-organismes est très grand, celui d'un gène est évalué entre  $10^{-5}$  à  $10^{-7}$  mais il faut garder à l'esprit que par simple mitose la plupart sont capables de se diviser toutes les 20 minutes.

La clé du succès de tout biotraitement passe par la flexibilité de la technique. Avant tout traitement il est nécessaire d' optimiser les conditions et en particulier dans le cas d'une approche aérobie de contrôler la concentration en oxygène qui est souvent un facteur limitant . Les nutriments, la température, le pH, l'humidité... sont des facteurs qui doivent demeurer constants.

## **2-1 L' optimisation : les études théoriques de TreaTek :**

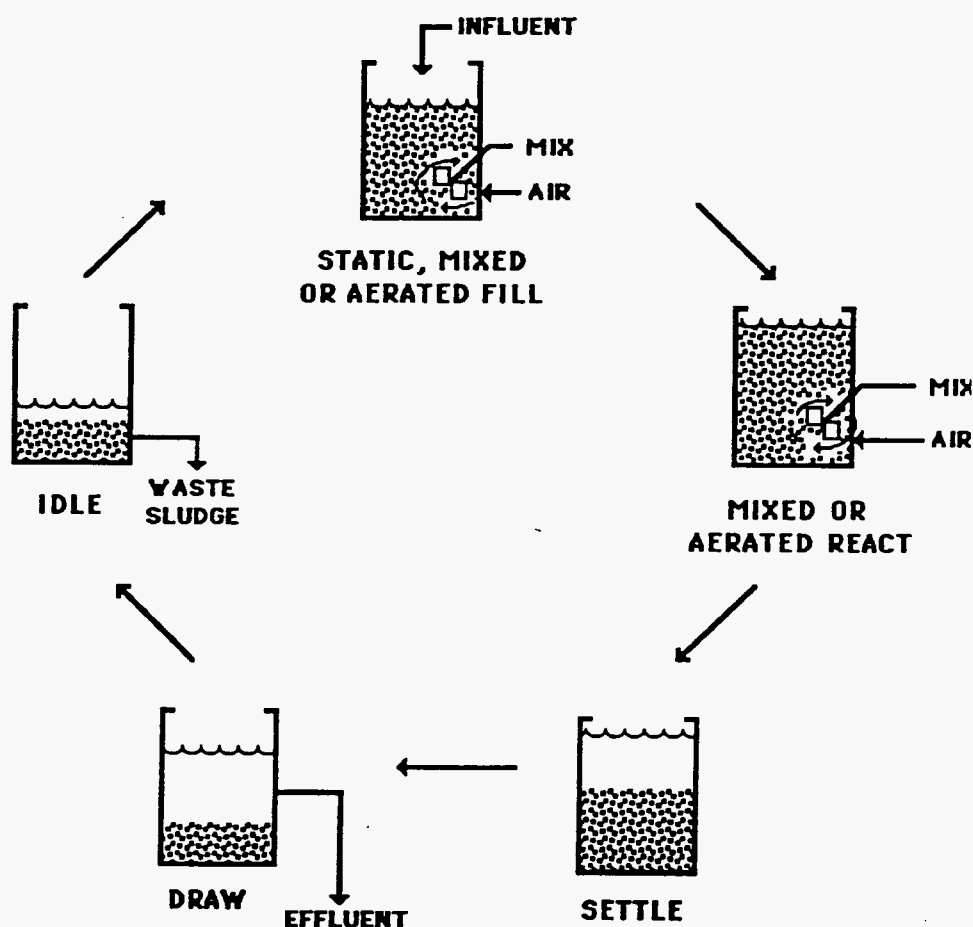
La firme TreaTek (New York), filiale d' Occidental Chemical Corporation, a étudié la dégradation des phénols par des bactéries sélectionnées en laboratoire dans des conditions optimales avec nutriments, surfactants, oxygène... et sur le sol contaminé.

Au bout de 25 jours la dégradation est totale lorsque les conditions sont optimales. Par contre dans le terrain contaminé on obtient une dégradation d'environ un tiers des phénols. Dans ce cas précis le sol contaminé depuis plusieurs années n'a pas supporté le développement naturel de bactéries. Il est donc nécessaire d'après Treatek d'effectuer des tests en laboratoires avant de définir la procédure à suivre pour fixer tous les paramètres. Chaque site a sa propre dynamique.

## 2-2 La sélection des organismes : le concept de base de l'Université Notre-Dame

Après plus de dix ans d'évaluation de la biodégradation l'Université Notre-Dame est arrivée à la conclusion que cette méthode est l'une des plus prometteuses pour éliminer les déchets dangereux.

Depuis 1980 le " Center for Bioengineering and Pollution Control" de l' Université Notre Dame, financé par Occidental Chemical Corp., et par deux autres compagnies CECOS Int., et Monsanto Agricultural Company a démontré que cette technique était beaucoup moins onéreuse que l'incinération ou la mise en décharge, méthode qui est considérée comme une " bombe à retardement ". La difficulté consiste à trouver l'organisme capable de dégrader la substance ou le mélange de substances. Le concept développé à Université Notre-Dame est d'avoir un cycle de cinq phases dans le même réacteur (Sequencing Batch Reactor, SBR) avec contrôle par des capteurs et des microprocesseurs qui permettent de faire varier les paramètres pour optimiser la destruction des substances dangereuses.





Le concept de base pour la sélection et le développement de l'organisme est défini en fonction de :

- la nature du substrat.
- la croissance de l'organisme choisi.
- sa capacité à vivre dans des conditions aérobies, ou anaérobies.
- la nature du produit final généré.

Le Professeur Irvine de l'Université Notre-Dame a comparé l'économie du procédé par rapport à d'autres techniques. Le traitement, par du charbon activé, de déchets industriels de la compagnie Occidental Chemical Corp., collectés au Hyde Park Landfill revient à environ 2 millions de dollars par an. Un traitement par le SBR montre que 90 % des composés organiques présents peuvent être dégradés biologiquement. Le gain d'un traitement biologique suivi par du carbone activé est de 30 dollars par tonne, par rapport au seul traitement au carbone activé.

MILLONS OF DOLLARS			
Year	Cubic Meters Per Year	Activated Carbon Cost Without Biotreatment	Activated Carbon Cost with Biotreatment
'82	12,000	0.5	0.15
'85	200,000	8.4	2.50
'87 on	57,000	2.5	0.75

6--16

Cette technique ne peut pas être utilisée pour tous les déchets, mais peut souvent être développée en amont d'autres procédés afin de réduire le coût du traitement.

Elle est simple et est actuellement opérationnelle dans les trois compagnies précitées : Occidental Chemical Corp., CECOS int, et Monsanto Agricultural Company.

### 3- Les différentes techniques

Alors que les bioréacteurs communément utilisés par l'industrie pharmaceutique et l'industrie agro-alimentaire ne renferment qu'une

population bien définie de micro-organismes ou d'enzymes et une matière à traiter précise et homogène, l'industrie du traitement des déchets par voie biologique doit faire appel à une pollution hétérogène et à un substrat dont la composition est souvent inconnue, c'est le cas de déchets anciens qui tombent sous le Superfund. Des réactions chimiques peuvent avoir eu lieu entre les différents produits durant la mise en décharge ou au fil des ans. La réaction est dynamique, ce qui rend impossible toute prévision et explique des résultats irréguliers et difficiles à dupliquer.

Chaque molécule à dégrader est un nouveau problème. Par exemple le lindane pesticide puissant sortira intact d'un réacteur anaérobie, alors qu'avec certaines bactéries anaérobies acclimatées il peut être dégradé.

### 3-1 Aérobie ou anaérobie

L'EPA a financé cinq programmes-tests pour le traitement des déchets dangereux, quatre sont par voie aérobie.

Le traitement aérobie est la technique la plus ancienne et la mieux maîtrisée. Les déchets sont aérés et se décomposent graduellement. Le système peut aller de la simple dégradation sans intervention de l'homme jusqu'au développement de procédés sophistiqués dont les applications techniques peuvent dépasser le simple traitement des déchets. Le Dr. Donaldson d'Oak Ridge National Laboratory a ainsi développé un bioréacteur qui permet de décomposer les résidus des eaux rejetées lors de la gazéification du charbon.

#### 3-1-1 Les sources d'oxygène

De nombreuses expériences et tests ont fait apparaître que le manque d'oxygène était un, sinon le facteur limitant lors de la dégradation aérobie des déchets (7--338). Bien souvent l'ajout d'une espèce de micro-organisme n'a aucun effet sinon d'accroître la substance organique alors que l'apport d'oxygène serait nécessaire.

Plusieurs techniques d'injection d'oxygène ont été mises au point par des compagnies dont Groundwater Technology Inc. (Chadds Ford, Pa).

La première technique physique, consiste à injecter le gaz dans le sol contaminé ou à aspirer le contaminant, ce qui entraîne l'arrivée d'air par des puits peu éloignés de celui où se produit l'inspiration. Les produits chimiques volatiles sont alors être traités par oxydation catalytique.

La seconde technique est chimique. Une substance qui peut fournir l'oxygène est incorporée au sol, c'est par exemple du peroxyde d'hydrogène, ou une substance qui est un accepteur d'électrons comme par exemple les nitrates. Le peroxyde, d'emploi facile, a cependant l'inconvénient de se décomposer rapidement lorsque le sol contient de fortes concentrations de fer ou de manganèse. Il a un coût élevé. Quant aux nitrates leur application est limitée, ils ne doivent pas dépasser 10 mg/l.

Le procédé choisi va dépendre de l'agent polluant, et des propriétés des formations géologiques.

En terme de coût, Groundwater Technology Inc. a déterminé que dans le cas d'une contamination importante, la ventilation était le procédé le plus économique.

Operating Cost Comparison High Degree of Contamination

System	Capital	Operation	Maintenance	Treatment Total	
				Time	Cost
Air Sparging	\$35,000	\$800/mnth	\$1200/mnth	1716 d	\$150k
Water Injection	\$77,000	\$1200/mnth	\$1000/mnth	1580 d	\$194k
Venting (vpr ctrl)	\$88,500	\$1500/mnth	\$1000/mnth	132 d	\$101k
Hydrogen Peroxide	\$60,000	\$10000/mnth	\$1500/mnth	330 d	\$187k
Nitrate Injection	\$120,000	\$6500/mnth	\$1000/mnth	335 d	\$210k

7--341

Ce tableau ne fait pas apparaître le rendement et l'efficacité des divers traitements. La ventilation, par exemple, présente le gros inconvénient d'être efficace sur un volume géographiquement limité. De plus elle nécessite un système de contrôle et de traitement des vapeurs.

D'après Groundwater Technology Inc. en terme de coût les traitements du moins chers au plus chers sont :

- (1) La ventilation-
- (2) le peroxide-
- (3) le nitrate-
- (4) l'injection d'air-
- (5) l'injection d'eau.

Cost-Effectiveness Comparison  
High Degree of Contamination

System	Flow		Site		System	Treatment	Contaminant
	Rate	Oxygen (lb/day)	Treated (%)	Efficiency (%)	Utilization (%)	Time (days)	Cost (\$/lb)
Air Sparging	15 wells @ 2cfm	6	41	1 (sparg) 70 (D.O.)	1716	90.3	
Water Inject	70 gpm	8	85	50	1580	100.2	
Venting	160 cfm	4000	72	5	132	13.4	
Peroxide	70 gpm	190	95	15	330	65.1	
Nitrate	70 gpm (120 gpm recovery)	211	85	13	335	77.2	

7--341

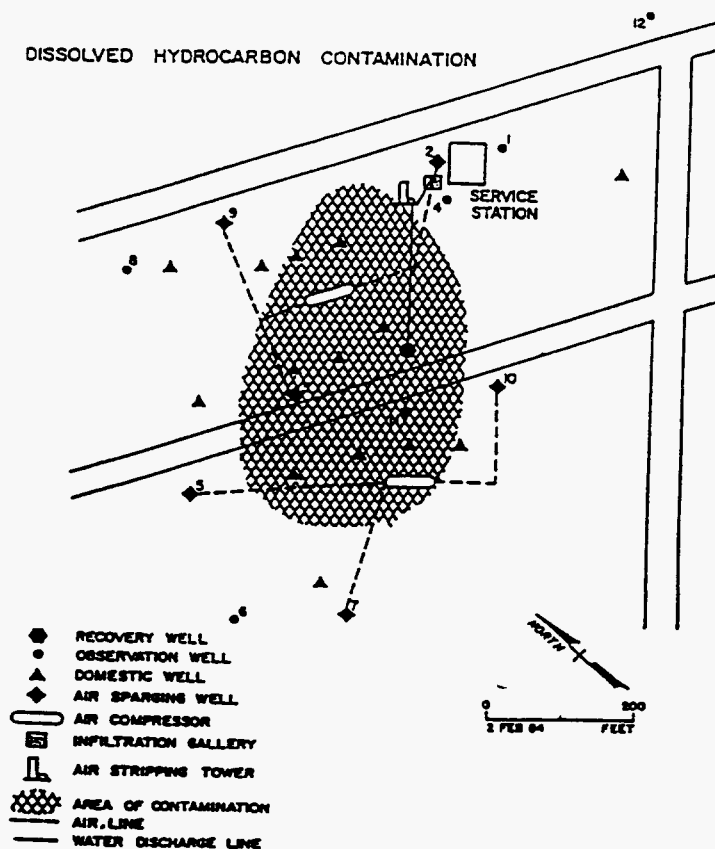
Si on les classe maintenant par ordre d'efficacité décroissante on a :

(1) le peroxide- (2) (3) le nitrate = injection d'eau- (4) la ventilation- (5) l'injection d'air.

Ces deux classements ont été établis après traitement de terrains fortement pollués. Si le sol est faiblement contaminé l'injection d'air est le système le plus économique.

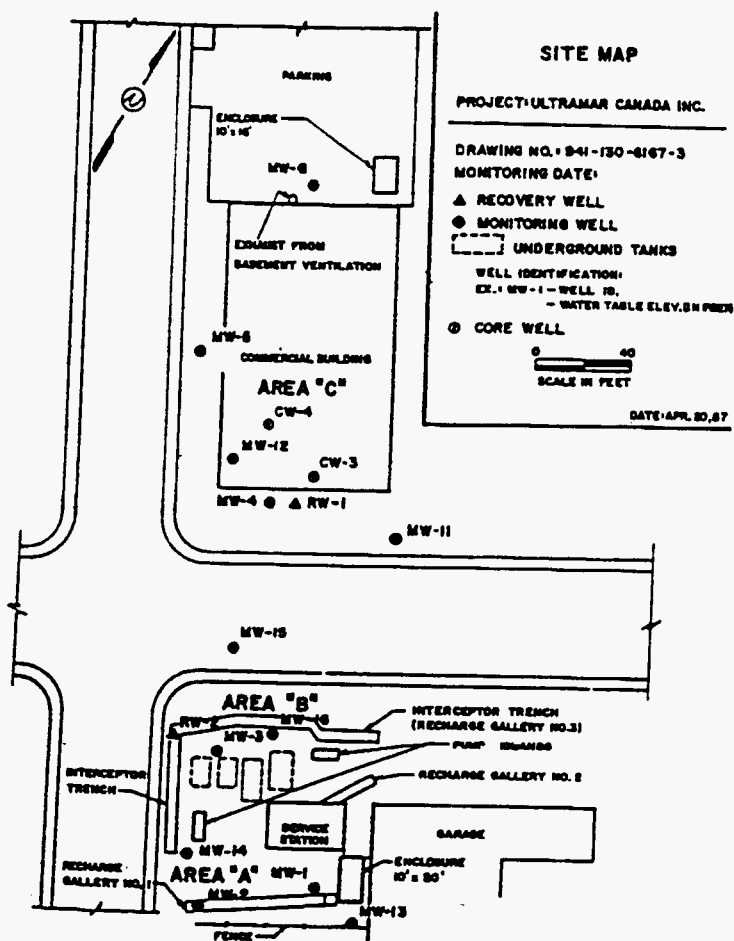
### 3-1-1-1 L'injection d'air : ses limites

Groundwater Technology Inc. Norwood Mass. a traité par injection d'air, d'eau et de nutriments un site contaminé par des hydrocarbures. La limite du procédé est fonction de la quantité d'oxygène capable de se dissoudre dans l'eau de la nappe (10 mg/l). Les premiers onze mois ont montré une réduction de la contamination de 50 à 85 % selon la localisation de la pollution. Ensuite, on observa une stabilisation indiquant que le système avait ses limites et ne pouvait pas permettre de traiter uniformément la pollution (zones réfractaires, éloignement, présence d'obstacles...). L'adjonction d'eau oxygénée à 100 mg/l a permis d'accélérer la dégradation.

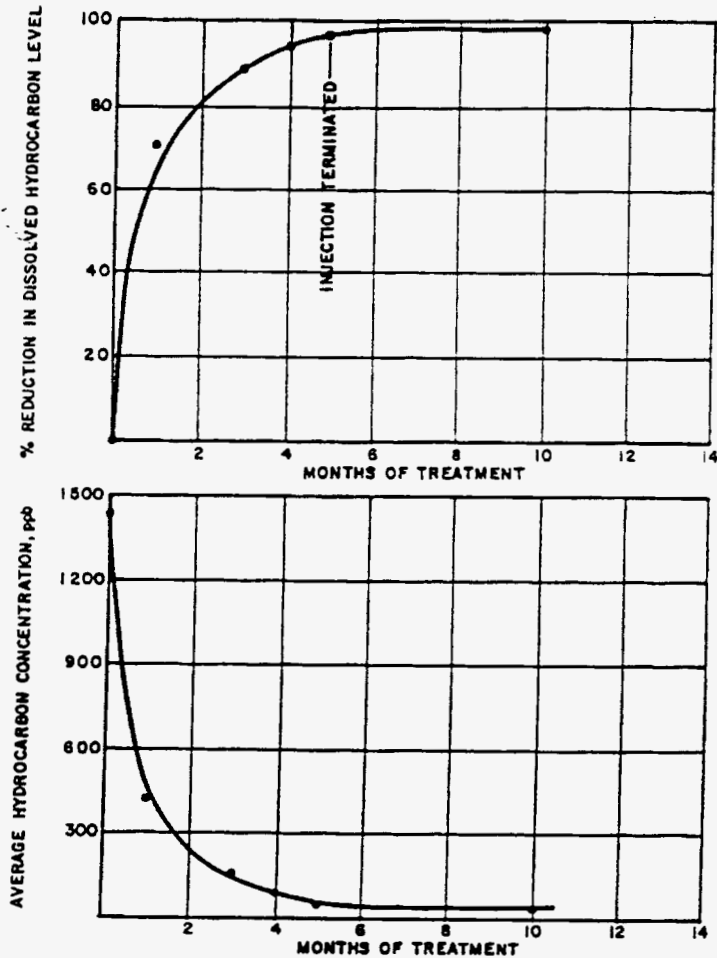


### 3-1-1-2 L'eau oxygénée

L'essai a été effectué dans des terrains contaminés autour d'une station service. La pollution s'étendait sur une épaisseur d'environ 3 mètres d'épaisseur, 300 m de longueur et 80 mètres de largeur. La zone "A" était légèrement contaminée. La zone "B" où se situait les réservoirs souterrains l'était en surface et en profondeur. La zone "C", zone de migration et de "chromatographie ou zone plume" contenait des hydrocarbures de différentes compositions. La technique a donc consisté à ajouter de l'eau oxygénée avec des nutriments.



En 5 mois la réduction de la pollution dans la zone " A", a atteint 95 %, 60 % dans la zone " B", et " 85 % dans la zone "C". Dix huit mois plus tard les dernières analyses sur 10 puits ont montré que subsistait seulement 5 zones où la pollution était supérieure aux normes permises par l'EPA.



7--343

Ce procédé a été développé par Industrial Chemical Group qui est une filiale de FMC. A la pression normale, la solubilité de l'air dans l'eau est de 40-50 ppm, soit 8-10 ppm d'oxygène. Dans l'eau oxygénée elle monte à 40-50 ppm d'oxygène.

Cette technique a été utilisée au milieu des années 70, pour le traitement de minerais d'uranium. La difficulté a consisté à contrôler la dynamique de la réaction de l'eau oxygénée qui se décompose trop rapidement et est toxique pour les micro-organismes. Pour réduire la toxicité il a fallu traiter le sol avec l'eau oxygénée dans des bacs et ensuite répandre l'ensemble sur le site. En général ce traitement est effectué après la ventilation pour parachever la dégradation. Sur une zone contaminée par des hydrocarbures, FMC est arrivé en 20 mois par ventilation à faire passer la concentration d'hydrocarbures de 15 ppm à 2,5 ppm. On observe

ensuite un palier, l'injection d'eau oxygénée permet d'accroître la dégradation et d'éliminer totalement les hydrocarbures dans certains puits (8--32).

L' eau oxygénée permet donc d'affiner le traitement et est complémentaire de la ventilation.

### 3-1-1-3 La ventilation

Les essais ont été conduits sur l'emplacement d'une ancienne station service désaffectée du Massachusetts. La contamination se situait entre 3 et 4 mètres, dans la zone de variation en hauteur de la nappe phréatique. Le procédé consista à installer d'un système de ventilation d'air avec six points d'extraction des vapeurs, dont deux sur l'ancien emplacement des réservoirs. Du carbone activé permit, en surface, l'absorption des substances volatiles organiques.

DATE	CARBON			BENZENE	TOLUENE	ETHYL		TPH	WATER
	OXYGEN ppm	DIOXIDE ppm	METHANE ppm			BENZENE ppm	XYLENE ppm		
02/07/89	210000	11000	740	1.20	0.44	0.22	2.00	560	15000
02/08/89	210000	10000	750	0.00	0.52	0.22	1.80	88	15000
02/09/89	210000	10000	420	0.00	0.00	0.00	0.00	0	15000
02/13/89	210000	2900	55	0.00	0.00	0.00	0.00	51	15000
02/14/89	210000	2800	230	1.40	0.00	0.00	0.68	240	15000
02/27/89	210000	1700	170	0.36	2.50	4.20	3.90	130	15000
03/09/89	210000	1300	100	0.36	0.29	0.00	0.00	190	15000
04/12/89	210000	1300	0	0.00	0.00	0.00	0.00	46	15000
04/25/89	210000	1400	0	0.00	0.00	0.00	0.00	21	15000

All samples taken from effluent of soil vent blower

7--343

Les concentrations de méthane, benzène, toluène ont atteint "0%" en deux mois. L'évolution de la concentration en CO<sub>2</sub> est due à l'activité des bactéries.

Cette technique consiste donc à activer le processus naturel, en minimisant les frais de traitement.

### 3-1-2 Le traitement anaérobie

La dégradation anaérobie permet de transformer les substances toxiques en gaz, principalement en méthane. Ce gaz peut alors être utilisé comme source d'énergie. La production de gaz est importante et elle est un élément à prendre en considération lors du choix des techniques.

D'une façon générale les bactéries anaérobies demandent moins de nutriments que celles qui se développent en présence d'oxygène. Elles ont un potentiel de dégradation élevé et elles peuvent vivre dans des conditions extrêmement difficiles. Le pH est ajusté, autour de 3,5. La dégradation anaérobie produit peu de déchets. La présence de substances toxiques inhibitrices, en particulier de métaux, est une entrave au développement de cette méthode.

Dans de nombreuses décharges la production de méthane est stimulée par arrosage des déchets (9).

Des prélèvements sur des sites contaminés permettent de trouver des bactéries qui dégradent les produits chimiques. La sélection permet ensuite d'isoler des souches à croissance rapide ou/ et performantes. Les enzymes peuvent aussi être identifiées et synthétisées après clonage des gènes chez *Escherichia coli* ce qui permet d'entrevoir d'autres modes de traitement.

Cette technique est cependant controversée. L'épandage de bactéries modifiées génétiquement lors de traitements agricoles pour lutter contre le gel des plantes ou contre des insectes parasites devrait convaincre le public que l'utilisation de micro-organismes dont le patrimoine génétique a été modifié n'est pas nuisible (voir § 3-3-2-2).

La " dégradation anaérobie" a été comprise grâce à l'étude des réactions dans le rumen des bovins. Il est apparu alors que chaquetype de molécule (dans ce cas produit provenant de la photosynthèse) avait sa propre caractéristique, était unique et nécessitait un traitement spécifique.

Il est nécessaire d'immobiliser les cellules et de les acclimater graduellement à la concentration et à la nocivité du déchet. La réaction peut être activée en chauffant légèrement, par exemple, avec le méthane qui se dégage.

Suite à ces études la firme Celanese a développé un procédé "Celrobic" dont elle a accordé la licence de développement à Badger Co, Inc. (Cambridge, Ma). Le traitement s'effectue en quatre phases:

- la première phase de traitement est aérobie avec évaporation naturelle.



- puis sont ajoutés du carbonate de sodium pour contrôler le pH et de l'ammoniac comme nutriment.
- l'agent polluant estensemencé à partir de produits fermentés dans les digesteurs (phase anaérobie).
- l'ensemble est alors mis dans le réacteur.

Le coût d'exploitation est de 400 000 dollars par an contre 1,5 million de dollars pour un système aérobie comparable. Du gaz récupérable est dégagé et la quantité de matières subsistantes dans le fond de cuve est très faible. D'après D.Z. Maat (London, Ontario), un procédé anaérobie produit 90 % de résidus en moins qu'une technique aérobie. Les industries agro-alimentaires utilisent ces bioréacteurs qui leur permettent de récupérer du gaz et de se débarrasser de molécules sans valeur commerciale.

Une autre technique prometteuse semble être celle d'Ecolotrol Inc. (Bethpage, Long Island, NY) qui a développé un réacteur à lit fluidisé. Le produit liquide à traiter va de bas en haut dans le réacteur qui contient du sable. La fluidisation permet à chaque grain de pouvoir être colonisé par des bactéries. La surface de contact est alors de 300 m<sup>2</sup> par m<sup>3</sup>. La taille du réacteur est réduite et le temps de traitement beaucoup plus court (10--66).

Le système a fait ses preuves et semble bien accepté. La ville de Lansing (Michigan), a installé quatre digesteurs de 12 mètres de haut et 3 mètres de diamètre pour traiter ses déchets toxiques. Des appareils mobiles et plus petits sont disponibles. Le Nassau County en a quatre et General Motors six pour traiter leurs huiles usées.

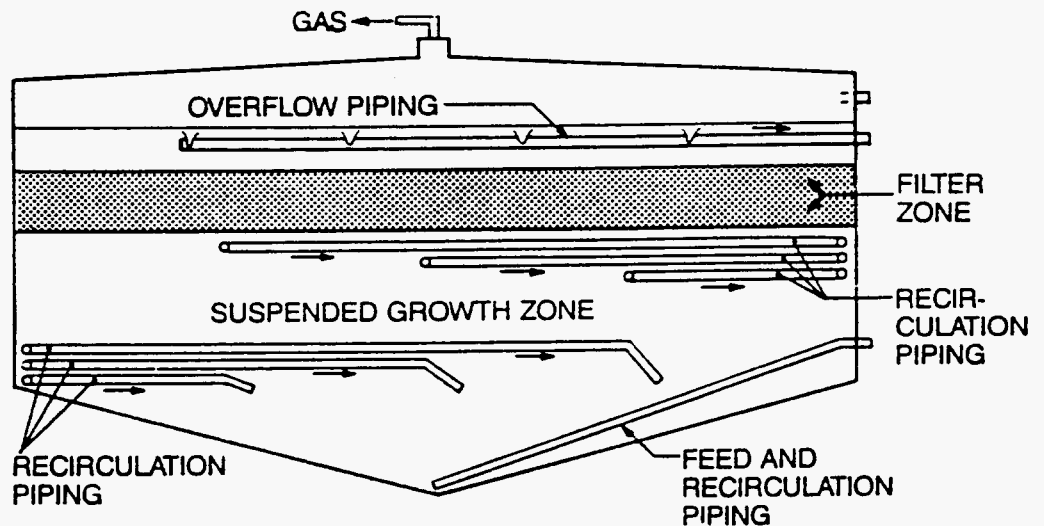
En France PUK a mis au point un procédé comparable avec des bactéries dénitrifiantes pour se débarrasser de l'azote contenue dans des effluents. 99,0 % des 700 mg/l d' l'azote sont fixées en 60 heures (10--66).

### 3-1-2-1 Les méthanogènes

En général les bactéries méthanogènes sont très sensibles à certains produits chimiques et aux métaux lourds. Cette inhibition est la raison pour laquelle cette technique est encore peu développée et utilisée uniquement dans des conditions particulières. Il faut souvent que la concentration en métaux lourds comme par exemple le plomb soit inférieure à 10 mg/l pour que le déchet puisse être traité par ce type de bactéries.

Des chercheurs américains et en particulier, les Dr. Bhattacharya et Parkin de la Drexel University (Philadelphia, PA), sélectionnent des bactéries capables de tolérer des concentrations de nickel supérieures à 30 mg/l. D'autres équipes travaillent sur de nouvelles configurations de bioréacteurs dont l'objectif principal est la production de méthane. Les réacteurs mis au point à l'Université de Floride ont une durée de rétention de 21 jours avec une dégradation finale des déchets de l'ordre 55 %. L'Institute of Gas Technology (IGT) de Chicago a développé un bioréacteur le "Solcon" qui est certainement le plus performant des Etats-Unis. Les déchets traités sont des déchets urbains, industriels, et agricoles. Le seul objectif est là aussi la production du méthane (10--71).

La compagnie Zimpro/Passavant a conçu un réacteur pour traiter les eaux fortement polluées. Ce qui fait son originalité est l'existence de plusieurs compartiments:



10--73

A la base du réacteur est la zone où les micro-organismes et les déchets sont en contact avec contrôle du pH, de la température et des temps de rétention. La réduction en polluants organiques est de l'ordre de 90 %. De nombreux réacteurs de ce type sont en fonction aux Etats-Unis, ils traitent les eaux de décharges, des eaux usées des papeteries, des industries agro-alimentaires et pétrochimiques.

Certaines bactéries ont besoin de méthane pour se développer. Les TCE (trichloroéthylènes), contaminent de nombreux puits où est puisé l'eau des réseaux urbains. 84 viennent d'être fermés en Nouvelle Angleterre en raison de la présence de ce contaminant, souvent associé à des dichloroéthylènes, chlorure de vinyle, chloroforme... toutes ces molécules d'origine industrielle sont stables et sont suspectées d'être

cancérigènes. Ces molécules sont adsorbées difficilement sur le carbone activé, et le nettoyage par l'air (air stripping) de plus en plus cher, est interdit dans certains Etats du fait des pollutions atmosphériques qu'il provoque. Les émissions de gaz doivent être captées et traitées par incinération, ce qui augmente le coût global de l'opération.

Le traitement de ces molécules par des bactéries anaérobies est possible, il a le désavantage d'être lent et d'entraîner la formation de chlorure de vinyle qui s'accumule et qui se décompose très lentement en éthylène.

Ces inconvénients sont évités par la méthode de CAA Bioremediation Systems (Boston, Massachusetts). Des bactéries aérobies dont la seule source de carbone est le méthane ont été sélectionnées. Ces bactéries minéralisent le trichloroéthylène en gaz carbonique et en biomasse. Elles ne peuvent pas détruire les composés aliphatiques halogénés sans le méthane. Ces bactéries consistent en un conglomerat d'espèces prélevées dans des sédiments d'un marécage à ajoncs de la région de Newton (Massachusetts).

Fournir du méthane n'est pas sans difficultés techniques dans le cas d'un traitement in-situ (11--4). CAA Bioremediation traite donc ces pollutions dans un réacteur, avec du méthane et de l'oxygène contrôlée car en raison de la nature du mélange des précautions doivent être prises pour éviter les explosions.

Le réacteur développé par cette compagnie est hermétiquement clos afin d'éviter les émissions de substances volatiles.

Les essais font apparaître que le trichloroéthylène et le cis-dichloroéthylène sont rapidement dégradés par le consortium de bactéries méthanotrophes, le méthane sert seulement de source de carbone. La dégradation du TCE est plus rapide lorsque la concentration en méthane est faible, par contre ce gaz n'a que peu d'effet sur la dégradation du cis-DCE (11--7).

### 3-1-2-2 Les problèmes liés à la toxicité

Les déchets industriels renferment souvent des substances toxiques pour les micro-organismes méthanogènes. Des techniques ont été développées pour mesurer la présence d'inhibiteurs dans les eaux polluées. L'ATA (Anaerobic Toxicity Assay) a été mis au point par Owen et est la méthode la plus utilisée pour déterminer la toxicité lors d'un traitement anaérobie. Elle permet de mesurer les effets d'une substance ou d'un mélange par le volume de méthane produit sur un substrat méthanogène (acétate et propionate) avec des cultures prélevées dans un réacteur (1--622). Cette méthode est facile mais longue. Beckman Instruments a développé un analyseur de toxicité le Microtox <sup>TM</sup> qui est commercialisé par

Microbics Corp. (Carlsbad, Californie). Le système est basé sur l'utilisation de *Photobacterium phosphoreum*, bactéries marines bioluminescentes, qui servent de "têtes chercheuses". Le principe du Microtox est simple, l'intensité de la bioluminescence diminue à mesure que la toxicité augmente. L'analyse peut être réalisée en deux heures. Les bactéries lyophilisées sont fournies par Microbics Corp. Ce système est maintenant très répandu dans la profession et sert de référence.

### 3-2 Traitement In-situ ou en réacteur (?)

La réponse à cette question ne peut être donnée qu'après avoir évalué les volumes, le type du déchet, les conditions ambiantes...

#### 3-2-1 In situ

Les sols contaminés renferment des organismes qu'il faut déterminer et dénombrer. Dès 1946 C.E. Zobell démontra que des bactéries dégradent des fractions de pétrole (12--49). Ainsi sur un sol renfermant du diesel, le Southwest Research Institute (SRI) a déterminé 5 espèces, alors qu'il n'en trouvait que 4 sur une décharge de déchets industriels et municipaux.

#### Microorganisms Extracted from in Situ Diesel Contaminated Soils and Cultured in the Laboratory

Colonies Count (Plate Count Agar) =  $1.2 \times 10^4$  cfu/mL

1. *Pseudomonas aeruginosa*
2. *Pseudomonas fluorescens*
3. *Pseudomonas putida*
4. *Acinetobacter calcoaceticus var. anitratus*
5. *Acinetobacter calcoaceticus var. lwoffii*

#### MICROORGANISMS OBTAINED FROM INDUSTRIAL AEROBIC ACTIVATED SLUDGE

Colonies Count (Plate Count Agar) =  $2.8 \times 10^4$  cfu/mL

1. *Pseudomonas aeruginosa*
2. *Pseudomonas pseudomallei*
3. *Pseudomonas fluorescens*
4. *Pseudomonas cepacia*

#### MICROORGANISMS OBTAINED FROM MUNICIPAL AEROBIC ACTIVATED SLUDGE

Colonies Count (Plate Count Agar) =  $1.1 \times 10^4$  cfu/mL

1. *Pseudomonas pseudomallei*
2. *Enterobacter cloacae*
3. *Aeromonas hydrophila*
4. *Acinetobacter calcoaceticus var. anitratus*

On parle dans le cas d'un traitement in-situ de biostimulation, qui consiste à "stimuler", les micro-organismes dans des conditions bien particulières :

- une contamination présente de longue date.
- des contaminants biodégradables.
- une concentration faible de contaminants (- de 100 000 ppm)
- pas d'urgence pour le traitement.
- une contamination de la nappe aquifère (12--48).

La biostimulation consiste simplement à ajuster le pH, ou à modifier les caractéristiques chimiques du sol en injectant des produits qui stimulent les micro-organismes, ou qui dissolvent les contaminants.

La biostimulation est opposée aux Etats-Unis à la bioaugmentation qui consiste à traiter :

- un site récemment contaminé par des composés difficilement biodégradables.
- une concentration de contaminants élevée.
- une présence importante de métaux lourds.
- une concentration inacceptable de l'agent contaminant.

Sur un site récemment contaminé, les micro-organismes capables de dégrader n'existent pas, en plus ils sont détruits par la décharge brutale et/ou par l'effet toxique. L' épandage de micro-organismes est nécessaire. Tous les spécialistes s'accordent à reconnaître qu'une dégradabilité au laboratoire ne se traduit pas nécessairement par une dégradabilité in-situ et réciproquement. Les vitesses de réaction sont différentes.

### **3-2-1-1 Les dégradations naturelles**

Les molécules organiques comme les plus stables peuvent se dégrader naturellement. Le PCB est dé-chloré naturellement par des bactéries. Le processus se déroule en deux temps. Après l'action de bactéries anaérobies qui détachent les atomes de chlore de la molécule, des bactéries aérobies achèvent le processus de dégradation du radical aromatique. Ce processus naturel découvert par des chercheurs de la Michigan State University donne des arguments à ceux qui pensent que la nature détruira elle-même les déchets toxiques abandonnés depuis de nombreuses années. Il suffira dans certaines conditions d'ajouter des

nutriments pour accélérer cette destruction. Cette procédure est actuellement envisagée pour traiter l'Hudson River qui a été contaminée entre 1940 et 1970 par General Electric. Les Dr. James C. Young (University of Kansas, Fayetteville) et Dr. Henry Tabak (EPA's Risk Reduction Engineering Lab, Cincinnati, Ohio) développent une banque de données qui permet aux chercheurs de travailler sur des organismes déterminés lorsqu'ils se trouvent en présence d'un agent contaminant. La plupart des composés organiques sur la liste de l'EPA sont biodégradables (7--371) (10--76-80).

Examples of Chemical Groups Degraded by Living Organisms

Substance	Organism	Reference <sup>1</sup>
Alkylbenzoates	<i>Pseudomonas putida</i>	27
Amino-naphthalene sulfonates	<i>Pseudomonas</i>	
Amino-e-triazines	<i>Rhodococcus</i>	
Aromatic sulfonates	<i>Pseudomonas (comamonas) testosteroni T-2</i>	29
Asphalt	<i>Pseudomonas</i>	9
Chlorinated aliphatic hydrocarbons (volatile)	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	
Chlorinated aromatic compounds	Organism NRRL B-18086	27, 34
Chlorinated dibenzo dioxins	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	14
Chlorinated guaiacols	<i>Rhodococcus chlorophenolicus</i>	1
Chlorinated phenolics	<i>Rhodococcus chlorophenolicus, Alcaligenes, Pseudomonas, Flavobacterium, Mycobacterium</i>	1, 2, 3, 35
Chlorinated syringols	<i>Rhodococcus chlorophenolicus</i>	1
Chlorobenzenes	<i>Pseudomonas putida, Pseudomonas alcaligenes</i>	35
Chlorophenoxyacetic acids - 4-chloro-, 2,4-dichloro-, 2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid	<i>Alcaligenes, Pseudomonas</i>	
Chromates	<i>Pseudomonas fluorescens, Pseudomonas dechromaticans, Pseudomonas chromatophila</i>	
Cresote	<i>Pseudomonas, Alcaligenes, Phanerochaete chrysosporium</i>	19, 25
Crop wastes	Engineered organism, unspecified <sup>2</sup>	10
Cyanides, stable iron-complexed	<i>Pseudomonas paucimobilis,</i>	
Dichloro-biphenyls	<i>Alcaligenes, Acinetobacter, Pseudomonas, Flavobacterium</i>	
Dioxins	<i>Phanerochaete chrysosporium, Pseudomonas stutzeri</i>	
Diterpine acids	<i>Mortierella isabellina</i>	
Fats & Oils	<i>Pseudomonas aeruginosa &amp; Bacillus</i>	17
Halogenated organics	<i>Pseudomonas cepacia, Pseudomonas putida, Pseudomonas aeruginosa</i>	12
Heavy metals	<i>Pseudomonas maltophilia, Cladosporium cladosporioides, Desulfovibrio, Desulfotomaculum, Thiobacillus ferrooxidans, Clostridium, Chlorella vulgaris</i>	37
Household septic tanks	Unidentified organisms	17
Hydrocarbons (gasoline, fuels)	<i>Bacillus subtilis</i>	18
Hydroxy-naphthalene sulfonates	<i>Pseudomonas</i>	
Inorganic ions	<i>Citrobacter freundii</i>	
Isoprenoids	<i>Pseudomonas putida</i>	
Liquid scintillation cocktails	<i>Pseudomonas NRRL B-18435</i>	
Methyl groups, compounds with mono-chlorobiphenyls	<i>Pseudomonas, Hyphomicrobia, Alcaligenes, Pseudomonas, Flavobacterium, Acinetobacter</i>	
Oil	<i>Pseudomonas putida</i>	
Organohalides	<i>Phanerochaete chrysosporium, Pseudomonas stutzeri</i>	
Oxydibenzene-nucleus chemicals	<i>Pseudomonas cepacia</i>	
Petroleum	<i>Bacillus subtilis</i>	18

Substance	Organism	Reference <sup>1</sup>
Anthraquinone	<i>Pseudomonas paucimobilis</i>	14, 25, 23
Benz(a)anthracene	<i>Beijerinckia</i>	20, 23
2,3-Benzo[b]fluorene	<i>Pseudomonas paucimobilis</i>	23
Biphenyls	<i>Pseudomonas paucimobilis</i>	36
Bromoacetate	<i>Pseudomonas, Moraxella, Hyphomicrobium</i>	
Butanoate	<i>Pseudomonas, Moraxella, Hyphomicrobium</i>	
Butyl alcohol (tertiary)	<i>Bacillus coagulans, Arthrobacter globiformis, Pseudomonas stutzeri</i>	
Carbofuran	<i>Achromobacter</i>	26
Chloroacetate	<i>Pseudomonas, Moraxella, Hyphomicrobium</i>	
Chloroaniline	<i>Pseudomonas</i>	35
Chlorobenzene	<i>Alcaligenes, uncharacterized strains</i>	35
3-Chlorobenzene	<i>Pseudomonas</i>	
4-Chlorobenzoate	<i>Acinetobacter</i>	35
2-Chlorobenzoic acid	<i>Pseudomonas</i>	35
3-Chlorobenzoic acid	Consortium, anaerobic, <i>Pseudomonas, Arthrobacter, Pseudomonas Strain B13</i>	12, 35
4-Chlorobenzoic acid	<i>Arthrobacter, Nocardia, Pseudomonas</i>	35
2-Chlorobiphenyl (PCB)	<i>Rhizopus arrhizus, Phanerochaete chrysosporium</i>	7, 14, 32
4-Chlorobiphenyl	<i>Alcaligenes AS, Pseudomonas</i>	3, 14
Chloroethane	<i>Pseudomonas, Moraxella, Hyphomicrobium</i>	
Chloroethanol	<i>Pseudomonas, Moraxella, Hyphomicrobium</i>	
Chloromethane	<i>Pseudomonas, Moraxella, Hyphomicrobium</i>	
2-Chlorophenol	Consortium, aerobic	1, 2, 35
3-Chlorophenol	<i>Nocardia</i>	1, 2, 35
4-Chlorophenol	Consortium, anaerobic, <i>Alcaligenes, Flavobacter, Pseudomonas</i>	4, 7
Chloropicrin	<i>Pseudomonas</i>	
Chlorosalicylate	<i>Pseudomonas, Bacillus</i>	
Chrysene	<i>Pseudomonas paucimobilis</i>	23, 25
Citronellol	<i>Pseudomonas putida</i>	
Coumaphos (pesticide)	<i>Flavobacterium</i>	26
Cyanide	<i>Thiobacillus plus nitrifying bacteria</i>	
Cyanuric acid	<i>Rhodococcus</i>	
Cyclohexane	<i>Pseudomonas putida</i>	16
Deethylsimazine (6-chloro-N-ethyl-1,3,5-triazine 2,4-diamine)	<i>Rhodococcus corallinus, Pseudomonas</i>	
Diazinon	<i>Biomass</i>	32
1,2-Dichlorobenzene	<i>Alcaligenes</i>	
2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D)	Consortium, anaerobic, <i>Pseudomonas, Azotobacter, Alcaligenes</i>	35
1,3-Dichlorobenzene	<i>Alcaligenes</i>	
1,4-Dichlorobenzene	<i>Micromonosporia, Pseudomonas, Acinetobacter</i>	
3,4-Dichlorobenzoic acid	<i>Pseudomonas</i>	
3,5-Dichlorobenzoic acid	<i>Micrococcus, Pseudomonas</i>	
2,4-Dichlorophenol	Consortium, anaerobic	

Substance	Organism	Reference <sup>1</sup>
3,4-Dichlorophenol	Consortium, aerobic	
3,5-Dichlorophenol	Consortium, anaerobic	
2,4-Dichloropropionate	<i>Pseudomonas putida</i> , other sp.	
2,6-Dichlorotoluene	<i>Pseudomonas</i>	
Fluorene	<i>Pseudomonas paucimobilis</i>	23
Fluoroacetate	<i>Pseudomonas</i> , <i>Moraxella</i> , <i>Hyphomicrobium</i>	
Fluoranthene	<i>Pseudomonas paucimobilis</i>	23, 25
Formaldehyde	Unspecified organism <sup>2</sup> , <i>Aureobasidium pullulans</i>	10
Geraniol	<i>Pseudomonas putida</i>	
Heptanol	<i>Pseudomonas putida</i>	16
Lead oxide	<i>Clostridium</i>	
Linalool	<i>Pseudomonas putida</i>	
Lindane	Biomass	32
Napthalene	<i>Pseudomonas paucimobilis</i>	23, 25
Nitroglycerin	Unspecified organism <sup>3</sup>	11
Malathion	Biomass	32
Melamine	<i>Achromobacter lacticum</i> , <i>Aerobacter aerogenes</i> , <i>Micrococcus albus</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Bacillus subtilis</i> ; <i>B. pasteurii</i> , <i>Brevibacterium</i> <i>roseum</i> , <i>Alcaligenes faecalis</i>	
Methyl alcohol	Unspecified organism <sup>2</sup> <i>Aureobasidium pullulans</i>	10
Molasses	Unspecified organism <sup>2</sup>	10
Parathion	<i>Pseudomonas diminuta</i>	20
Pentachlorophenol (PCP)	Consortium, anaerobic, <i>Arthrobacter</i> , <i>Flavobacter</i> , <i>Coryneform</i> , <i>Cladosporium</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Azotobacter vinelandii</i> , biomass	5, 6, 25, 32
Phenol	<i>Aureobasidium pullulans</i>	24, 25
Phenanthrene	<i>Pseudomonas paucimobilis</i>	23, 25
Polyethylene glycol	<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	30
Phosphorothiolate	<i>Bacillus cereus</i> T.	
Polychlorinated biphenyls (PCBs)	<i>Phanerochaete chrysosporium</i> , <i>Nocardia</i> , <i>Alcaligenes</i> <i>eutrophus</i> , <i>Pseudomonas putida</i>	20, 32
Polychlorophenol	<i>Rhodococcus</i> , <i>Mycobacterium</i>	
Polyethylene glycol	<i>Desulfovibrio desulfuricans</i> , <i>Bacteroidaceae</i>	30
Propionate	<i>Pseudomonas</i> , <i>Moraxella</i> , <i>Hyphomicrobium</i>	
Pyrene	<i>Pseudomonas paucimobilis</i>	23, 25
Radium	<i>Penicillium chrysogenum</i> , dead biomass	15
Styrene	<i>Pseudomonas</i>	13, 16
Sulfur, hydrogen sulfide	<i>Thiobacillus denitrificans</i>	
2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD)	<i>Trichoderma viride</i> , <i>Pseudomonas putida</i> , <i>Bacillus</i> <i>megaterium</i> , <i>Nocardiosis</i> , <i>Phanerochaete</i> <i>chrysosporium</i>	33
Toluene	<i>Pseudomonas putida</i> F1, <i>Pseudomonas</i> , <i>Bacterium</i> G4	13, 16, 21, 22, 24
p-Toluene sulphonic acid	<i>Pseudo (comamonas) testosteroni</i>	29



Substance	Organism	Reference <sup>1</sup>
Phenolic resin wastewater	<i>Arthrobacter</i> , <i>Azotobacter vinelandii</i>	
Phenolics	<i>Syntrophus buswellii</i> , <i>Desulfovibrio</i> , <i>Wolinella</i> <i>Succinogenes</i> , <i>Eubacterium</i> , <i>Eubacterium oxidoreducens</i> also <i>Pseudomonas putida</i> will degrade at temperatures as low as 4° C.	1, 25
Phosphorus compounds	<i>Arthrobacter globiformis</i> , <i>Arthrobacter simplex</i> , <i>Micrococcus luteus</i> ; <i>M. varians</i> , <i>Nocardia erythropolis</i> ; <i>N. restrictus</i> , <i>Cellulomonas uda</i> ; <i>C. biazotea</i> , <i>Oerskovia turbata</i> ; <i>O. xanthineolytica</i> , <i>Corynebacterium bovis</i> ; <i>C. aquaticum</i> , <i>Brevibacterium linens</i> ; <i>B. imperiale</i> , <i>Kurthia zopfii</i> , <i>Achromobacter lacticum</i> , <i>Aerobacter aerogenes</i> , <i>Flavobacterium heparinum</i>	
Polycyclic aromatic hydrocarbons	<i>Aeromonas</i> , <i>Alcaligenes</i> , <i>Beijerinckia</i> , <i>Cyanobacter</i> , <i>Flavobacterium</i> , <i>Micrococcus</i> <i>Mycobacterium</i> , <i>Nocardia</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Vibrio</i> , <i>Phanerochaete chrysosporium</i> , <i>Pseudomonas paucimobilis</i>	6, 14, 23, 25
Pulp & paper mill effluent	<i>Phanerochaete chrysosporium</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> (for decolorizing)	14
Solvents	<i>Pseudomonas capacia</i> , <i>P. putida</i>	16
Sulfate ions, inorganic	<i>Desulfovibrio desulfuricans</i> ; <i>D. orientis</i> , <i>Clostridium nigrificans</i>	
Sulfite liquor, spent	<i>Phialophora jeanselmei</i> , <i>P. richardsiae</i> , <i>Hyalodendron lignicola</i> , <i>Trichosporon infestans</i> , <i>Candida tropicalis</i>	
Surfactants, anionic & nonionic	<i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Bacillus</i>	
TNT waste	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	11, 14
Triazine herbicide derivatives	<i>Pseudomonas</i>	
Wood pulp chemicals		
Lignin	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	
Wood wastes	Engineered organism, unspecified <sup>2</sup>	8, 10
Wood-treating wastes	<i>Cladosporium</i>	8, 10

Note: If no species name is given, the organism is an unidentified species of that genus.

<sup>1</sup> See appendix A.6.

<sup>2</sup> Organism engineered and patented by V.R. Srinivasan, Louisiana State University. U.S. patent number 4,713,336 assigned to Research Corporation Technologies, Inc., of Tucson, Arizona. 1987.

Substance	Organism	Reference <sup>1</sup>
1,2,3-Trichlorobenzene	Consortium, aerobic	
1,2,4-Trichlorobenzene	Consortium, aerobic	
2,4,5-Trichlorophenoxyacetic acid (2,4,5-T)	Consortium, anaerobic, <i>Pseudomonas cepacia</i>	7, 12, 19, 35
1,1,1-Trichloro-2,2-bis (p-chlorophenol) ethane	<i>Klebsiella</i> , <i>Escherichia</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Aerobacter</i> , <i>Clostridium</i> , <i>Proteus</i> , <i>Pseudomonas cepacia</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Mucor</i> , <i>Cylindrotheca</i> , <i>Nocardia</i> , <i>Streptomyces</i>	
Trichloroethylene	<i>Pseudomonas cepacia</i> , <i>Bacterium G-4</i> (Tentatively identified as <i>Acinetobacter</i> ), <i>Pseudomonas putida</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonas mendocina</i> (recombinant)	19, 21, 22, 24, 28, 31
2,4,6-trinitrotoluene	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	11, 14
Xylene	<i>Pseudomonas</i>	13, 16
Xylenols	<i>Arthrobacter</i> , <i>Flavobacterium</i>	25

Note: If no species name is given, the organism is an unidentified species of that genus.

<sup>1</sup> See Appendix A.6.

<sup>2</sup> Unspecified organism patented (4,713,336) by V.R. Srinivasan, Louisiana State University. U.S. patent assigned to Research Corporation Technologies, Inc., Tucson, Arizona.

<sup>3</sup> Unspecified organism. Contact Dr. Pat Junkefer, Biochemist, Mail Stop C345, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545. (505)-665-2556.

Sur la plupart des sites du Superfund des organismes capables de dégrader les molécules toxiques ont été identifiés lorsque les conditions étaient optimales, c'est à dire en présence d'un pH, d'une température, d'une humidité adéquate. La dégradation est en général très lente.

Des chimistes américains travaillent sur des plastiques biodégradables par des bactéries. L'objectif est cette fois d'adapter le produit en prenant en compte son utilisation. Le problème est donc posé à l'envers. Le micro-organisme destructeur commande la composition chimique du produit qui sera fabriqué.

### 3-2-1-2 Le traitement des sols

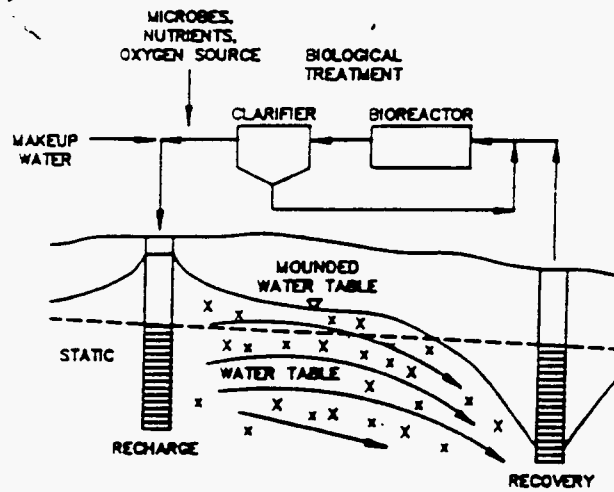
Lorsque des micro-organismes sont épanchés sur le sol contaminé ils se heurtent aux espèces indigènes beaucoup plus robustes, qui se sont développés durant des générations avec sélection naturelle. Dans la plupart des cas le sol retrouve très vite son biotope originel. Les conditions climatiques ou la composition chimique du sol ont raison des bactéries, levures, champignons étrangers. L'application à même le sol n'a que peu d'effets si elle n'est pas accompagnée d'un mélange mécanique. Il faut avoir recours à des puits d'injection ou à des galeries permettant l'infiltration. L'objectif est donc de modifier le milieu afin de créer des conditions optimales pour la prolifération des nouveaux organismes.

Le traitement in-situ nécessite l'introduction de nutriments, en particulier des nitrates et des peroxydes. La dynamique de l'environnement et la composition du sol rendent incertaines les prédictions quant au résultat de ce traitement biologique. Grâce aux observations et aux données accumulées ces dernières années on peut cependant prévoir la capacité de dégradation et la cinétique en fonction des organismes découverts sur le site. Afin de contrôler et d'optimiser la dégradation il est nécessaire d'avoir une connaissance précise de la composition du sol et des besoins de chaque micro-organisme (écologie, physiologie, génétique, chimie, hydrogéologie). Bien souvent la texture des sols s'oppose à toute intervention rapide. L'argile, par exemple, est difficile à traiter, le contaminant ne peut pas être atteint par les bactéries. (7--326).

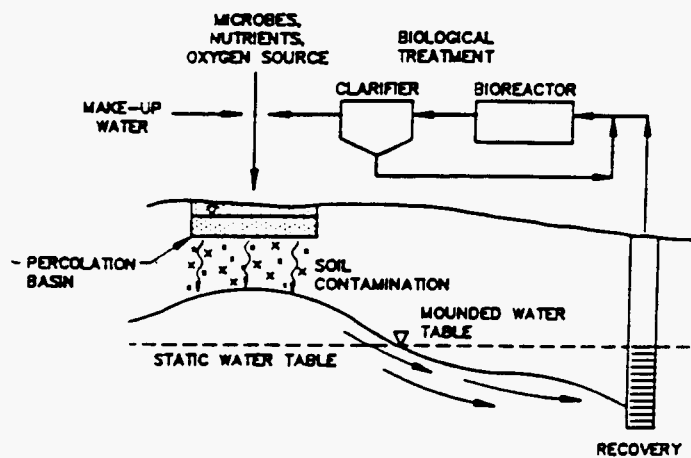
Une technique simple, peut-être utilisée pour traiter des sols sans excavation préalable en injectant directement des nutriments et de l'oxygène. La dégradation est en général longue, elle est cependant utilisée pour les sols et les eaux contaminés situés sous des infrastructures comme les bâtiments, les routes. Des fluctuations de la température, et de l'humidité peuvent réduire la vitesse de dégradation ou tuer les

micro-organismes. Malgré ces inconvénients, des volumes importants de sols contaminés par une ou plusieurs substances dangereuses peuvent aussi être traités de cette façon.

IN SITU BIORECLAMATION USING RECHARGE WELLS OR TRENCHES



B. IN SITU BIORECLAMATION USING INFILTRATION

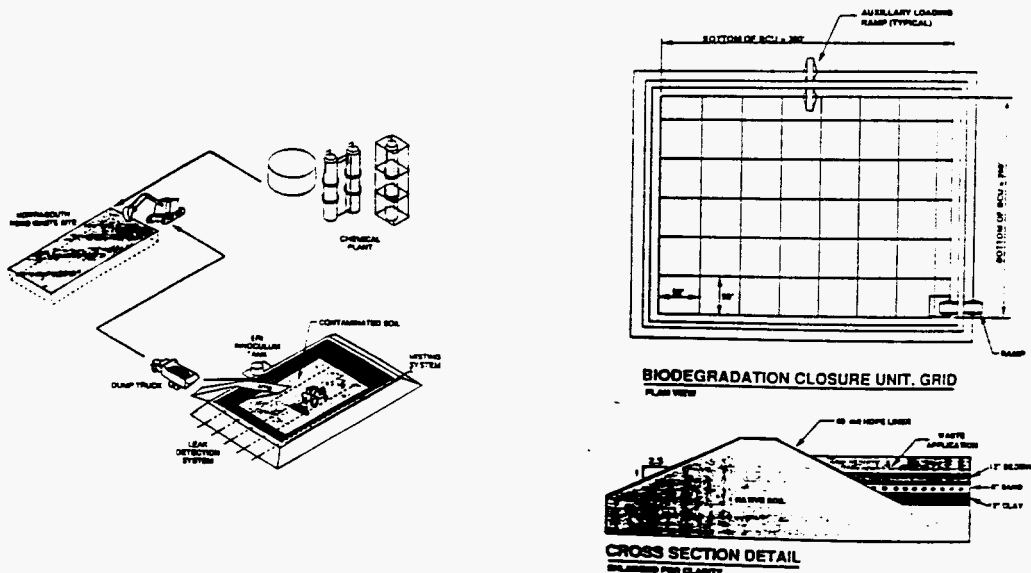


Dans ce cas, le traitement va de pair avec l'emploi d' un bioréacteur de surface pour décontaminer les eaux qui sont pompées et qui seront ensuite ré-injectées. L'objectif est de stimuler l'activité des micro-organismes. Un niveau élevé de la nappe phréatique accroît la circulation de l'eau et des micro-organismes. Les volumes traités peuvent être importants.

Cytoculture International Inc. (Point Richmond, California) traite les déchets en injectant dans le sol contaminé par du diesel des solutions nutritives contenant des bactéries (13--96). Lors de la Conférence Superfund 1990, il a été noté que ce traitement était une technique de plus en plus répandue pour les hydrocarbures qui polluent le voisinage des raffineries. Le facteur temps n'est guère important, un traitement peut durer plusieurs mois voir plusieurs années.

Le traitement biologique in-situ est aussi la seule alternative lorsque l'agent contaminant est très profond ou lorsqu' il se trouve sous une excavation sans possibilité de creuser. Les géologues et hydrogéologues doivent déterminer les points d'injection, les volumes injectés, et prévoir la durée du traitement (7--371).

### 3-2-1-3 Le site de Plaquemine (Louisiane)



30 000 m<sup>3</sup> de terre sont contaminés à Plaquemine (Louisiane). 8 molécules ont des concentrations qui dépassent les normes permises par l'EPA.

Constituents of the RCRA Chemical Contamination

Chemical	Range of Contaminant Concentration mg/kg	Post Closure Care Levels, mg/kg
Phenol	10-3600	<10
Cumene	<1-48	< 1
Acetophenone	<1-212	< 1
Benzene	<1-16	<0.5
Benzyl Alcohol	<1-150	< 1
Tars	500-2500	<100 <sup>1</sup>
Vinyl Chloride	<1-6.5	<0.5
Styrene	25-100	< 1

<sup>1</sup>As measured by Total Petroleum Hydrocarbons Method 418.1

7 --362

Une essai s'est déroulé durant 5 mois sur 20 m<sup>3</sup>, avant le traitement. Une excavation recouverte d'un film de HDPE et d'un système de détection de fuite a été réalisée. L'aération fut maintenue d'une part par retournement du sol tous les huit jours et d'autre part par un arrosage lorsque l'humidité s'avérait trop faible pour permettre le développement des micro-organismes. Durant le traitement les émissions dans l'atmosphère furent analysées. Les contaminants se trouvaient en deçà des normes permises.

Les bactéries furent répandues. L'évolution des concentrations de phénol permit de connaître la vitesse de dégradation. De 28 à 71 jours furent nécessaires pour obtenir moins de 1,0 mg/kg.

Les micro-organismes furent régulièrement analysés. Au bout de 8 jours la concentration de ces micro-organismes était réduite de moitié. Une culture commerciale (Micro Pro " Cee") fut ensuite ajoutée pour dégrader les substances toxiques.

Microbial Activity  
Estimated Organisms Soil Bioremediation (Lift One)

Day	Microbes/gram Soil (Mean Values)
0	2.4 x 10 <sup>3</sup>
8	1.3 x 10 <sup>3</sup>
15	5.0 x 10 <sup>6</sup>
36	4.0 x 10 <sup>6</sup>
43	4.9 x 10 <sup>6</sup>
57	6.3 x 10 <sup>6</sup>
64	5.6 x 10 <sup>6</sup>

7--364

Après 205 jours la concentration des contaminants étant inférieure au maximum autorisé par l'EPA, le site fut déclaré propre.

### **3-2-2 En réacteur : les différentes configurations**

Cette méthode est la seule possible lorsque les polluants sont trop concentrés ou lorsque les micro-organismes ne peuvent pas se développer dans des conditions normales. Une trop basse température durant une longue période de l'année ou durant la nuit est un frein au développement des cellules.

Les bioréacteurs permettent de maintenir des conditions optimales constantes car les différents paramètres pour le développement des micro-organismes peuvent être plus facilement contrôlés. Lors d'un traitement in-situ il est impossible de contrôler la température, le pH, et de s'assurer que le micro-organisme va être en contact avec la substance polluante. Un mélangeur et un agitateur sont souvent nécessaires, d'où l'intérêt du bioréacteur.

Les organismes sélectionnés demandent en général un environnement bien défini. Les cultures sont en suspension ou fixées sur un milieu solide, une technique similaire est utilisée en pharmacie ou en agro-alimentaire. Le traitement peut être aérobic, anaérobic ou alterné : phase anaérobic, puis phase aérobic. L'immobilisation des organismes dans un réacteur permet d'obtenir des résultats supérieurs à ceux obtenus dans la nature. Ron Unterman travaillant sur des micro-organismes dégradant le PCB a obtenu en réacteur une dégradation de 50 % en 2 jours alors que dans la nature il n'obtenait que 20 % en 130 jours.

La dégradation aérobic du sol ou de boues contaminées se fait en général dans des bioréacteurs mobiles installés temporairement sur le lieu de la pollution. Le mélange aqueux est agité mécaniquement pour maintenir l'homogénéité et des conditions de développement constantes. Des nutriments organiques ou inorganiques, de l'oxygène, des acides, des alcalis sont incorporés en fonction de l'analyse préalable. Des micro-organismes peuvent être ajoutés dès le début pour ensemercer les déchets ou être épanchés de façon intermittente pour maintenir une concentration correcte en biomasse. Lorsque le traitement est terminé, l'eau et l'air peuvent être lâchés à l'extérieur ou nécessiter un traitement dans des rejets malodorants.

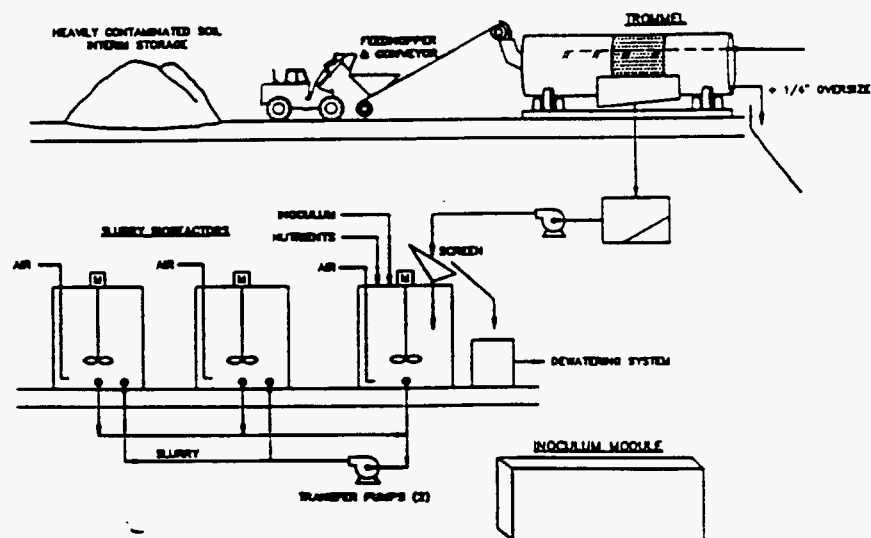
Les américains parlent aujourd'hui d' "ecoengineering ", science nouvelle qui d'après le Dr. Leslie Grady de l' Environmental Systems

Engineering de Clemson University offre de "belles perspectives" (6--81). L'objectif du traitement est de favoriser le développement de bactéries qui dégradent le produit cible, en empêchant la prolifération des bactéries filamenteuses qui bloquent la sédimentation et la dégradation. Le développement de ces dernières est réduit lorsque le substrat est maintenu dans un état homogène par agitation. Dans le cas d'un mélange hétérogène les bactéries filamenteuses vont essentiellement se développer dans des zones non agitées. Il faut donc construire le réacteur pour optimiser la réaction désirée.

Les avantages d'un bioréacteur par rapport à un traitement *in situ* sont :

- le contrôle de la réaction et de sa conduite.
- l'accroissement des contacts entre les micro-organismes et les contaminants.
- l'utilisation de l'inoculum souhaité sans problème de dominance par des souches qui n'ont aucun rôle dans le processus.
- la limitation du temps d'acclimatation et l'accroissement de la vitesse de la biodégradation.

Le bioréacteur nécessite l'excavation du sol, la manipulation des matériaux contaminés ce qui, dans certains cas, n'est pas souhaitable, pas économique ou dangereux. Le sol contaminé est mélangé avec de l'eau et traité dans des réacteurs mobiles. Le sol traité est débarrassé de son eau, cette eau peut soit être recyclée soit entrer dans un autre cycle de traitement.





Dans tous les cas la première étape consiste à mélanger le sol avec l'eau, et à enlever les cailloux par tamisage.

Le coût de traitement en réacteur est élevé mais inférieur à celui de l'incinération. Son prix se situe entre 20 et 75 dollars le m<sup>3</sup>.

Une autre contrainte, comme dans le cas du traitement in-situ, est bien entendu le taux de destruction obtenu qui n'atteint que très rarement 100%.

### **3-2-2-1 L'approche de l'Université de Washington (Seattle-WA)**

Un certain nombre de configurations de réacteurs existent. Le choix est fonction du déchet à traiter et de l'environnement.

Deux grands types de réacteur ont été mis au point :

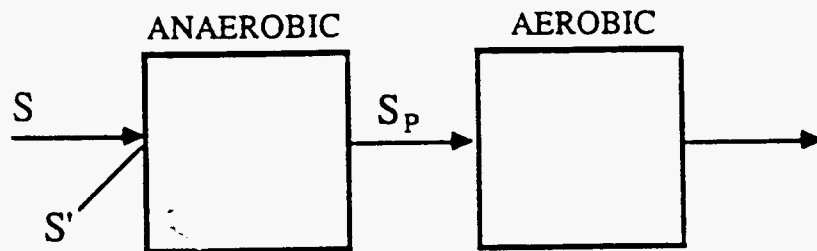
- les réacteurs avec organismes en suspension (suspended growth reactor).

- les réacteurs avec les organismes fixés (fixed film reactor).

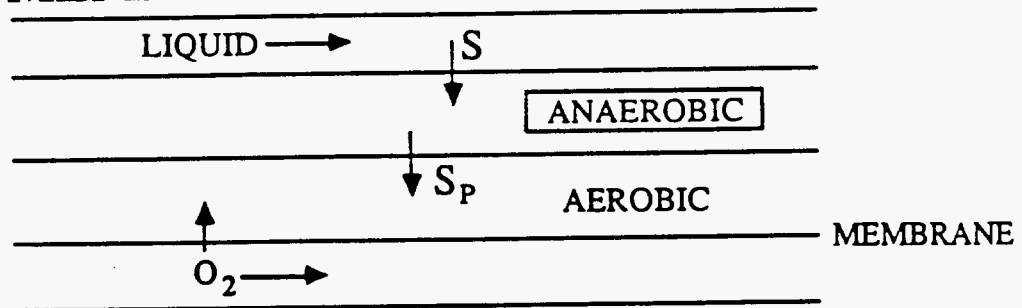
Dans les deux cas il est nécessaire de prendre en compte un certain nombre de considérations spécifiques qui ne sont pas examinées lorsque l'on a à faire à des déchets domestiques :

- la concentration des effluents.
- la sélection des organismes.
- la masse optimum des organismes.
- le co-métabolisme.
- la toxicité.
- l'adsorption.
- la volatilité.

L'utilisation de séquences anaérobie- aérobie est un concept qui est dans certains cas la meilleure technique.



## MEMBRANE REACTORS

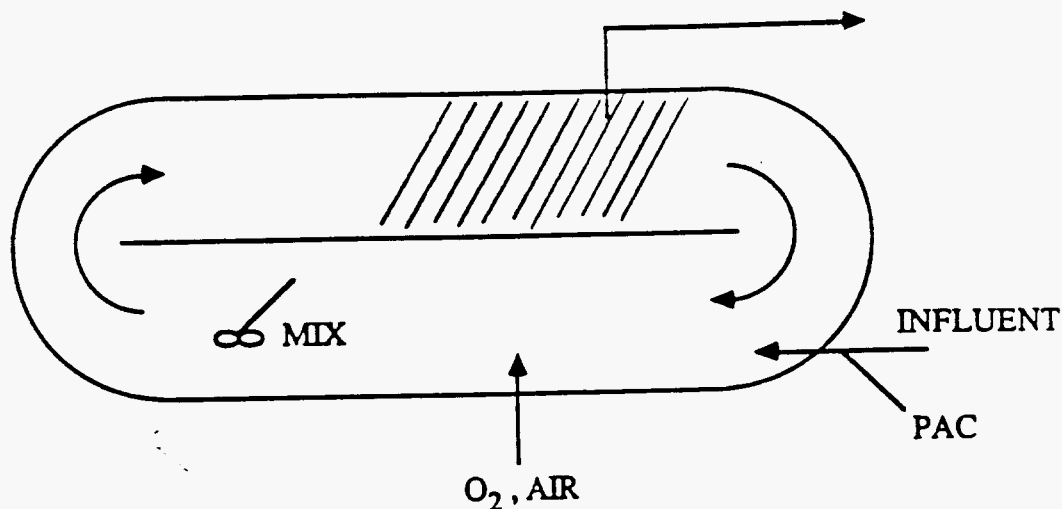


6--58

Lorsque les substances toxiques sont très volatiles, il est nécessaire de collecter les gaz et d'adjoindre une unité de traitement. On peut aussi les adsorber sur du carbone activé.

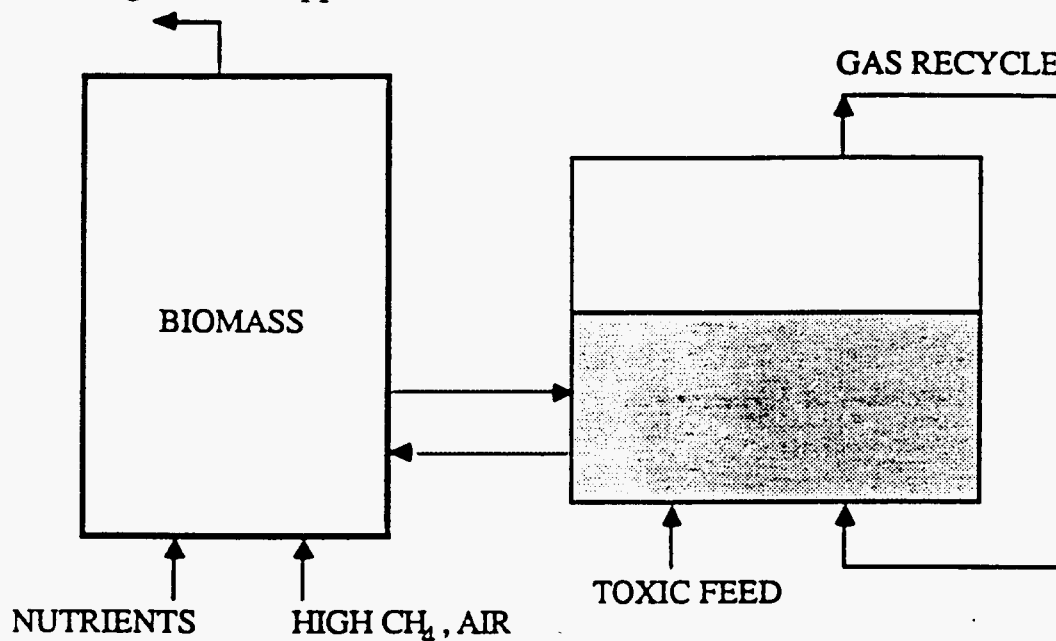
Pour minimiser la volatilité, le gaz peut aussi être capté et ré-injecté. Cette technique oblige à maintenir un stricte contrôle des pressions des différents gaz, en particulier de l'oxygène si l'on a affaire à une dégradation aérobie.

D'après le Professeur David Stensel de l'University of Washington les " Sequence Batch Reactors " (SBR), avec traitement en séquence dans une seule cuve de réacteur, est le plus avantageux. Un microprocesseur permet de contrôler le système et d'offrir une grande flexibilité. Du charbon activé (powdered activated carbon = PAC) peut aussi être ajouté pour absorber les substances toxiques et protéger la culture de bactéries. United Industries Inc (Baton Rouge, Louisiana) a développé ce système.



6--59

Un réacteur avec recyclage des gaz permet de traiter les déchets par des bactéries méthanotrophes, en limitant les rejets gazeux. Un "enrichment reactor" peut être utilisé pour produire de grandes quantités de bactéries, grâce à l'apport de nutriments, de méthane et d'air.



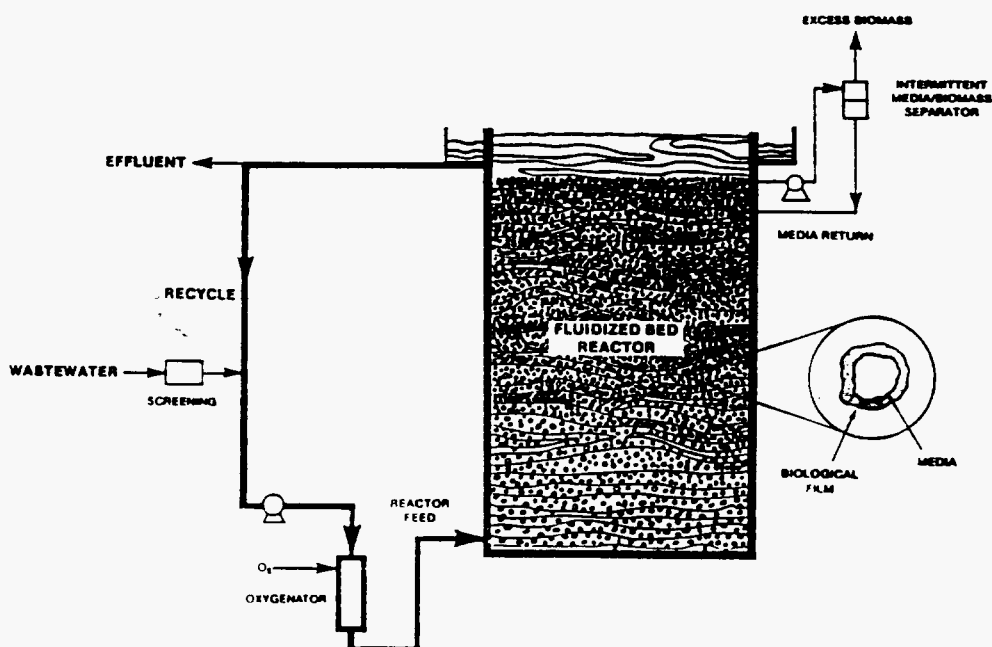
"ENRICHMENT REACTOR"

BATCH TREATMENT

6--62

De nombreux types de bioréacteurs existent. Celui avec des organismes fixés sur un film (fixed film biological treatment) est le plus simple et présente le double avantage : il est compact et permet de contrôler la biomasse.

### 3-2-2-2 L' OXITRON d' Air Products and Chemicals Inc. : le lit fluidisé



6--234

Le système OXITRON est basé sur la technique des lits fluidisés biologiques (fluidized-bed biological process) avec comme milieu (équivalent du fluide) du sable et du charbon activé. Les microbes sont immobilisés sur un film. Le liquide contaminé est injecté par la base, les particules sont en suspension lorsqu'elles équilibrent la gravité. Les particules fournissent une grande surface de réaction, 5 à 10 fois celle d'un bioréacteur conventionnel. Le carbone activé permet d'associer dans le système les mécanismes du biotraitement et l'adsorption physico-chimique (6--221).

Ce système est développé et commercialisé pour des applications aérobies et anaérobies, OXITRON et ANITRON, pour traiter des déchets en phase liquide, déchets d'origine urbaine et industrielle contenant des toxiques organiques et inorganiques. Dans certaines conditions lorsqu'un excès de biomasse apparaît il est nécessaire de contrôler le développement.

Ce bioréacteur est efficace pour le traitement des eaux contenant des substances organiques (source de carbone) qui permettent la croissance des organismes. Dans le cas de solutions riches en pétrole, graisses ou métaux lourds un pré-traitement est nécessaire ainsi qu'un "post-treatment" (traitement ultérieur) comme la filtration ou l'adsorption sur du carbone.

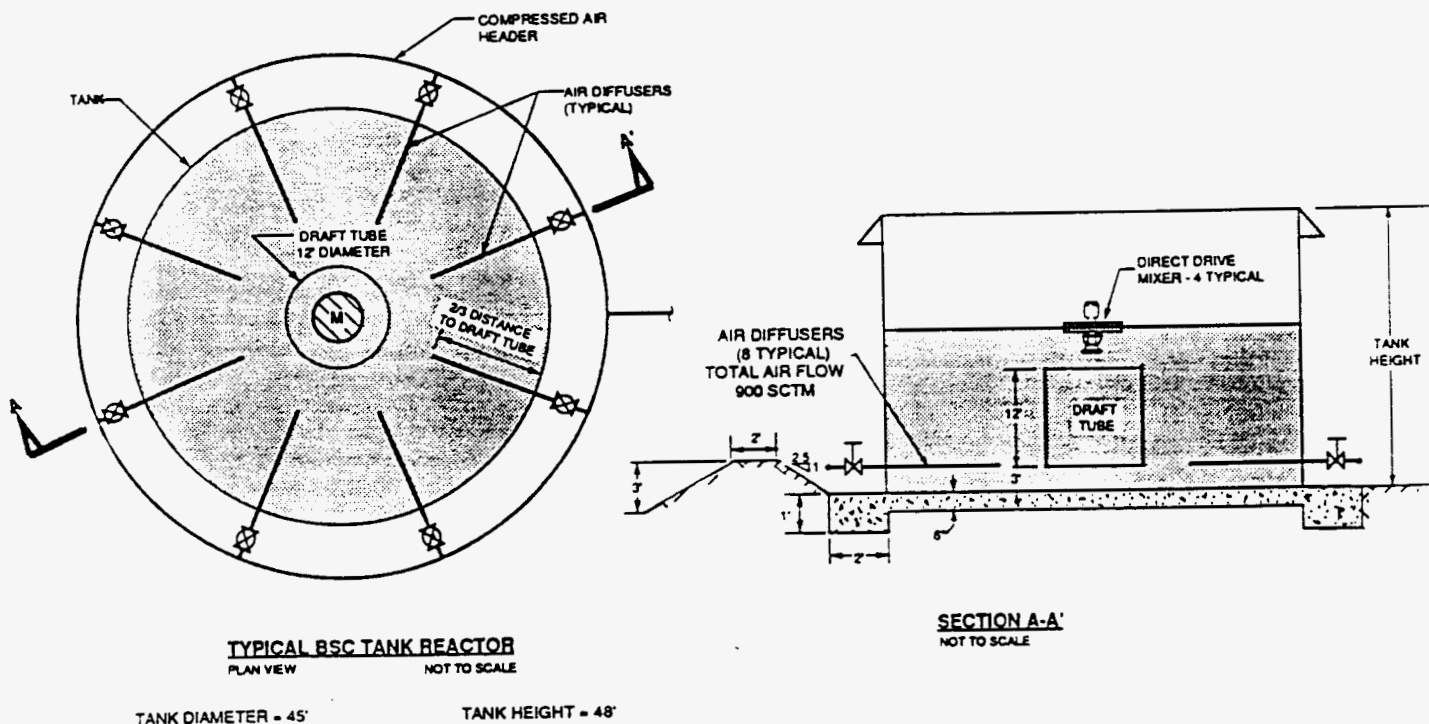
Le réacteur à lit fluidisé offre le mérite de réduire le temps de rétention des déchets. Par ailleurs le charbon offre par rapport au sable

l'avantage de pouvoir être utilisé pour traiter des substances "récalcitrantes" dont la dégradation est plus difficile.

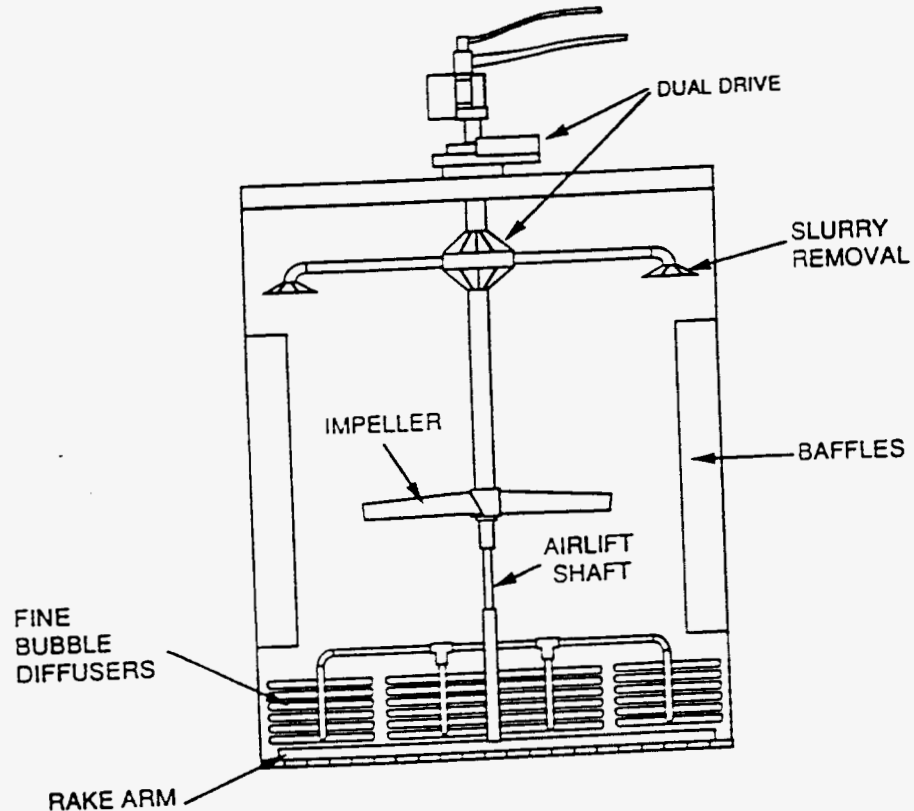
### 3-2-2-3 Le réacteur d'EIMCO Process Equipment Co.

Ce réacteur est basé sur une technique utilisée pour traiter les minerais et extraire en particulier le cuivre. Il permet d'aérer, de mélanger, de contrôler la température et les nutriments et de réduire les émissions de substances volatiles (7--371). Le traitement peut se dérouler dans un volume de 30-50% d'eau, mais il est préférable de ne pas dépasser 10-20%.

A partir du réacteur classique (Typical BSC Tank Reactor), EIMCO a développé un appareil de seconde génération.



Typical BSC Tank Reactor



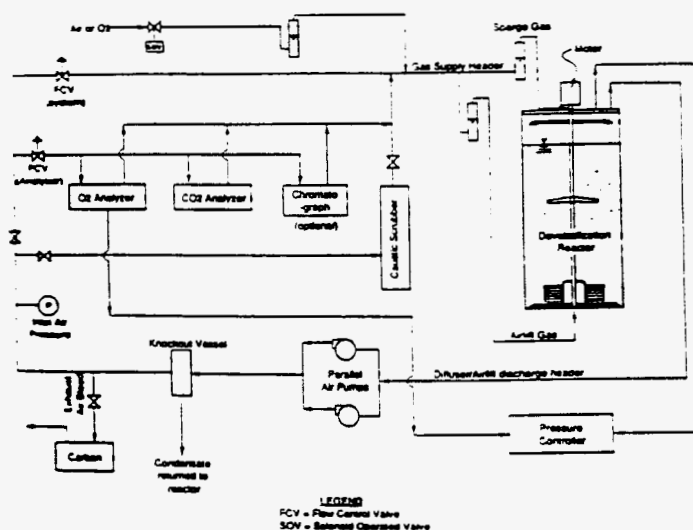
EIMCO Biolift Reactor

7--372

L'originalité du nouveau réacteur est d'avoir des pales (impeller) qui tournent à 20-30 tours/ minute et un râtelier (rake arm) à la base qui tourne à contresens à 2 tours/ minute. La turbulence entraînée par les bulles d'air maintient les particules en suspension. Cette technique permet d'homogénéiser continuellement le contenu du réacteur et de réduire, en certains points, les concentrations de substances toxiques qui inhibent le développement des bactéries, difficultés que l'on rencontre dans des réacteurs classiques.

Un système de contrôle des substances solides permet de vérifier la sédimentation. Les réacteurs peuvent être montés en série avec un pré-traitement pour éliminer les matériaux trop volumineux et pour apporter les nutriments.

Il faut contrôler les émissions volatiles car elles peuvent dépasser les normes permises par l'EPA. Le gaz récupéré en haut du réacteur est recyclé avec analyse en continu du  $\text{CO}_2$ , de l' $\text{O}_2$ . Un chromatographe (en option) permet de déterminer la nature des rejets.



7--373

Le réacteur EIMCO Biolift est utilisé aussi pour traiter de fortes concentrations d'hydrocarbures. Il permet d'en obtenir la réduction partielle. Le coût du traitement est évalué à 15 dollars/m<sup>3</sup>, soit 4 fois moins que le bioréacteur classique. Cette économie est due à la faible consommation d'énergie de cet appareil (7--373).

### 3-3 Le choix : micro-organismes, végétaux ou enzymes

Les micro-organismes capables de dégrader les déchets dangereux sont les bactéries, les algues, les champignons. On connaît mieux les bactéries que les deux autres embranchements. Dans des conditions optimales, le métabolisme des bactéries est rapide, elles peuvent aussi survivre dans des conditions difficiles. Même les zones les plus contaminées renferment des bactéries, dans la mesure où elles trouvent une source de carbone pour assurer leur métabolisme. D'une façon générale l'objectif du spécialiste du biotraitement doit être d'optimiser l'activité en créant un milieu favorable. Il joue aussi sur la diversité des micro-organismes, leur mutabilité et leur adaptabilité afin de mieux "les acclimater au milieu".

La diversité des micro-organismes ce sont les milliers de genres et d'espèces qui existent dans la nature. En général un produit qui est considéré comme non biodégradable peut se dégrader. Les tentatives pour trouver l'organisme capable de le décomposer n'ont pas été trouvées ou conduites au maximum de leurs possibilités. Un travail de sélection préalable est indispensable avant toute tentative de traitement. Les

molécules organiques les plus stables sont une source de carbone, encore faut-il être capable de découvrir l'organisme susceptible de provoquer la minéralisation

ORGANIC COMPOUNDS COMMONLY FOUND IN  
PETROLEUM OILY SLUDGES AND CONSIDERED TO BE  
BIODEGRADABLE BY PURE OR MIXED CULTURES

acenaphthalene  
aniline  
anthracene  
benz(a)anthracene  
benzene  
cresols  
phthalates  
naphthalene  
phenanthrene  
toluene  
xylenes  
phenol  
dimethylphenol

6--41

Peu de micro-organismes sont capables de dégrader plus de deux ou trois molécules organiques différentes. Cependant en raison de leur vitesse de reproduction ils peuvent s'adapter plus ou moins rapidement lors de l'apparition d'une nouvelle substance qu'elle soit toxique ou non. Cette dernière peut néanmoins tuer la grande majorité des micro-organismes. Ceux qui sont résistants survivent et de génération en génération produisent une descendance de mieux en mieux adaptée au produit à dégrader. C'est le processus de sélection naturelle.

Lorsque le déchet est un mélange, un biotope complexe de bactéries d'espèces différentes est nécessaire. Cependant quelques organismes ont un large spectre pour dégrader des molécules de familles voisines, cette capacité dépend du génome, des enzymes produites et surtout de leur séquence de formation.



METABOLIC CAPABILITIES OF ISOLATED SOIL  
BACTERIA ON VARIOUS CHLORINATED BENZOATES.

Compound	Bacterial strain designation			
	Genk 3.2	HPL 2.1	HPL 2.3	Genk
2-mcB	-	-	-	-
3-mcB	+	-	-	-
4-mcB	+	-	+	+
2,4-mcB	-	-	-	-
2,5-dcB	-	+	-	-
2,6-dcB	-	+	-	-
3,4-dcB	-	-	-	-
3,5-dcB	-	-	-	+
Benzoic	+	+	+	+
Phénol	-	-	-	-

---

Note: - means no visible growth on minimal medium with the compound as sole carbon source.

+ means visible growth on minimal medium plates with the compound as sole carbon source.

6--42

Si un déchet n'est pas dégradé malgré la présence de nombreuses espèces de micro-organismes, il est nécessaire de trouver le gène manquant. Les bactéries, micro-organismes procaryotes ne possèdent qu'une copie de chaque gène ce qui permet, à la différence des eucaryotes, de les sélectionner beaucoup plus rapidement.

Chaque mutation s'exprime sans que l'on ait à faire face aux problèmes de dominance et de récessivité (6--37).

### 3-3-1 Le " feast-famine " de l'University of Notre-Dame

La diversité est l'aboutissement de mutations et de sélections naturelles. L'organisme qui peut dégrader un substrat a un avantage par rapport aux autres.

La technique mise au point par l' Université de Notre-Dame est destinée à la dégradation des benzoates chlorés dans des eaux de lixiviation de déchets industriels. L'inoculum provient d'une décharge urbaine où des rejets de chlore furent détectés, 2-mcB, 3-mcB, 4-mcB et 2,5-dcB. Après des tests il s'avéra que les bactéries ne dégradaient, après plusieurs jours, que le (2,5-dcB) et le (2-mcB). La population de bactéries pouvant déduire les (3-mcB) ou (4-mcB) était peu importante ou inexistante.

Un réacteur qui contenait les 4 benzoates chlorés ainsi que du benzoate et du phénol fut inoculé. Ces deux dernier substrats sont dégradables rapidement par les bactéries et permettent leur croissance rapide (phase de multiplication). C'est la fête " feast" qui fait suite à une période de famine "famin" d'ou le nom de " feast-famin technic ".

Après la première phase de dégradation des benzoates et du phénol, les bactéries qui se sont multipliées doivent survivre sur les 4 benzoates chlorés. Elles sont présentes en nombre suffisant pour que des bactéries mutantes apparaissent sans qu'il soit nécessaire d' induire les mutations par l'action d'un produit chimique (acide nitreux, 5 bromo-uracile, acridines...) ou par irradiation (rayons X ou gamma). La technique consiste à jouer sur ces mutations naturelles qui se produisent au sein d'une culture. Il faut garder à l'esprit le fait que l'on travaille sur des populations approchant  $10^6$  cellules par gramme et que l'on estime que dans une bactérie le taux de mutation d'un gène donné est estimé entre  $10^{-5}$  et  $10^{-7}$ , soit une mutation (erreur) sur un million de copies. En d'autre terme il existe dans chaque gramme un gène muté par chaque caractère de la bactérie. Sachant que la bactérie contient environ 4000 gènes, statistiquement le gène considéré est muté si l'on prend 4 kilogrammes de sol. Les 4 benzoates chlorés sont alors dégradés.

### 3-3-2 Les micro-organismes

Jusqu'au début des années 80, on ne travaillait que sur des cellules vivantes naturelles. Les techniques d'irradiations permettaient de provoquer des mutations, mais aucun contrôle ne pouvait être effectué. Depuis moins de dix ans, deux découvertes issues de la recherche fondamentale en biologie ont profondément élargi son champ d'applications et suscité de grands espoirs.

La possibilité de greffer des gènes d'une cellule sur une autre espèce différente transgresse une des lois fondamentales de la nature qui ne permet que des échanges génétiques au sein d'une même espèce.

La possibilité de fusionner deux cellules d'origine différente pour former une chimère transgresse une deuxième loi de la nature en pérennisant des cellules vivantes nouvellement créées.

#### 3-3-2-1 Les micro-organismes naturels

Les micro-organismes sont considéré comme de précieux aides pour transformer des produits chimiques toxiques en molécules qui le sont moins. En général la dégradation est réalisée par "un consortium", dont l'existence induit une réaction en chaîne jusqu'à la production finale de  $CO_2$

et d'H<sub>2</sub>O. En plus des bactéries, des champignons, des levures, des organes souterrains des plantes supérieures peuvent dégrader les molécules.

Comme nous l'avons déjà signalé certains micro-organismes ne dégradent qu'une famille de molécules, d'autres ont un spectre d'intervention beaucoup plus large. Il a été montré que de nombreux organismes sont capables de passer d'une source de carbone à une autre en fonction des concentrations existantes dans le milieu. En général les bactéries ne détruisent pas en dessous d'une concentration de quelques ppb, ce qui peut être insuffisant pour certains agents toxiques comme la dioxine (l'EPA recommande pour la dioxine une concentration maximum de 0,013 ppq dans les rejets) (12--48).

### 3-3-2-1-1 Les bactéries

Certaines sont aérobies, d'autres anaérobies et quelques unes anaérobies facultatives. Pour dégrader les substances toxiques les bactéries doivent produire des enzymes. Elles doivent aussi s'adapter au nouveau substrat. Le PCB que l'on trouve à New York au fond de l'Hudson River est dégradé naturellement alors que l'on pensait, jusqu'au milieu des années 80, que l'on était en face d'une pollution stable.

Dans un environnement hautement concentré en substances toxiques les organismes qui acquièrent la capacité de dégradation ont un avantage par rapport aux autres lorsqu'ils se trouvent en face d'une substance toxique, qui peut empêcher ou freiner leur vitesse de division. La dégradation intervient sans intervention humaine. Elle peut être lente. L'objectif dans ce cas est d'accélérer le processus naturel. En laboratoire la sélection peut se faire en prélevant un échantillon sur le site et en l'exposant à des concentrations de plus en plus élevées de la molécule que l'on cherche à dégrader. Le site est ensuiteensemencé avec la souche cultivée en laboratoire.

Il faut plusieurs enzymes pour dégrader une molécule. Les gènes codant pour ces protéines se trouvent bien souvent sur des plasmides ce qui explique que certaines d'entre elles acquièrent de nouveaux caractères lors de l'échange naturel d'informations génétiques entre bactéries.

Le Docteur Ananda Chakrabarty de l'Université de l'Illinois à Chicago a ainsi trouvé qu'il fallait de 8 à 10 enzymes pour dégrader les chlorobenzènes. Les bactéries effectuent donc des réactions en chaîne.

### 3-3-2-1-2 Les champignons

Les bactéries ne sont pas les seuls organismes pouvant dégrader les substances toxiques.

Les champignons dégradent la cellulose, décolorent certains effluents, et peuvent, par exemple, concentrer le sélénium des eaux contaminées. Un champignon *Phanerochaete chrysosporium* isolé en URSS sur des ceps de vigne par Mr. Kent Kirk du Forest Products Laboratory (Madison, Wisconsin), décompose la lignine, mais aussi des hydrocarbures aromatiques, des composés chlorés... La technique consiste à multiplier le champignon sur des morceaux de bois puis à les enterrer dans le sol en les retournant. Une équipe de la North Carolina State University travaille sur ce même procédé appliqué aux rejets de l'industrie du papier.

La dégradation dans des réacteurs par *Phanerochaete chrysosporium* est rapide et totale (15--18).

Le Biotechnology Center de l'Utah State University (Logan, Utah), travaille aussi sur ce champignon en raison de ses capacités à minéraliser des agents polluants récalcitrants grâce aux ligninases produites dans le cytoplasme des cellules. Ce champignon n'a pas un éventail d'application illimité, il est comme de nombreux autres organismes, fortement sélectif. Par exemple l'action sur le chlordane et l'heptachlore (qui diffèrent par la présence d'un chlore en C-2 et d'une double liaison entre C-2 et C-3) est bien différente. Le chlordane est complètement décomposé alors que la minéralisation de l'heptachlore est impossible par ce champignon (6--363).

Organic compounds degraded by *P. chrysosporium*.<sup>a</sup>

Polycyclic aromatic compounds	Chlorinated alkyhalides
Benzo[a]pyrene	Lindane
Biphenyl	Chlordane
2-methylnaphthalene	
Phenanthrene	Biopolymers
Benzo[a]anthracene	Lignin
Pyrene	Cellulose
Anthracene	Kraft lignin
Perylene	3-chloroaniline-lignin conjugate
Dibenzo[p]dioxin	3,4-dichloroaniline-lignin conjugate
Chlorinated aromatic compounds	Triphenylmethane dyes
4-chlorobenzoic acid	Crystal violet
Dichlorobenzoic acid	Pararosaniline
2,4,6-trichlorobenzoic acid	Cresol red
4,5-dichloroguaiacol	Bromphenol blue
6-chlorovanillin	Ethyl violet
4,5,6-trichloroguaiacol	Malachite green
Tetrachloroguaiacol	Brilliant green
Pentachlorophenol	
3-chloroaniline	
3,4-dichloroaniline	
2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid	
Polycyclic chlorinated aromatic compounds	
DOT (1,1,1-trichloro-2,2-bis(4-chlorophenyl)ethane	
2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	
3,4,3',4'-tetrachlorobiphenyl	
2,4,5,2',4',5'-hexachlorobiphenyl	
Aroclor 1254	
Aroclor 1242	
2-chlorodibenzo[p]dioxin	
Dicofol (2,2,2-trichloro-1,1-bis(4-chlorophenyl)ethanol	

6--365

<sup>a</sup>Compiled from references 1-14 and from unpublished observations.

La dégradation optimale ne se produit qu'en présence d'oxygène, d'où la nécessité de retourner le sol, lors d'un traitement in-situ, d'une température et d'un pH précis. Pour certaines molécules la biodégradation est relativement lente et ne peut s'effectuer en présence d'un autre substrat qui permet d'assurer la croissance et la multiplication des bactéries utilisées.

L'optimisation de la dégradation de crésosote enregistrée par l'Université de l'Utah a lieu lorsque l'humidité est de 40% avec un pH qui se situe entre 3,5 et 6,0. Il faut aussi ajouter de la cellulose sous forme de rafle de maïs, paille de blé, ou même de journaux (6--173). La proportion optimale sol / maïs doit-être de 4/1. La dégradation des molécules se ralentit au bout de 25 jours et est loin d'être complète. Un enrichissement avec une autre source de carbone entraîne une minéralisation du produit durant au moins 90 jours (6--363).

Le Pr. Gordon Lewandowski du NJIT a travaillé sur différentes configurations de réacteurs pour dégrader le 2-chlorophénol. Lorsque le champignon est immobilisé la biodégradation est multipliée par 40. Le réacteur a deux configurations possibles, il est formé soit avec un support fixe en silice poreuse soit avec des perles d'alginate qui sont dans ce cas en suspension dans le réacteur. Dans les deux cas la destruction s'effectue de façon satisfaisante, les concentrations au départ atteignent 520 ppm.

L'Argonne National Laboratory, un des vingt grands laboratoires national sur lequel s'appuie la recherche intra-muros des agences fédérales et en particulier le Department of Energy et le Department of Defense se consacre, entre autres, à la décontamination des eaux rouges produites lors de la fabrication du trinitrotoluène (TNT). La solution est riche en sulfites de sodium, sulfonates et en isomères de TNT. L'incinération est possible mais chère, de plus les cendres doivent être mises dans des décharges, avec les risques associés au stockage lorsque les eaux résiduelles doivent être traitées. Le problème est sérieux puisque le seul centre de production de munition du Middle-West, le Joliet Army Ammunition Plant (JAAP) rejette quotidiennement 300 000 litres de liquides contaminés.

Les bactéries ne semblent pas capables de dégrader le produit, mais une peroxydase (ligninase) du champignon *Phanerochaete chrysosporium* dégrade le DDT, la dioxine, les pentachlorophénols. Le magazine " Science" rapporte que la biodégradation du DDT a atteint 64 % en 50 jours (1--361).

Les résultats en laboratoires font apparaitre que sur une période de 7 jours, les champignons ou les ligninases (enzymes fixées) ont une activité similaire. Un prétraitement par les ultra-violets active le processus de bio- dégradation (16--792).

Le champignon *Phanerochaete chrysosporium* est actuellement le mieux connu des basidiomycètes. Il secrète deux peroxydases, une lignine peroxydase et une manganèse peroxydase qui lui permettent de dépolymériser la lignine. Ces enzymes dégradent les chlorophénols. Cette propriété a été étudiée par le Dr. Michael Gold de l'Oregon Graduate Institute of Science & Technology grâce à un financement conjoint de la National Science Foundation et du Department Of Energy. Les enzymes réduisent les quinones et méthylent les hydroquinones, les deux atomes de chlore sont libérés avant coupure de l'anneau phénol. Le laboratoire essaie maintenant d'isoler les enzymes puis de cloner les gènes. L'objectif est de traiter les sites qui ont été contaminés par les chlorophénols, les 2-4-6 trichlorophénols et les pentachlorophénols, molécules qui ont été utilisés depuis des années pour traiter les bois afin de prévenir le développement et la multiplication des insectes (3--22).

Les chercheurs de l'Utah Water Research Laboratory de Logan travaillent sur d'autres champignons qui dégradent des benzo(a)pyrènes. La réaction est plus rapide en milieu alcalin (pH 8,0), qu'en milieu acide (pH 4,8) la présence d'oxygène est déterminante. Les champignons présentent l'avantage d'être facilement cultivables dans des réacteurs. De plus l'enzyme qui entraîne le catabolisme est extracytoplasmique, elle se trouve au niveau de la membrane. La dégradation n'est cependant pas totale, lorsque la concentration de la molécule toxique devient faible elle se ralentit fortement.

### 3-3-2-1-3 Les levures

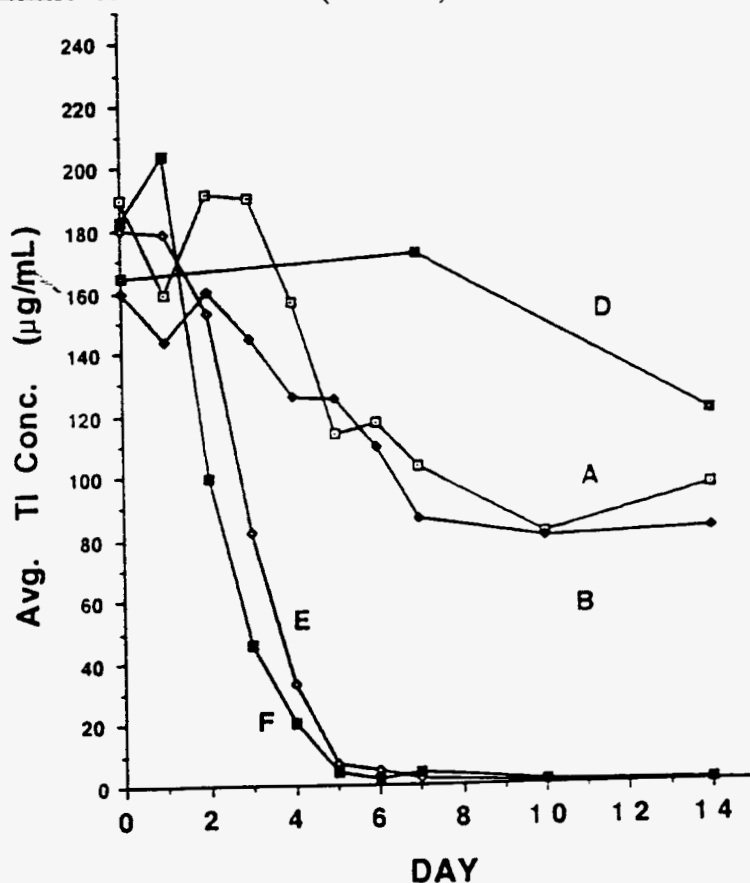
Les levures, permettent la fermentation. Peu de travaux ont été réalisés sur leur intérêt dans la dégradation des déchets.

Si l'on excepte l'agro-alimentaire, l'intérêt des levures semble limité, mais on est encore bien loin d'avoir évalué toutes les espèces.

### 3-3-2-1-4 Les consortiums de bactéries :

Depuis le vote du dernier CERCLA, l'incinération a été la première méthode pour se débarrasser des contaminants organiques. On peut dire que d'une façon générale l'EPA privilégie cette technique. Quand la concentration d'agents polluants est importante ou lorsque le pouvoir calorifique est élevé cette solution est la meilleure, par contre lorsque la concentration de substances organiques est inférieure à 5 %, la dégradation par des bactéries est préférable (16--793). La pollution est causée par un mélange de produits chimiques, et l'emploi d'un " consortium "

d'organismes est préférable . L' Analytical Bio-Chemistry Labs (Columbia, Missouri), a étudié la biodégradabilité sur deux échantillons E et F, les autres servant de témoins et étaient soit scellés (D), soit contenaient de l'HgCl<sub>2</sub> qui élimine toute réaction (A & B).



16--795

Après 14 jours la dégradation a été, pour toutes les molécules, supérieure à 90 %. La détermination des souches a permis de trouver la présence d'*Acinetobacter calcoaceticus*, de *Pseudomonas vesicularis*, de *Pseudomonas paucimobilis*, *Flavobacterium sp.* et de *Pseudomonas stutzeri*. Huit autres organismes présents n'ont pas pu être déterminés. Il ne fait aucun doute que dans le cas d'une biodégradation, la seule action de mutations naturelles, dont la cinétique est accélérée par la toxicité du milieu, ne permet pas de déterminer la souche.

En général une espèce sert de source de nourriture à une autre espèce. Les réactions de dégradation en chaîne sont communes. Seule une longue étude préalable permet de calculer les séquences. L'absence d'un maillon peut être lourde de conséquence mais au bout d'un certain temps ce maillon manquant apparaît.

Des chercheurs américains ont ainsi exposé des micro-organismes à de faibles concentrations de dichlorobenzène. Les isomères 1-2 et 1-4 furent dégradés rapidement, mais il a fallu plus d'un an pour que le 1-3 dichlorobenzène disparaisse. Par contre lorsque le

mutant est apparu, la dégradation s'est déroulée en 20 minutes (12--46).

L'attente est quelques fois la meilleure solution. Quatre mois après l'accident de l'Exxon Valdez les chercheurs de l'EPA et d'Exxon ont observé une brusque apparition de bactéries. Cette constatation a été faite à plusieurs reprises lors de l'observation de marées noires. Des micro-organismes et des produits comme l'Inipol avaient été épandus sur le site. Ce dernier développé par Elf est un fertilisant.

D'une façon générale, l'application d'un consortium de bactéries permet, aux plus performantes de se multiplier, aux plus aptes de dégrader la substance polluante, et d'accélérer le processus de dégradation. On doit noter que bien souvent des micro-organismes sont ajoutés alors qu'un consortium indigène existe. Il est possible d'améliorer ce processus naturel, son rendement et sa vitesse de réaction, des essais doivent être effectués pour déterminer, avant toute action la nature et le nombre de micro-organismes présents.

### 3-3-2-2 Les manipulations génétiques

Les micro-organismes sont responsables de la dégradation lente et naturelle des contaminants qui ont pollué l'environnement. Grâce aux manipulations génétiques il est possible d'améliorer le procédé soit au point de vue rendement soit au point de vue vitesse de la réaction. La firme Envirogen (Princeton, NJ) a manipulé *E. Coli* qui produit un enzyme (toluène monooxygénase) capable de dégrader le TCE. Cette méthode paraît prometteuse mais elle est soumise à un certain nombre de contraintes légales (12--52). L'utilisation de matériaux modifiés génétiquement est réglementée par le TSCA, et par plusieurs agences fédérales (EPA, FDA, USDA, NSF) ainsi que par les Etats.

A ce jour on n'a pas d'exemple aux Etats-Unis, d'utilisation dans la nature d'organismes modifiés pour le traitement des pollutions.

D'après la publication HAZMAT WORLD, cette méthode pourrait cependant être développée en réacteur d'ici quelques années. On doit noter que l'attribution du premier brevet au Docteur Chakrabarty, l'a été sur une bactérie modifiée capable de dégrader des hydrocarbures.

Lorsque les bactéries ne dégradent pas naturellement un produit on peut essayer de modifier leur patrimoine génétique. Il est aussi possible de transférer un gène ou plusieurs copies de ce gène qui code pour un enzyme d'un organisme dans un autre. La découverte de " gènes suicides " (suicide gènes) permet d'envisager d'introduire de façon concomitante ces gènes qui font disparaître les risques de dissémination accidentelle. La "construction" d'une bactérie " patchwork" qui remplacera les consortium



est aussi envisageable.

Le public n'est cependant pas encore prêt à accepter de tels développements. Signalons que des organismes modifiés ont été lâchés dans la nature (dans le domaine agricole) et que le nombre de telles expériences devrait augmenter dans les années à venir. Les premiers essais ont été réalisés pour prévenir les gelées tardives des fraisiers.

Les compagnies de biotechnologie ne se sont pas précipitées dans ce secteur d'activité. L'idée de " lâcher " dans la nature des organismes modifiés génétiquement pour traiter des pollutions n'a jamais été populaire. Jusqu'à ces derniers mois l'EPA n'a pas encouragé de telles recherches mais comme toujours aux Etats-Unis, " l'esprit d'entreprise " a pris le dessus. Plusieurs travaux effectués par des compagnies privées sont financés par le gouvernement dans le cadre du programme fédéral SBIR. En plus de l'utilisation des micro-organismes on peut envisager l'emploi d'enzymes qui ne présentent cette fois aucun danger potentiel.

Le frein au développement de cette technique n'a pas été le seul fait de l'EPA. Les profits sont inférieurs à ceux que l'industrie peut espérer obtenir de la mise au point d'un produit pharmaceutique ou d'un produit à usage agricole. C'est un frein autrement puissant..

Marché des organismes modifiés pour  
le traitement des déchets dangereux.  
(pour les Etats-Unis -1995-)

Type d'opération	Marché (millions dollars/an)
Décharges anciennes	150
Décharges actuelles	200
Total	350

Source : Genetic Technology News (GTN) October 1988

Ce montant est global et inclut les frais d'exploitation. Les marchés de l'incinération, de la mise en décharge et du lagunage sont beaucoup plus importants. Pour 1992 le marché du traitement des déchets dangereux est ainsi évalué à 7 milliards de dollars (de 7 à 9 milliards de dollars selon Arthur D. Little). L'utilisation d'organismes modifiés prendra une part du marché, non négligeable mais faible. GTN mise sur une stabilisation à 5 % du marché en 1995 avec une progression de quelques pourcent les années suivantes. Ces estimations sont très surévaluées

aux dires d' autres société de conseil.

Comme dans le secteur de la pharmacie il est difficile, de faire des prévisions, les applications des biotechnologies sont un marché trop récent. L' EPA ne permettra pas l'utilisation quotidienne de cette technique avant au moins 10 ans. Cependant en situation de crise, les échéances peuvent être raccourcies, c'est le cas à l'occasion des marées noires.

La commercialisation d'organismes modifiés est peu probable dans l'immédiat, mais au milieu de cette décennie un certain nombre arriveront sur le marché. La sélection naturelle a permis de développer des lignées capables de décomposer des molécules hautement toxiques. La recombinaison offre néanmoins la possibilité de venir à bout des molécules les plus récalcitrantes et particulièrement des composés chlorés. Les PCBs sont un exemple. L'objectif des biologistes est de trouver un enzyme, ou une combinaison d' enzymes capables de dégrader rapidement et totalement ce type de molécules. Genencor commercialise des enzymes pour décomposer la cellulose et l'hémicellulose. Des gènes ont été clonés et incorporés dans des bactéries hôtes. Adapter l'enzyme à la destruction d'une molécule spécifique est la solution aux problèmes posés par de nombreuses pollutions. La molécule est produite dans un fermenteur. Aucune dissémination n'est possible.

Le biochimiste James Bryers de Duke University a trouvé des organismes capables de dégrader les phénols. Afin d'accroître le rendement de l'opération il envisage de clôner le gène dans *E.coli*, bactérie qui peut-être multipliée en grande quantité (17--56). Il n'est cependant pas évident que les manipulations génétiques soient la panacée. Les bactéries modifiées pour dégrader les huiles lourdes, dont le brevet a été accordé à General Electric, ont révélé qu'au bout de quelques générations leur capacité de dégradation diminuait. Cette perte de l'activité graduelle du ou des gènes n' a pas été expliquée, plusieurs hypothèses ont été avancées : structure des gènes ou des régulateurs, promoteurs, opérateurs...

La première retombée des manipulations génétiques dans le secteur de l'environnement sera sans doute l'utilisation de sondes biologiques permettant d'identifier la nature des micro-organismes présents et de déterminer si ces derniers ont les gènes qui codent pour des enzymes capables de dégrader tel ou tel polluant. Le numéro de Science 17-08-1990, rapporte que le Center for Environmental Biotechnology de l'Université du Tennessee a développé un micro-organisme qui émet une lumière visible lorsqu'il dégrade une substance. L'activité des bactéries est

alors mise en évidence par cette bioluminescence.

### 3-3-3 Les végétaux supérieurs :

Les plantes supérieures ont un rôle à jouer. Le tabac absorbe par exemple le plomb et le polonium du sol. Les jacinthes d'eau sont aussi des candidates sérieuses pour traiter les effluents. Ces plantes sont déjà utilisées pour traiter des eaux polluées des tanneries, des producteurs d'explosifs et en particulier pour dégrader l'acide formique.

Le Dr. Paul Jackson du Los Alamos National Laboratory (Los Alamos, New Mexico) a cloné les gènes de végétaux supérieurs qui codent pour les enzymes qui fixent des métaux. Des compagnies de biotechnologies envisagent de développer cette technique. Il a aussi découvert que les cultures de cellules de végétaux supérieurs pouvaient concentrer le baryum en solution. Dans le même temps le Dr. Daniel O'Neil du Georgia Tech Research Institute a montré que la lignine des végétaux supérieurs pouvait fixer certains métaux (18--4). Cette constatation est intéressante puisqu'elle ouvre la voie à des applications à court terme. S'il est difficile de surveiller la dissémination des organismes unicellulaires, les végétaux supérieurs sont facilement contrôlables et peuvent concentrer des métaux tout en étant manipulés génétiquement. Il suffit de leur conférer en même temps la stérilité mâle. Un gène bloquant la formation des grains de pollen dans les plantes supérieures a été cloné en septembre 1991 par des équipes Belges et Californiennes. En l'absence d'organes sexuels la multiplication végétative est facile à surveiller.

Plusieurs tests ont été réalisés par le Dr. Paul Bishop (Université du New Hampshire à Durham) et par le Dr. Jan DeWaters ( Université de Caroline du Nord à Chapel Hill) pour bloquer certains ions dans les eaux usées. Une des procédures encouragées par le Clean Air Act (1977-PL 95-217) est de développer des techniques innovatrices qui ne demandent que peu d'énergie. L'intérêt d'utiliser des végétaux supérieurs est multiple:

- l'azote, le phosphore sont absorbés.
- les métaux sont fixés.
- le CO<sub>2</sub> est absorbé par photosynthèse.
- la biomasse récoltée peut ensuite produire du méthane-  
les métaux sont récupérés

En fait l'activité des plantes supérieures est très complexe. Les bactéries qui se développent sur les racines, tiges et feuilles jouent un rôle essentiel lors de la filtration et de l'adsorption des solides.

L'utilisation des végétaux supérieurs pour traiter les eaux usées n'est possible que dans les régions chaudes où l'on peut cultiver toute l'année des plantes supérieures aquatiques et en particulier la Jacinthe d'eau *Eichornia crassipes* qui demande une température minimum de 20°C pour se développer. Pour les régions froides il faudra sélectionner des espèces capables de supporter des températures moins élevées. A la suite d'essais réalisés en 1986 à l'Université du New Hampshire il s'est avéré que l'Elodée, *Elodea nuttallii*, avait une capacité de rétention des métaux comparable à la Jacinthe d'eau.

D'autres tests ont permis de montrer que le cuivre est totalement fixé par les plantes, le zinc et le plomb sont aussi adsorbés, mais dans des proportions beaucoup plus faibles. Le cadmium et le nickel le sont faiblement (1--118). Ils n'en demeurent pas moins qu'une étude systématique permettrait de déterminer les propriétés de chaque espèce. A quand la plante pour fixer l'or ? Certains chercheurs travailleraient sur des algues capables de fixer l'or qui se trouve dans l'eau de mer !

### 3-3-4 Les enzymes

L'utilisation d'enzymes n'a été que récemment envisagée et développée. Le déchet organique peut être soit traité directement soit préalablement modifié pour que l'enzyme puisse le traiter.

Ces protéines effectuent le travail. Il suffit de les extraire pour éliminer tout risque de contamination, mais cette méthode est très onéreuse.

La configuration de la molécule est fragile, son activité est souvent conditionnée par la présence d'autres structures ou d'organites cellulaires. De plus les enzymes sont détruites par des protéases que l'on trouve dans les zones contaminées qui proviennent d'autres organismes morts ou vivants.

Le Dr. James Tiedje de la Michigan State University à East Lansing a extrait une protéine de deux bactéries, *Desulfovibrio desulfuricans* et *Bacteriodaceae sp.* protéine capable de dégrader le polyéthylène glycole en méthane en présence de bactéries méthanogènes. La firme Economics Laboratory Inc. développe un enzyme, le *levan hydrolase*, "EDC-1" pour combattre la mousse et les dépôts solides lors de la fabrication du papier. L'enzyme hydrolyse les polysaccharides et permet ensuite de recycler l'eau de traitement. Le Dr. David Gibson de l'Université du Texas à Austin produit un enzyme à partir de *Pseudomonas diminuta* capable de dégrader un pesticide organophosphate, le parathion. Cet enzyme peut servir pour nettoyer les réservoirs contaminés. Le Dr. Thomas R. Hopkins de Phillips Petroleum travaille sur une peroxydase extraite du raifort (radis noirs d'hiver) pour dégrader, en présence d'alcool, des

composés aromatiques et des phénols. Des chercheurs anglais (Andrew Bearsmore et Keith Powell) ont extrait d'un champignon, *Gibberella*, un enzyme capable de décomposer les sels de cyanure dans l'eau (10--49). Dans ce cas l'enzyme n'est pas extraite mais le champignon est simplement séché. Des biocapteurs permettent de vérifier la présence de la protéine.

### 3-3-5 La chitine

La chitine peut être appliquée en film et semble être le procédé des plus efficaces pour bloquer les métaux et les organo-halogénés. Ralph Portier de la Louisiana State University a breveté un système pour déposer la chitine sur des surfaces poreuses. Les substances toxiques s'y fixent et peuvent ensuite être récupérées (métaux) ou traitées par voie thermique (organo-halogénés).

La technique qui consiste à immobiliser les cellules pour la décomposition des substances organiques toxiques a été développée ces dix dernières années. Les cellules sont englobées dans une matrice. La chitine, la cellulose, la diatomite sont les trois supports les plus utilisés. Les bactéries adhèrent à la chitine par des liaisons covalentes, de plus la chitine comme la diatomite adsorbent de nombreux composés organiques et des nutriments. Cette propriété permet de traiter des eaux lorsque les concentrations de substances polluantes sont très faibles (7--368).

### 3-4 Les techniques

Le choix de la technique est fonction de la nature physique et chimique du contaminateur, de la concentration et des considérations économiques.

Celui qui cherche à sélectionner des bactéries capables de dégrader telle ou telle molécule travaille au départ sur des cultures se développant en présence du produit toxique. Le Dr. Dennis Focht, Professeur de Soil Microbiology, à l'Université de Californie a mis au point un système de culture en continu de différentes lignées de bactéries. Les micro-organismes échangent du matériel génétique en présence du contaminant. Cette technique permet de sélectionner les plus performantes (10--50).

L'hydrophilie des polluants peut entraîner une liaison très forte avec le substrat, il faut bien souvent ajouter un surfactant pour transférer le contaminant du sol vers l'eau. Ce pré-traitement permet de libérer toutes les substances polluantes. Le succès de la biodégradation est souvent conditionné par cette réaction préalable.

### 3-4-1 La caractérisation du site

Le nombre de variables est important lorsque l'on veut traiter des déchets par voie biologique. Il faut choisir comme nous l'avons déjà noté entre un traitement aérobic, anaérobic, le type d'organisme, une action in-situ ou dans un réacteur... Dans un milieu confiné il est possible de contrôler les conditions, in-situ l'évolution est plus difficile à suivre. Il faut reconnaître que les organismes ont une capacité d'adaptation très grande et qu'ils peuvent se développer dans des conditions variées.

Le prélèvement des échantillons sur un site est minutieux, car chaque site est un cas particulier, une biocénose et un biotope uniques. La technique de traitement est souvent délicate à définir. D'après des estimations publiées par Bioprocessing Technology seul un projet sur cinquante est retenu pour un traitement par voie biologique (2--4).

Toutes les techniques doivent être envisagées. La société K.V Associates (Falmouth, Massachusetts) a imaginé et construit un marteau pneumatique qui permet de prélever des échantillons sur le site et d'en évaluer les caractéristiques. Les terrains ne sont jamais homogènes. La dégradation in-situ est fonction de l'hydrologie du site de la structure, de l'hétérogénéité du sol, des fluctuations de la nappe ... La direction de l'eau est essentielle pour les injections et les extractions. Les contaminants sont dans les milieux liquides et solides. En général les micro-organismes indigènes sont nettement plus efficaces et résistants que ceux introduits, qui ne peuvent pas toujours survivre dans cet environnement. Il est nécessaire de développer un modèle pour évaluer la faisabilité du traitement.

Une des méthodes bon marché développée par les hollandais (Organization for Applied Scientific Research), et que les américains envisagent de reprendre, est d'avoir recours, lorsque les conditions le permettent, à des animaux pour évaluer la pollution. Par exemple des moules concentrent le polluant en filtrant des centaines de litres d'eau par jour. Ce processus naturel peut être utilisé pour avoir une idée précise des différents polluants que l'on trouve dans les eaux douces.

Pour analyser les vapeurs du sol, la technique active consiste à aspirer l'air à différentes profondeurs, la technique passive est de mettre des substances absorbantes à des niveaux différents.

Dans les deux cas il faut ensuite analyser les échantillons prélevés, tout en évitant de percer des puits qui peuvent provoquer la contamination de zones non polluées. E.A. Engineering Science and Technology (Smyrna, Georgie), s'est spécialisé dans ces prélèvements.

Grâce à un contrat du Gas Research Institute (GRI), Remediation Technologies Inc. (Pittsburgh, Pennsylvanie) a mis au point une procédure pour essayer la fiabilité de la technique de biodégradation in-vivo (10--98). En six semaines le bioréacteur permet de savoir si le taux de dégradation est acceptable. Ce protocole est utilisé sur les sites Superfund (décharges abandonnées qui sont actuellement traitées grâce à un financement fédéral et à des taxes sur une quarantaine de produits chimiques).

D'une façon générale chaque site contaminé par un produit chimique renferme des organismes qui peuvent dégrader les molécules. Ces organismes peuvent être cultivés et étudiés. Le Dr. Lewandowski (New Jersey Institute of Technology) utilise des cultures mixtes et détermine les lignées qui dégradent les phénols. Il faut définir un profil micro-écologique. Des échantillons doivent être prélevés sur le site. En général de 40 à 50 espèces sont identifiées.

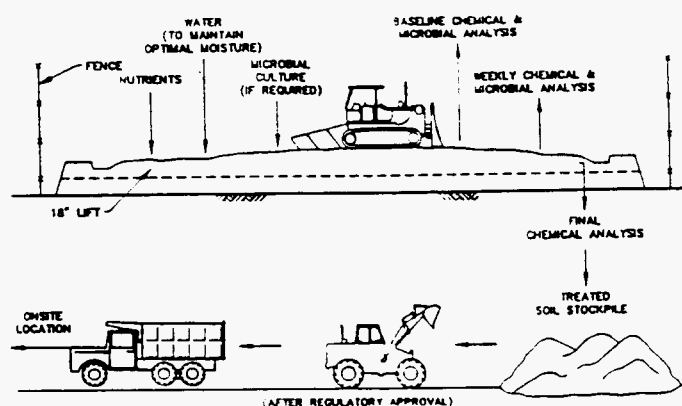
### **3-4-2 Les procédés, valorisation et de prétraitement.**

Un certain nombre de firmes dont ENSR Consulting and Engineering mettent au point des techniques mixtes qu'ils appellent "combinées". Le biotraitement est précédé par l'injection d'air ou de vapeurs (5--19). L'application de produits chimiques peut être, dans certains cas, nécessaire avant de faire agir des organismes. Des études par Rulkens ont montré, par exemple, que des sols contaminés par des bromures pouvaient être partiellement nettoyés avec des agents comme NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, ou plus simplement le savon... Quand les concentrations sont ramenées à des niveaux raisonnables, la biodégradation permet d'affiner le traitement chimique (1--361).

#### **3-4-2-1 Le landfarming**

Cette technique est celle que l'on emploie en agriculture. Les conditions de biodégradation sont optimisées en retournant le sol pour l'aérer et en y ajoutant des nutriments tels que l'azote, le phosphore et de l'eau. Les espèces indigènes se multiplient et dégradent les contaminants.

Cette pratique est relativement déjà ancienne et couramment employée dans les raffineries américaines. Elle présente l'inconvénient d'être longue (1 à 3 ans), elle entraîne l'émission de substances volatiles odorantes. Elle provoque dans certains cas, la pollution de la nappe phréatique. C'est la technique la plus longue mais la plus économique pour venir à bout des déchets par voie biologique.



7--326

Le coût de traitement est estimé entre 40 et 90 dollars par m<sup>3</sup> en fonction du site. Le sol contaminé peut être excavé et transporté sur une surface plane préalablement convertie en zone de stockage. Quand des phénomènes de lixiviation risquent de se produire, des couches protectrices synthétiques sont installées. On peut aussi creuser des tranchées ou des puits, en isolant auparavant le sol pollué avec un mur de bentonite. La société Ecova qui utilise cette technique dispose une couche protectrice de 80 mm avec au dessous du sable qui assure la protection et permet le drainage, les eaux sont collectées par des tuyaux. La décharge peut ensuite être recouverte d'une couche isolante pour que l'on obtienne un effet de serre permettant de contrôler l'humidité et les nutriments.

Les liquides traités sont utilisés comme inoculum après avoir ajusté les nutriments et le pH au nouveau site pollué. Les vapeurs organiques émises peuvent être traitées dans un bioréacteur.

Lorsque la surface fait défaut le traitement se fait "en tas", ce que l'on appelle aux Etats-Unis le "*Heap Bioremediation*". La terre est excavée et placée sur une couche protectrice. Les organismes et nutriments s'infiltrent par simple percolation. Une couche protectrice peut recouvrir l'ensemble. Un système interne de tuyaux permet d'injecter de l'air. Cette technique est largement utilisée aux Etats-Unis pour récupérer certains métaux, en particulier le cuivre. La compagnie Kennecot traite ainsi ses minerais à faible teneur.

ECOVA améliore le rendement du système en augmentant la température par activité biologique. En général cette technique est utilisée lorsque la texture du sol est hétérogène. Le sol est alors mélangé avec de la paille ou des copeaux de bois. Des bactéries dégradent la lignine et la cellulose et dégagent de la chaleur qui permet d'accélérer la croissance des bactéries qui détruisent les substances polluantes. Seul des essais en laboratoires permettent, au cas par cas, de choisir telle ou telle technique.

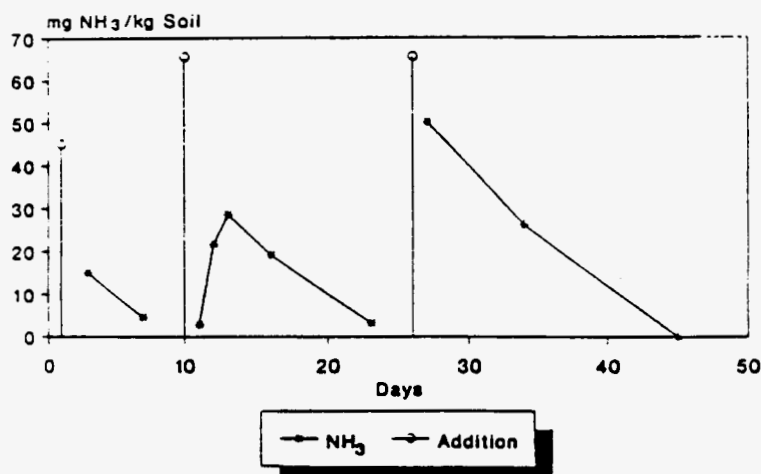


### 3-4-2-1-1 Les exemples Californiens

Un site situé en Californie du Sud ayant servi de décharge durant plus de 65 ans était pollué avec des hydrocarbures et des composés organiques volatiles. Environ 16 000 m<sup>3</sup> de terre furent excavés afin de réduire la contamination à 100 mg/kg. En dessous de cette concentration le sol peut être entreposé dans une décharge de Class III.

La concentration moyenne des polluants observée était de 1 275 mg/kg. La concentration de micro-organisme se situait entre 10<sup>7</sup> à 10<sup>8</sup> cellules/grammes. L'idée fut de stimuler l'action des micro-organismes. En 4 semaines de traitement la concentration des polluants fut réduite en dessous de ces 100 mg/kg. La technique consista à ajouter de l'azote et du phosphore et à aérer le sol. L'inoculation d'organismes ne fut pas nécessaire.

En raison de la faible surface disponible le sol excavé a été étalé en couche de 1,2 mètres. L'absence de pluies dans la région permit d'éviter de disposer une protection contre la lixiviation. Des nutriments et de l'eau furent ajoutés après analyses, afin d'optimiser la réaction. Trois épandages d'azote furent nécessaires.



7--330

Quant aux micro-organismes, leur concentration demeura constante durant toute l'expérience. Le coût du traitement a été évalué à 65 dollars par m<sup>3</sup>.

Le microbiologiste Frankenberger de l'Université de Californie à Riverside a travaillé sur une zone de 700 hectares contaminée par du sélénium. Il a activé les bactéries qui se trouvaient dans le sol, en labourant et en mélangeant la zone contaminée avec des pelures d'oranges. Au bout de deux ans la concentration de la pollution fut réduite des deux tiers (19--78). Pour le "land farming", l'application d'un mélange formé de potassium et de substances organiques, dont la nature chimique n'est pas précisée, est offert par la compagnie Formula Group Ltd.

(Scottsdale, Arizona) (5--20).

Le "land farming" tombe aux Etats-Unis sous la coupe du "Land Ban Requirement", qui limite l'épandage de substances dangereuses avant tout traitement préalable. En fait ce sont les juridictions d'Etat, voir de comtés, qui permettent ou interdisent cette méthode qui est surtout utilisée dans le Sud et dans le Centre du pays. D'autres traitements doivent être développés lorsque le législateur s'oppose à cette pratique.

### 3-4-2-2 Le traitement des eaux

La mise au point du traitement des eaux usées par voie biologique est ancienne, elle date aux Etats-Unis de 1913. Sans évaluer tous les procédés (réservoirs, aérateurs, injection d'oxygène...) on peut citer la construction de réservoirs " en cascades " développés par la Tennessee Valley Authority (TVA). Le premier réservoir est pour la sédimentation, le second est oxygéné et planté d'ajoncs pour la filtration, le troisième estensemencé avec des algues et des herbes aquatiques, le quatrième reçoit l'eau qui est, en général, potable et où vit une faune aquatique. Cette technique, la plus simple qui existe, ne peut être envisagée que lorsque la concentration des agents polluants est faible. La question que l'on se pose souvent est " *how clean is clean* ". De plus ce qui était polluant hier l'est peut-être beaucoup moins aujourd'hui et réciproquement.

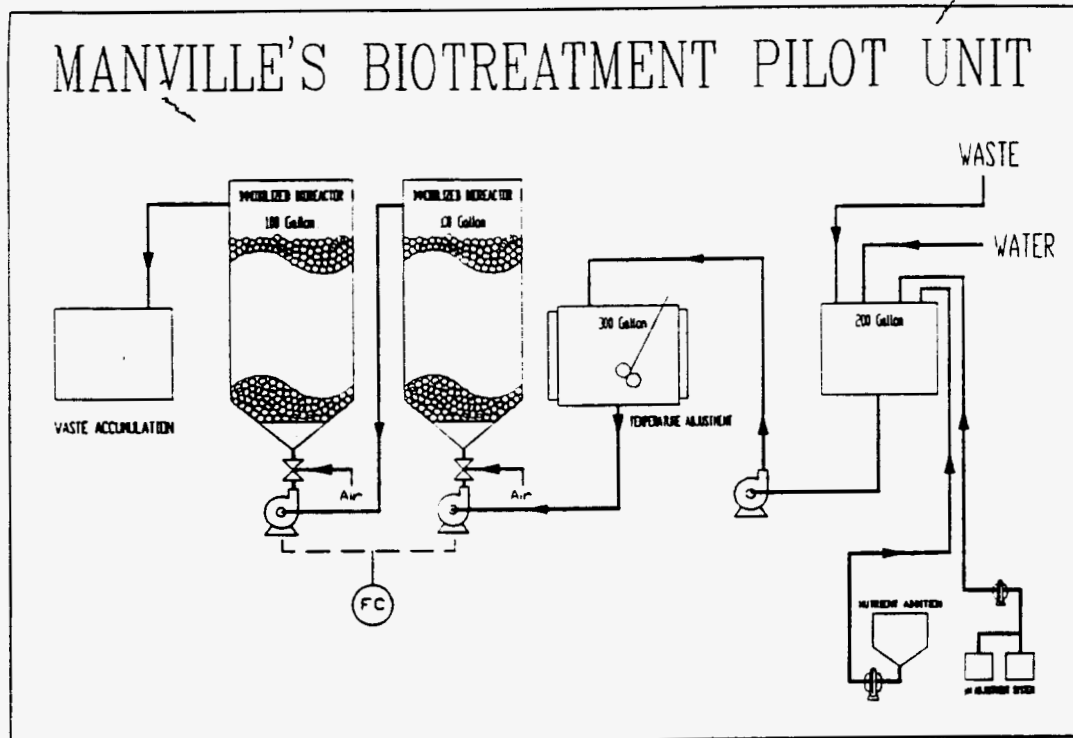
D'après Eighmy de l'Université du New Hampshire à Durham, les résidus des centrales thermiques mis en décharge sont beaucoup moins toxiques en 1991 qu'ils ne l'étaient par le passé. En effet du fait de l'évolution de la techniques les cendres s'agglomèrent et prennent l'aspect de ciment, ce qui limite d'autant les surfaces en contact avec l'eau. Les eaux d'infiltration ont alors une composition voisine de celle de l'eau de mer.

Les Departments of Civil Engineering and Bacteriology de l'Université de Californie collaborent pour traiter les eaux agricoles de drainage de la Western San Joaquin Valley. Ces eaux sont riches en substances dissoutes, en particulier en sélénium, métalloïde dangereux à des concentrations de 100 à 500 ug/l. Par traitement dans des bioréacteurs contenant de la mélasse et des cellules sélectionnées capables de fixer le sélénium dans leur cytoplasme ou sur la membrane cellulaire (*Pseudomonas sp.*, *Flavobacterium sp.*), on arrive à une fixation de 40 % du sélénium (6--267).

Chemical Waste Management Inc. (Geneva, Illinois) traite les

eaux dans des réacteurs en séquences de 48 heures. Les eaux à traiter proviennent de plusieurs décharges et sont mélangées afin de limiter les fluctuations de composition. Ce système permet d'obtenir un résultat comparable au traitement physico-chimique, à un coût inférieur de 70%.

### 3-4-2-2-1 Microbes immobilisés (Manville Corp.)



6--329

L'utilisation de micro-organismes immobilisés est une méthode qui permet d'obtenir de bons résultats pour le traitement des déchets industriels dilués. Ce procédé est avantageux là où le lagunage est impossible en raison du manque d'espace, et là où l'agent polluant est très peu concentré. Manville Corp. utilise des organismes sélectionnés fixés sur un support. La sélection se fait par une technique traditionnelle sur de l'agar agar : la seule source de carbone est l'agent polluant. Après multiplication sur des concentrations de plus en plus élevées, la fixation est réalisée en surface et à l'intérieur du support poreux. Cette dernière technique permet une circulation plus aisée des nutriments et de l'oxygène.

Ciba Geigy, Olin Chemical, NE Chem Mfg. ont sélectionné respectivement, *Pseudomonas*, *Methylobacter*, fixés sur un support -Celite - développé par Manville Corp.

<u>Application</u>	<u>Ciba Geigy</u>	<u>Olin Chemical</u>	<u>NE Chem Mfg.</u>
Type Support	R-630	R-630/R-635	R-635
Chem. Composition:			
SiO <sub>2</sub>	88.2		82.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.5		7.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.3		1.9
Na <sub>2</sub> O	4.6		3.3
K <sub>2</sub> O	0.7		0.9
CaO	0.5		2.6
MgO	0.6		1.2
pH of 10% slurry	9.8		8.0
Phy. Properties:			
Avg Pore Dia (microns)	6.6		20.0
Avg Pore Vol (cc/g)	1.4		0.6
Surf Area (m <sup>2</sup> /g)	1.3		0.3
Part Shape	spherical		cylindrical
Part Size	3x8 mesh	1/4" dia x 1/4"-1/2" long	
Crush Stgn	3 kg		8 kg
Bed Density (compacted) lbs/cu ft	21		32

6--327

Le traitement reviendrait en moyenne à un cent par gallon (5c/3,8 l). Le procédé expérimenté au laboratoire a permis la construction, par Ciba Geigy, d'une unité pilote 800 fois plus grande (6--322). Une dilution et un ajustment du pH sont nécessaires. Olin et NE Chemical Mfg. mettent ce procédé au point.

### 3-4-2-2--2 Les eaux de ruissellement et de profondeur :

Les microbiologistes pensaient que l'activité biologique était limitée à la rhizosphère.

Depuis le début des années 70 il a été démontré qu'une microflore existait en profondeur et que ces micro-organismes pouvaient dégrader des agents polluants. Le Department of Energy a lancé avec des universités un programme en coopération, le " Deep Microbiology Program ", afin de collecter, en Caroline du Sud, des sédiments à 600 mètres sous la surface afin d' isoler et de sélectionner des micro-organismes capables de détruire les agents polluants qui se trouvent dans les eaux polluées. Leur source d' énergie proviendrait du soufre et du carbone contenus à l'intérieur d' anciennes roches sédimentaires.

Les milliers de tonnes de déchets liquides injectés à plus de 750 mètres ont peut-être été en partie dégradés, soit par l'action de bactéries soit par de simples réactions chimiques ou par la combinaison des deux. La

publication en mars 1991 de l'action des impuretés que l'on rencontre dans la chaux sur les PCB est l'exemple même de phénomènes insoupçonnés jusqu'alors.

Un chercheur de chez DuPont (Aston, Pennsylvanie) a breveté un procédé de dégradation in-situ en stimulant les bactéries du sol. Dans la nappe aquifère contaminée par des hydrocarbures sont injectés de l'azote, du phosphore, des éléments à l'état de trace (obligatoire) et de l'oxygène. Cette technique est expérimentée à Traverse City (Missouri). L'essai se poursuit actuellement, mais il semble que la vitesse de dégradation soit inférieure à ce qui était prévu.

D'après les chercheurs de la Stanford University, des injections intermittentes permettent d'obtenir un meilleur résultat que des injections en continu, des essais ont été effectués sur des eaux se trouvant sous des compagnies d'électronique à Mountain View (Californie), cette région est particulièrement contaminée depuis le développement de l'informatique. Les micro-organismes se multiplient alors dans toute la zone plutôt que de s'agglutiner autour du puit d'injection. La dégradation du TCE (trichloroéthylène) atteint 95 % après injection d'eau, de méthane, et d'oxygène (17). Le TCE qui est utilisé comme solvant lors des nettoyages à sec, c'est un contaminant que l'on trouve dans de nombreux puits de la région et qui est la cause de cancers. Jusqu'à ces dernières années, on pensait que la dégradation du TCE ne pouvait avoir lieu que dans des conditions anaérobies, mais il est apparu que dans le sol la réaction était loin d'être complète, les sous-produits pouvant être plus dangereux que le TCE. L'EPA avec le support de programmes de l'U.S. Air Force a démontré que la biodégradation aérobie peut se dérouler en présence de méthane. Battelle (Columbus, Ohio) en collaboration avec l'EPA et l'U.S. Air Force a mis au point un réacteur expérimental pour optimiser la technique de cette biodégradation co-métabolique et démontrer la rentabilité économique de l'approche (6--207).

La difficulté majeure c'est la mise en contact des bactéries et de l'agent polluant. L'Institute of Gas Technology (IGT) a confirmé que lorsque le contact est établi entre bactéries et agent polluant la dégradation est rapide. Ecova Corp. a réussi à faire baisser la concentration de TCE (trichloroéthylène) de 3000 ppb à 100 ppb en cinq jours en injectant des nutriments et de l'oxygène (10--125).

Un des problèmes cruciaux, aux Etats-Unis, est celui des réservoirs souterrains. Bien que les deux tiers des traitements par voie biologique des déchets soient réalisés sur des hydrocarbures, peu de recherches ont été effectuées sur les réservoirs. La situation évolue et les UST (Underground Storage Tanks), sont maintenant des "cibles" de choix

pour ceux qui développent la technique biologique (5--19). Les pollutions entraînées par les fuites sont nombreuses et identiques dans leur nature... et dans leur cause puisque les réservoirs fuient par corrosion des soudures, par dégradation des métaux ou des alliages qui sont toujours à base de fer. Pour cette raison le Bioremediation Action Committee (BAC) de l'EPA s'occupe principalement des UST. Ce Comité estime que de 250 000 à 500 000 réservoirs souterrains fuient aux Etats-Unis ! (5--18). Depuis 1990, ces réservoirs doivent réglementairement être entourés d'une double couche protectrice entre lesquelles des capteurs incorporés permettent de détecter la fuite dès qu'elle se produit. La National Fire Protection Association (NFPA) privilégie les réservoirs à carburant situés au-dessus du sol. Les "Abovegrounds Storage Tanks " (AST) sont faciles à installer, disponibles par " leasing ", et surtout rendent les fuites très visibles. Le Gouvernement fédéral va certainement proposer de réglementer ces types de réservoirs lors du prochain débat sur le nouveau Resource Conservation and Recovery Act de (RCRA).

#### **3-4-2-3 La biostimulation des liquides**

Cette technique est utilisée aux Etats-Unis pour décontaminer l'eau du sol. L'eau est pompée en surface et traitée dans des réacteurs, associés quelquefois à des traitements physiques ou chimiques, puis réinjectée dans le sol avec de l'oxygène et des micro-organismes afin que la décontamination continue in-situ. Il est souvent nécessaire d'ajouter un surfactant pour dissocier les contaminants des particules du sol. Un site du Sud-Est des Etats-Unis et pollué par des xylènes, phénols, et autres solvants à des concentrations de 100 à 200 mg/l, fut nettoyé en moins de deux ans.

Les boues peuvent aussi être traitées par cette technique. On est ainsi arrivé à faire passer la concentration de phénanthrène et d'anthracène de 300 000 ppm à 65 ppm, et de benzo-a-pyrène de 1100 ppm à moins de 3 ppm (20--3).

La biostimulation peut simplement consister à jouer sur la température. Mr. Jones Grubbs de Solmar Corp. (Orange County, California) étudie cette technique (12--46).

#### **3-4-2-4 Le traitement des pesticides : le NJIT à la pointe**

De l'eau polluée fut détectée en 1981 sous une unité de production d'herbicide de l'Indiana. La contamination atteignait une dizaine de mètres de profondeur dans une zone formée de dépôts glaciaires (sable, graviers argiles) et de schistes. La contamination était due

au 4c-2mp (4-chloro-2-méthylphénol). En 1983 11 puits d'extraction et 8 d'injection ont été construits sur ce site.

Des essais furent effectués pour trouver le puit qui présentait la dégradation la plus rapide.

4C2MP Concentrations in Aerobic Cultures

Well	C <sub>0</sub>	C <sub>c</sub>	C <sub>t</sub>	% Removed
I-4	X = 1133	X = 1133	X = <41	>96
P-4	X = 3400	X = 3800	X = 1380	60
P-8	X = 710	X = 710	X = <41	>94

X = Average 4C2MP concentration (3 replicates).

C<sub>0</sub> = Initial Concentration.

C<sub>c</sub> = Final Control Concentration (7 days).

C<sub>t</sub> = Final Test Concentration (7 days).

7--328

L'ajout de nutriments ne fut pas nécessaire. L'aération était le seul facteur limitant. En 1988, 2 puits pour l'injection furent ajoutés ainsi que 8 pour l'extraction.

Les trois premiers mois de l'opération, la réduction de 25 à 35 % de la concentration en phénol a été observé. Au bout de 6 mois la réduction était de 50 %.

### 3-4-2-5 Le traitement combiné de la compagnie Ecova dans le Nord Dakota :

La compagnie Ecova a été chargée du traitement d'un entrepôt de pesticides, qui en 1987, à la suite d'un incendie a contaminé le substratum. Les contaminants étaient le 2-4 dichlorophenoxyacétique acide (2,4D) et le 4 chloro-2 methylphenoxy acide, avec d'autres molécules à l'état de trace comme le trifluraline et le carbofurane. Les techniques précédemment décrites furent utilisées :

- décontamination de 12 000 m<sup>3</sup> de sol contenant de 10 à 2 000 mg/kg de 2,4 D au niveau de la phase solide et de la phase aqueuse.
- traitement de 5 000 000 gallons d'eau ( 20 millions de litres) avec du charbon activé pour atteindre 100ug/l.
- séparation de 650 m<sup>3</sup> de matériaux faiblement pollué, déversés dans le système urbain.

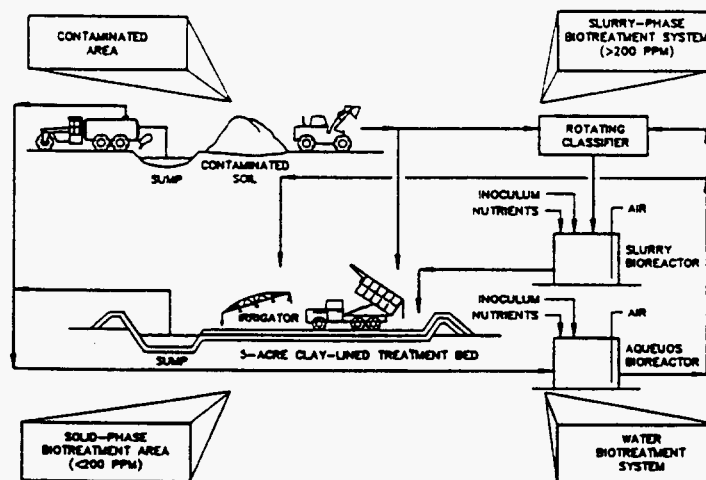
- construction d'une unité pour décontaminer 200 m<sup>3</sup> de surface de ciment.

Les études de faisabilité, sur un échantillon, ont montré l'efficacité du traitement. L'eau du site pollué contenant, 100 mg/l de 2,4 D fut traitée en laboratoire et ramenée à 1 mg/l en 4 jours. Les essais furent effectués en laboratoire sur des échantillons contenant jusqu'à 14 000 mg/kg de 2,4 D. La bactérie utilisée est JMP-134. Lors de chaque essais des suspensions de bactéries furent injectées (10<sup>9</sup> cellules/ml). Des nutriments (azote et phosphore) furent ajoutés au début des essais.

Avec du sol modérément pollué, en phase aqueuse la concentration a été ramenée de 390 mg/kg à 15 mg/kg en 16 jours. Dans du sol fortement contaminé la concentration est passée de 13 200 mg à 2610 mg/kg uniquement grâce à l'ajout de nutriments et à 2 210 mg/kg lorsque des bactéries ont été incorporées.

Il est donc apparu dans ce cas précis que les nutriments étaient le facteur limitant. L'ajout de bactéries n'a, comme on le voit, que peu ou pas d'effet sur la vitesse de la réaction.

Pour traiter le sol Ecova a construit une décharge de 2 hectares. Le sol est protégé par une couche d'argile de 40 cm et par un système de drainage pour contrôler les mouvements et l'écoulement de l'eau.





Le sol pollué fut étendu en couche de 50 cm d'épaisseur. Durant 3 mois il fut aéré et l'humidité maintenue entre 8 et 15 % avec ajout de nutriments. La concentration moyenne de 2,4 D passa de 86 à 5 mg/kg. De plus un million de gallons d'eau contaminée furent traités biologiquement dans des bioréacteurs disposés à proximité de la zone de traitement.

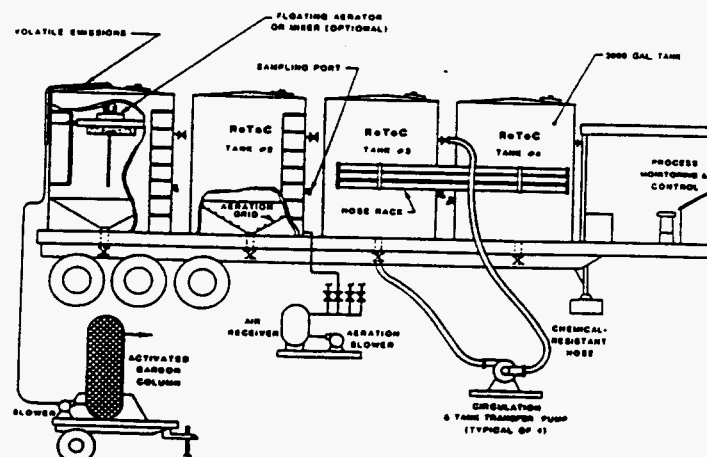
Des réacteurs de 60 m<sup>3</sup> de capacité permirent de traiter le sol fortement pollué. Deux types de bactéries se sont naturellement développées, des *Pseudomonas* et des *Alcaligenes*.

La rentabilité du procédé fut réelle, puisque le coût de l'opération fut seulement la moitié de celui d'un traitement physique ou chimique classiques.

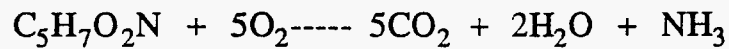
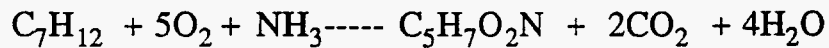
### 3-4-2-6 La technique de Remediation Technologies Inc.

Le concept est de traiter le sol pollué par des hydrocarbures en améliorant grâce à des réacteurs le contact entre le contaminant et les microorganismes. La technique développée par Remediation Technologies Inc. (Kent, Washington) a permis de démontrer que le procédé était beaucoup plus rapide qu'un traitement in situ et qu'il ne nécessitait qu'un emplacement restreint. La technologie peut être mise au point en travaillant sur des modèles réduits expérimentaux avec variation de l'aération, du pH, des organismes. Cette flexibilité est un des atouts du procédé qui permet d'effectuer des traitements anaérobies ou de réaliser des cycles aérobies / anaérobies. On peut aussi avoir un traitement en continu, en semi-continu avec un réacteur, ou des réacteurs en série.

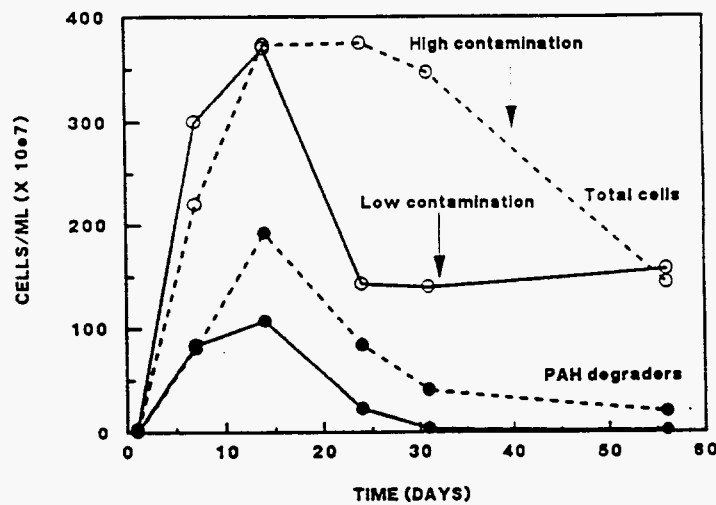
Des nutriments, des agents neutralisants, des surfactants peuvent être ajoutés en même temps que les bactéries que l'on a sélectionnées auparavant.



La biodégradation permet de transformer les hydrocarbures en CO, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, par les réactions :



Dans des conditions optimales la masse des microorganismes passe par un maximum en 15 jours, que la contamination soit importante ou minime. Cette constatation est habituellement observée.

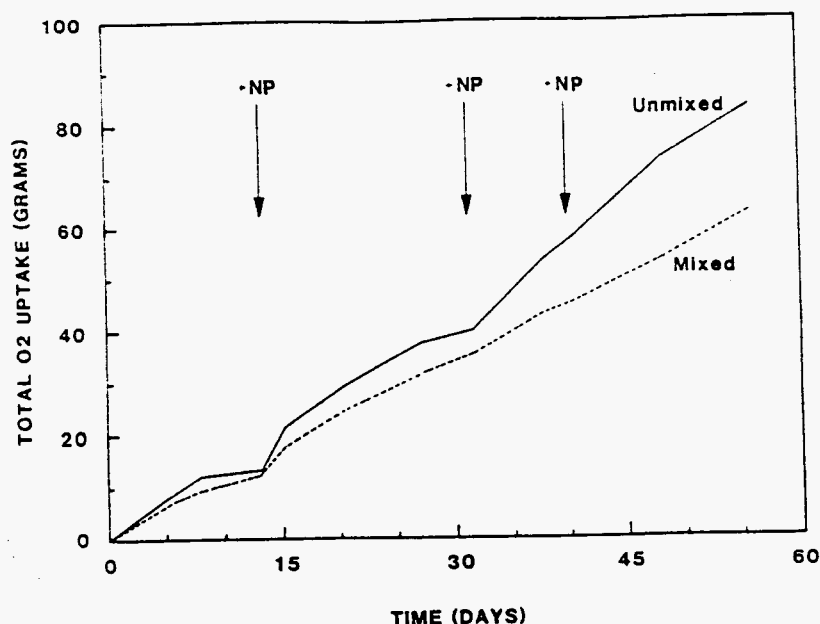


7-- 333

En général les micro-organismes ne sont pas ajoutés car les terrains pollués depuis longtemps supportent leur propre défense. Remediation Technologies Inc.ensemence, avec des souches sélectionnées, uniquement lorsque la concentration en matières polluantes est forte ou lorsque les molécules à décomposer sont trop stables (1--502).

Les prélèvements effectués par Remediation Technologies Inc., montrent qu'un sol a en moyenne une densité de cellules de 10<sup>6</sup> / gramme. Lors d'un traitement elle atteint 10<sup>7</sup> à 10<sup>8</sup> cellules et peut quelquefois être de 10<sup>9</sup> et 10<sup>10</sup> cellules / gramme.

Durant l'opération le besoin en azote est, en général, important. Il faut en moyenne 100 mg/ l d' azote. Le mélange mécanique de la terre à traiter n'est pas toujours nécessaire. L'aération peut suffir.



7--335

Cette technique simple a été utilisée une dizaine de fois sur des sols pollués par des hydrocarbures et de la créosote. La vitesse de dégradation varie en fonction de la molécule, des enzymes et des micro-organismes. Lorsqu'il s'agit de traiter des résidus des raffineries, la vitesse de dégradation est accélérée d'un facteur 6 à 8 par rapport à un lagunage classique.

Cette technique est très utile aux Etats-Unis du fait de l'utilisation du diesel comme source d'énergie pour les trains ... et des nombreux déraillements, en général à faible vitesse, qui se produisent. Il ne se passe pas de jour sans qu'il y ait un accident. L'Association of American Railroads (AAR) (Pueblo- CO) conduit depuis 1986 des recherches pour développer les techniques de biodégradation sur les sites contaminés et envisage d'utiliser cette méthode (10--114).

Une autre compagnie ESE Biosciences (EBIO), qui vient d'être achetée par Central Illinois Light and Power Co. cultive et multiplie les micro-organismes indigènes afin d'activer la dégradation des hydrocarbures. L'oxygène, le pH, et les nutriments sont ajustés afin d'accélérer le processus (2--8).

### 3-4-2-7 Le traitement des marées noires

L'accident de l'Exxon Valdez en mars 1989 a entraîné une pollution sur les côtes de l'Alaska. D'après Environment - Today, le désastre a donné la même impulsion à l'industrie du biotraitement, que le lancement du Spoutnik, sur les programmes spatiaux américains. A la mi-1990, le NETAC (§ 1), a essayé 11 bactéries au Risk Reduction Lab de l'EPA à Cincinnati. 11 jours après 30 % à 90% des huiles de l'échantillon d'algues souillées, prélevées sur le Prince William Sound avaient disparues. Deux candidats, "Micro Pro Marine D" de Environmental Remediation Inc.

(Baton Rouge), et " BiChem ABR Petroleum Blend" de Sybron Chemicals Inc. (Salem-Virginia) furent sélectionnés et utilisés pour éliminer la pollution (5).

Des phosphates, des nitrates et un produit français, l' Inipol 22 de la compagnie Elf ont été aussi épandus sur la nappe pour accélérer le développement des bactéries. L'amendement a, comme on le cherchait, provoqué la multiplication des algues.

Une autre compagnie Biosystems Technology Development Program a mis au point le conditionnement des nutriments en briquettes qui, enfermées dans un filet de pêcheur, sont diluées sur les plages en une centaine de jours et fournissent l'alimentation aux bactéries de façon continue... une technique comparable à celle des " drug release" qui permet aux médicaments d' avoir une action étalée dans le temps.

L'EPA a aussi cherché un engrais " oléophile" qui adhère sur les surfaces à nettoyer. Dès la deuxième semaine les micro-organismes sont entrés en action, l'idée est de fixer sur la surface polluée les agents qui en assureront la dégradation (10--127). Cette technique a été mise au point pour dégrader la paraffine qui se dépose sur les têtes de puits de pétrole après une exploitation prolongée.

En juin 1990 l'accident du pétrolier norvégien Mega Borg dans le Golfe du Mexique a été l'occasion du premier traitement en pleine mer d'une nappe de pétrole avec des bactéries. L'expérience, conduite par la petite compagnie de biotechnologie Alpha Environemental Inc (Austin, Texas), a été effectuée grâce à des bactéries naturelles sélectionnées. D'après ARCO Chemicals Company cette technique maintenant autorisée par l'EPA est une possibilité lorsque l'on se trouve en face d'un tel accident (21). Le problème est celui de la spécificité de la pollution. Les bactéries sont plus actives sur des produits légers comme le diesel plutôt que sur des huiles lourdes. Dans le cas d'accidents, connaître la nature de la cargaison est la voie à suivre déterminant lorsqu'il faut choisir rapidement la voie à suivre.

D'après le Texas Land Commissioner la nappe s'est rapidement désintégrée. La déperdition observée est due à une modification de la flotabilité et à l'évaporation. Sur les 3 millions de gallons qui se sont répandus sur l'océan, il n' en subsistait que 22 000 lors du traitement (informations données par les Coast Guard). Pour le Dr. Mahlon Kennicutt du Geochemical and Environmental Group de Texas A & M University le facteur temps joue un rôle essentiel, les nappes de 10 à 50 miles sont très souvent réduites par des phénomènes physiques. Les bactéries qui dégradent les hydrocarbures qui subsistent rejettent des quinones qui sont toxiques pour les poissons, cet inconvénient ne doit cependant pas masquer les avantages de cette méthode. Les micro-organismes peuvent

jouent un rôle essentiel (22).

Du fait de ces résultats encourageants, 400 kilogrammes de bactéries furent utilisées pour traiter une nappe de pétrole à Pelican Island près de Houston (Texas) et 60 kilogrammes à Cedar Bayou (Louisiane). D'après la National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) cette technique est la seule possible et acceptable lorsque l'on se trouve en zones de hauts-fonds sans possibilité de récupération des hydrocarbures par des moyens mécaniques (skimmers) (23).

Le Dr. Paul Kirk de la Old Dominion University a multiplié un champignon le *Corollospora maritima* qui décompose certains produits pétroliers. Des compagnies se disent intéressées par cette méthode. (17--56).

#### **3-4-2-7-1 La technique de Petrogen**

La firme Petrogen de Arlington Heights (Illinois), dont le conseiller scientifique est le Dr. Ananda Chakrabarty, première personne à avoir fait brevété un organisme modifié génétiquement, produit un surfactant par fermentation. Le glycolipide synthétisé par des bactéries a plusieurs applications potentielles.

Dans le cas de marées noires il entraîne une fragmentation de la nappe de pétrole qui ne se fixe plus sur la plage et qui peut ainsi être récupéré plus facilement dans l'eau. Le surfactant a été aussi essayé avec succès dans les soutes des pétroliers, limitant la masse d'eau à utiliser et réduisant la pollution.

Petrogen dispose d'une unité de production pilote et il vend des échantillons aux compagnies intéressées (24).

#### **3-4-2-8 Le traitement des explosifs : la méthode de Los Alamos**

Le biochimiste Pat Unkefer de Los Alamos National Laboratory a trouvé une bactérie qui dégrade la nitroglycérine. Les sols pollués près des centres de fabrication ou d'entrepôts des munitions peuvent ainsi être traités (17--56). Ces organismes font naturellement le travail en divisant le coût par 10 comparé aux techniques classiques.

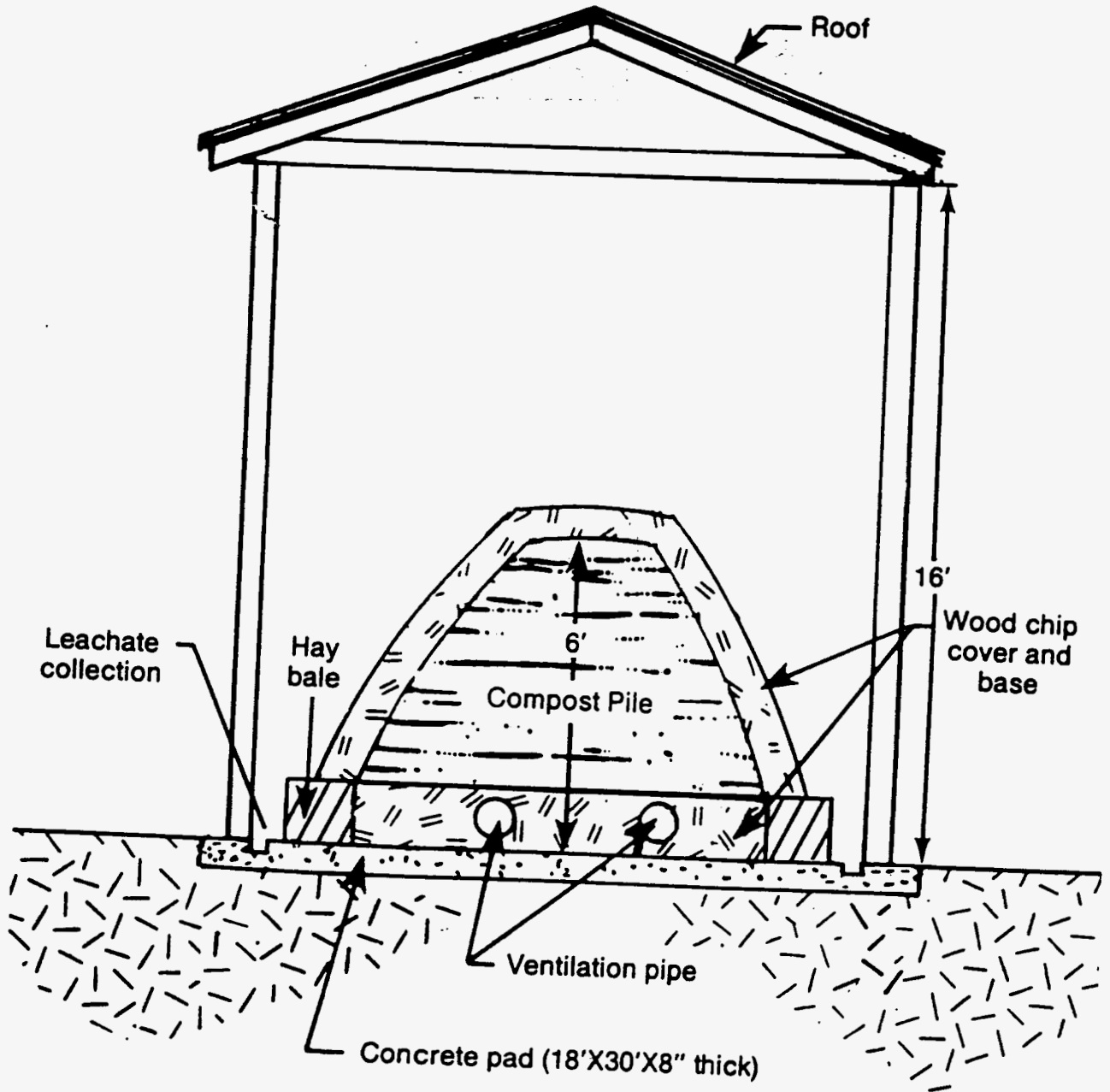
L'un des objectifs actuels est l'organisme ou les organismes à des terrains riches en sels. Les entrepôts de munition construits durant la seconde guerre mondiale se trouvent en effet tout près des côtes principalement en Virginie, au Delaware au Maryland et en Californie (25--7).

L'U.S. Army Toxic and Hazardous Materials Agency traite par compostage les sols pollués par des explosifs. Cette agence gouvernementale signe des contrats après appel d'offre avec des compagnies privées qui effectuent le travail. Les premiers essais ont été réalisés sur des sédiments contenant 76 000 ppm d'explosifs dont 66% de TNT et 25 % de RDX. Le sol est mélangé avec de la paille, de la luzerne et du crottin de cheval. Après 22 semaines, et une température maintenue à 55 °C, la concentration de polluants est descendue de 17 800 ppm à 74 ppm (6--307).

Materials Balance of Mixture to be Composted

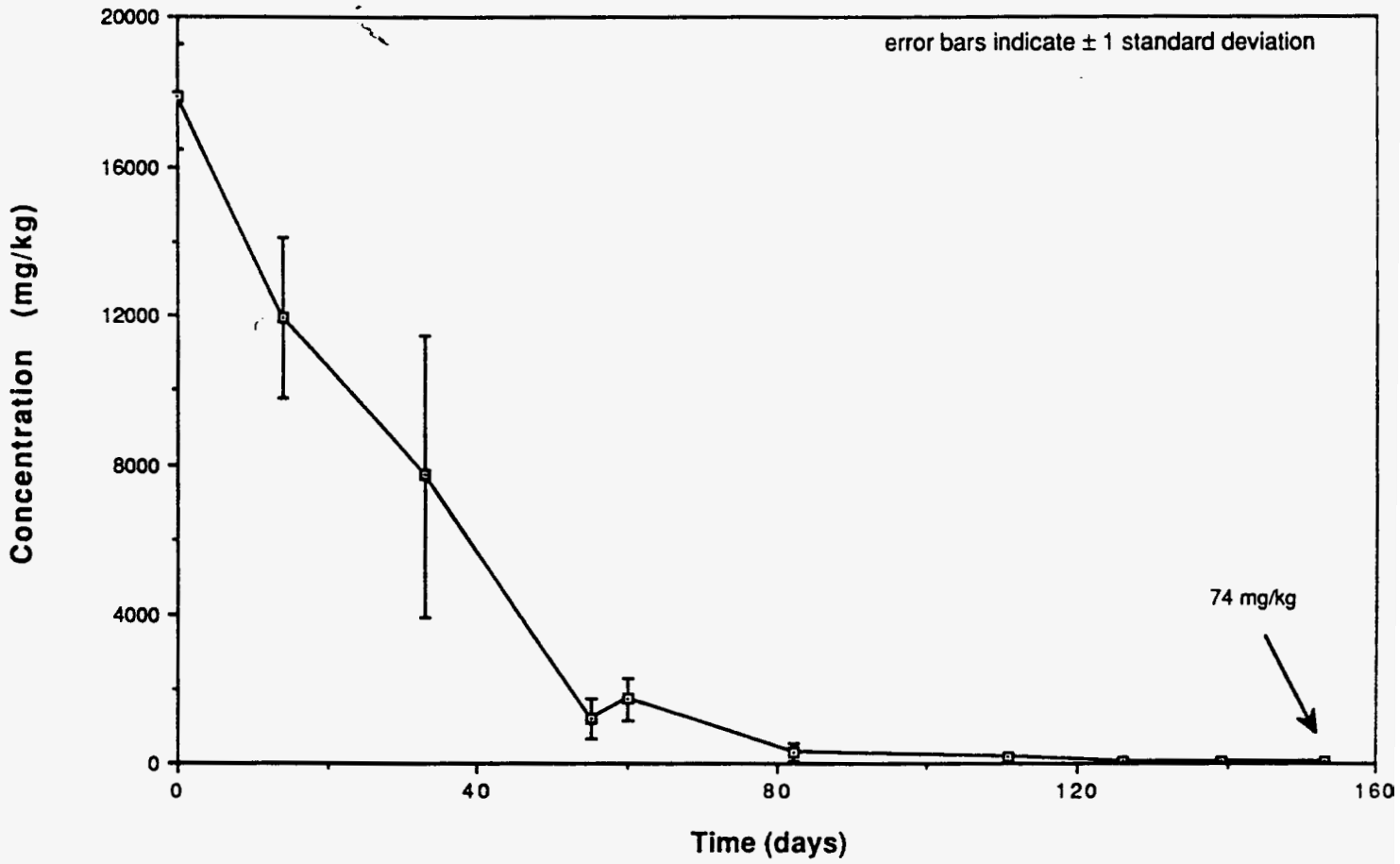
Material	Volume (cu yd)	Mass (lb)	Volume (percent)	Mass (percent)
Sediment	1	2,300	3	24
Alfalfa	13	940	38	10
Straw/manure	16	2,480	47	25
Horse feed	<u>4</u>	<u>4,000</u>	<u>12</u>	<u>41</u>
Total	34	9,720	100	100

Biotechnology Applications in Hazardous Waste Treatment



Note: Schematic only, not to scale.

### Concentration of Total Explosives in Thermophilic Compost Pile





Cette technique est simple. Le DOD a le privilège de réaliser des expériences sans avoir à se plier aux réglementations fédérales.

L'analyse des résidus de la dégradation et leur toxicité n'ont pas été effectuées. L' U.S. Army poursuit l'expérience mais dans ce domaine encore la discrétion est de rigueur. De nombreux travaux sont réalisés sur des micro-organismes afin de réduire la pollution sur les terrains militaires, bien sûr en silence et secrètement.

D'une façon générale l'Armée développe et privilégie les traitements in-situ. Il semble que l'ampleur du problème n'autorise que la méthode biologique... à moins de dépenser des milliards de dollars, ce qui n'est ni envisageable ni envisagé. Dans le cas de pollution par la nitroguanidin, utilisé dans la fabrication des poudres, du glucose ou du petit lait sont épandus directement sur le sol. Seul un traitement anaérobie permet la minéralisation après une longue période d'acclimatation (1--486). Le problème est l'accroissement de la concentration d'azote qui peut contaminer la nappe phréatique.

#### 3-4-2-9 Le traitement des métaux

De nombreux micro-organismes peuvent fixer les métaux contenus dans une solution, la membrane cytoplasmique est négative ce qui entraîne naturellement la fixation des atomes métalliques (1--140). La fixation des métaux par des micro-organismes est une des applications les plus prometteuses. Ces éléments inorganiques ne peuvent pas être détruits, il faut les récupérer et de les recycler (1--27). En général l'activité des organismes est optimum lorsque la concentration métallique est inférieure à 200 ppm. Cette technique est utilisée soit sur des sites faiblement pollués soit en complément de techniques physiques ou chimiques qui permettent en amont de réduire la concentration des métaux. Leur dilution peut-être envisagée.

La toxicité par les métaux est en général due à l'inhibition d'enzymes différente selon les organismes. L'argent et le nickel sont moins toxiques pour *Geotrichum candidum* que pour *Zooglea ramigera*.. Il est nécessaire de travailler sur des mélanges de micro-organismes. Le Professeur Robert W. Peters de la School of Civil Engineering de Purdue University conseille d'acclimater les souches. Les biofilms permettent de résoudre le problème.

Le traitement des eaux industrielles est un marché évalué pour les Etats-Unis à 8 milliards de dollars par an avec une croissance faible qui se situe entre 1% et 1,5 %. Cette faible croissance s'explique essentiellement par les programmes volontaires lancés par les compagnies pour réduire leur consommation et leurs rejets en eau. Environ 30 % du

montant, 8 milliards de dollars de ce budget est destiné au traitement de nappes polluées qui renferment pour la moitié d'entre elles des métaux lourds. Le marché du traitement de ces eaux serait d'après la revue *Bioprocessing Technology* (BT) de 1,5 milliard de dollars en 1998 auquel il faudrait ajouter 230 millions de dollars pour le traitement des eaux de lixiviation des décharges. L'évolution de la politique fédérale de l'environnement entraînera, pour les sociétés, l'obligation de traiter ces eaux. Le traitement biologique prendrait, d'après cette revue un tiers du marché.

### Traitement U.S. des eaux contenant des métaux (1998)

Type d'opération	Total du marché Tout traitement (\$ millions/an)	Marché du traitement biologique (\$ millions/an)
Eaux (nappe)	1500	450
Décharge (lixiviation)	230	60
Total	1730	510

Source : *Bioprocessing Technology* January 1988.

Les chercheurs américains travaillent sur différentes techniques pour résoudre le problème. Une algue séchée est actuellement commercialisée, par Bio-Recovery Systems (18--4). Les métaux se concentrent sur des récepteurs membranaires et les algues sont immobilisées sur un polymère. L'ensemble est commercialisé sous la dénomination de "résine échangeuse d'ions : AlgaSORB ". La concentration obtenue est de plusieurs milliers de fois celle de l'eau. De plus les métaux peuvent être récupérés et commercialisés. Les eaux souterraines polluées peuvent être ainsi traitées et ramenées à des concentrations de métaux de quelques ppb. Des concentrations élevées de calcium, magnésium, sodium, potassium, chlore, sulfate, n'interfèrent pas avec la fixation (26--19). D'autres compagnies commencent à commercialiser de la cellulose modifiée par des enzymes ainsi que des xanthanes.

L'utilisation de la chitine a été mise au point par la Louisiana State University et un accord de licence exclusif vient d'être signé à Manville Corp. (Denver Co). Cette compagnie a acquis 20 % du capital de Bio-Recovery Systems.

Les compagnies qui vont commercialiser des procédés biologiques pour récupérer des métaux vont pouvoir passer des contrats avec de nombreux secteurs : fabricants de batteries, spécialistes de l'électrophorèse, toutes les industries qui utilisent l'or, le plomb... qui rejettent des effluents riches en ces métaux. A plus long terme l'exploitation minière et en particulier l'extraction de l'uranium pourrait utiliser cette technique.

Les chercheurs du National Engineering Laboratory travaillent sur l'isolement de bactéries qui fixent le cobalt dans les mines de l'Idaho . L'objectif est double, extraire le métal et traiter les eaux. L 'U.S. Bureau of Mines par son " *Vulnerable Strategic and Critical Metals Program* " a classé ce métal parmi les métaux stratégiques. Le cobalt est utilisé dans des alliages destinés à l'aéronautique et à l'espace. Au total 28 souches de bactéries capables de fixer le cobalt ont été isolées. L'objectif est de sélectionner les bactéries les plus performantes et d'améliorer les rendements de récupération (27--92).

Une souche semble avoir une activité nettement supérieure aux autres, mais il est bien difficile d'en savoir plus.

La propriété de fixer les métaux présente aussi des dangers. La baie de Minamata au Japon fut contaminée par du chlorure de mercure méthylé rejeté par une compagnie de plastique. Les microorganismes ont fixé le métal en le transformant en monométhyle de mercure. Les algues ingérées par les poissons qui furent mangés par les riveraines, beaucoup moururent (1--138).

#### **3-4-2-10 Le traitement des sols contaminés par des hydrocarbures : le Traverse Group Inc.**

D'après les Dr. E.B. Richie et R.R. Schnabel, la pollution est beaucoup plus grande qu'on ne le pense lors d'une fuite d'hydrocarbures. Ainsi E.A. Engineering Science and Technology Inc., a constaté que la porosité des barrières d'argile était modifiée en présence d'une très faible concentration de pétrole (10--109).

Le Traverse Goup Inc., a été créé par l'U.S. Coast Guard et l'EPA pour traiter par biodégradation les zones contaminées par des hydrocarbures ( benzène, toluène, xylène...) sous les pistes de décollage de l'armée américaine (Army, Navy Air Force). La technique mise au point à l'U.S. Coast Guard Air Station (East Bay Township, North Michigan), est maintenant considérée comme l' exemple à suivre pour traiter les

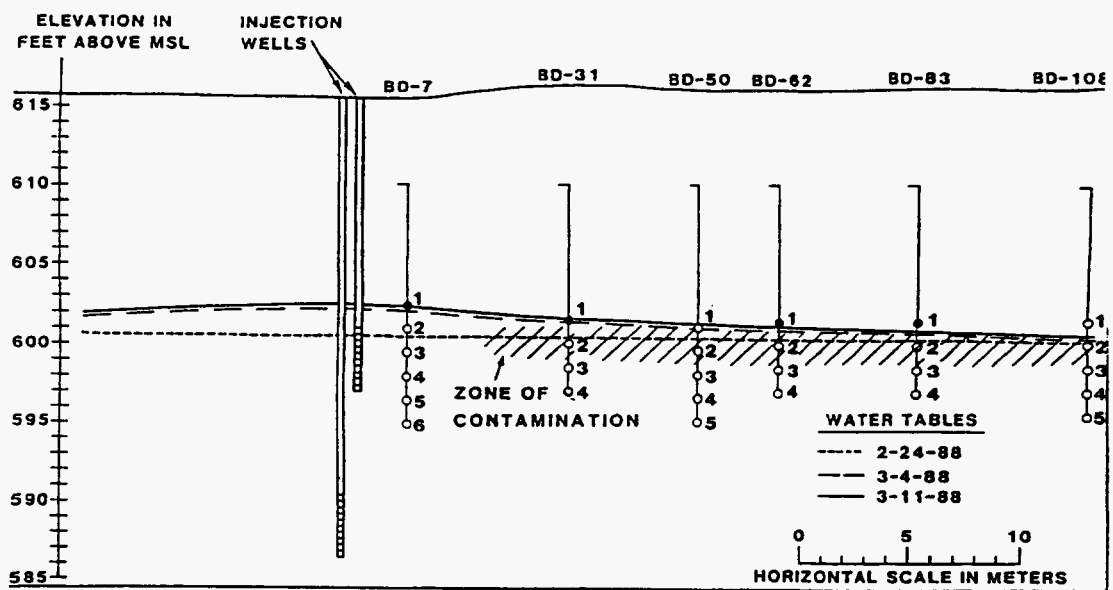
pollutions sous les pistes d'aviation. Ce problème est d'actualité puisque l'Administration Bush envisage de fermer une quarantaine de bases, qui devront être décontaminée avant de recevoir des activités civiles.

Des carottages doivent être effectués pour déterminer verticalement et horizontalement le volume. Lors d'un essai la pollution d'East Bay Township était circonscrite entre 15 et 17 pieds (5 à 6 mètres) sous le tarmac. Des échantillons du sol ont été prélevés pour évaluer la biodégradabilité en laboratoires. L'objectif est d'accélérer le processus naturel, la piste doit rester opérationnelle durant le traitement.

Deux rangées de puits d'injection de différentes profondeurs ont été forés. Les puits les plus profonds permettent d'injecter de l'eau pour élever le niveau de la nappe phréatique.

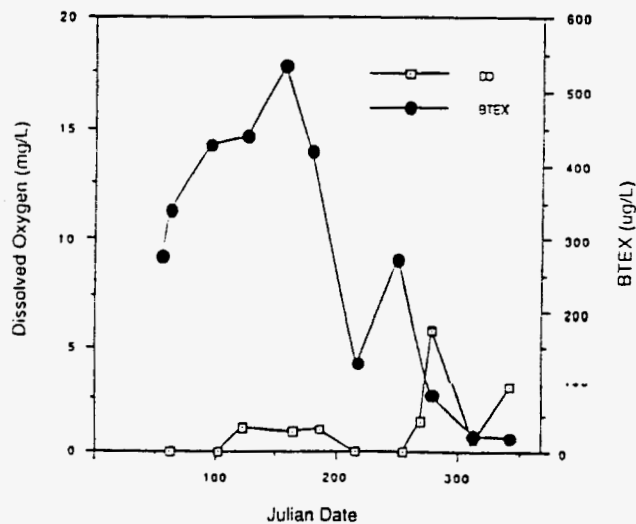
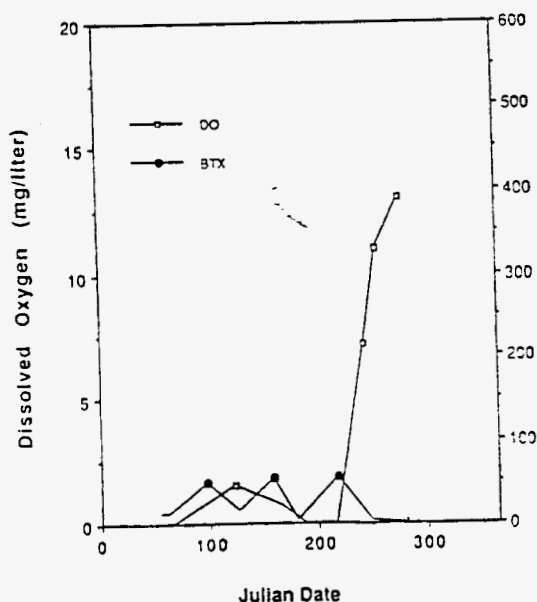
Des nutriments et de l'eau oxygénée sont injectés dans les puits les moins profonds. Une cinquantaine de petits puits permettent de rassembler des échantillons et d'analyser l'évolution de la dégradation.

En mars 1988 l'injection d'oxygène commença. L'injection des nutriments (chlorure d'ammonium, phosphate de potassium, et du phosphate de sodium) débuta en mai de la même année. En juin l'oxygène fut remplacé par de l'eau oxygénée à 50 mg/l pour accélérer le processus.



Cross section of a demonstration project for bioremediation of the aviation gasoline spill at Traverse City, Michigan.

Dans le cas du forage à 32 pieds (10 mètres) du puit d'injection la dégradation des alkylbenzènes (BTEX) a été totale après 270 jours. Il a fallu 330 jours pour le puits à 50 pieds (15 mètres).



6--286-287

Un second projet a été lancé en utilisant du nitrate au lieu d'oxygène. L'expérience est en cours.

### 3-4-2-11 Le problème posé des réservoirs souterrains :

La contamination provoquée par le contenu des cuves situées dans les stations services, est composée de nombreux produits chimiques.

PETROLEUM CONSTITUENTS	
Listed in decreasing volatility	
1-Pentene	
(n) Heptane	
(n) Hexane	
(n) Pentane	
Toluene	
Benzene	
Ethylbenzene	
(o) Xylene	
Naphthalene	
Phenanthrene	
Phenol	
Benz (a) Anthracene	
Benzo (a) Pyrene	

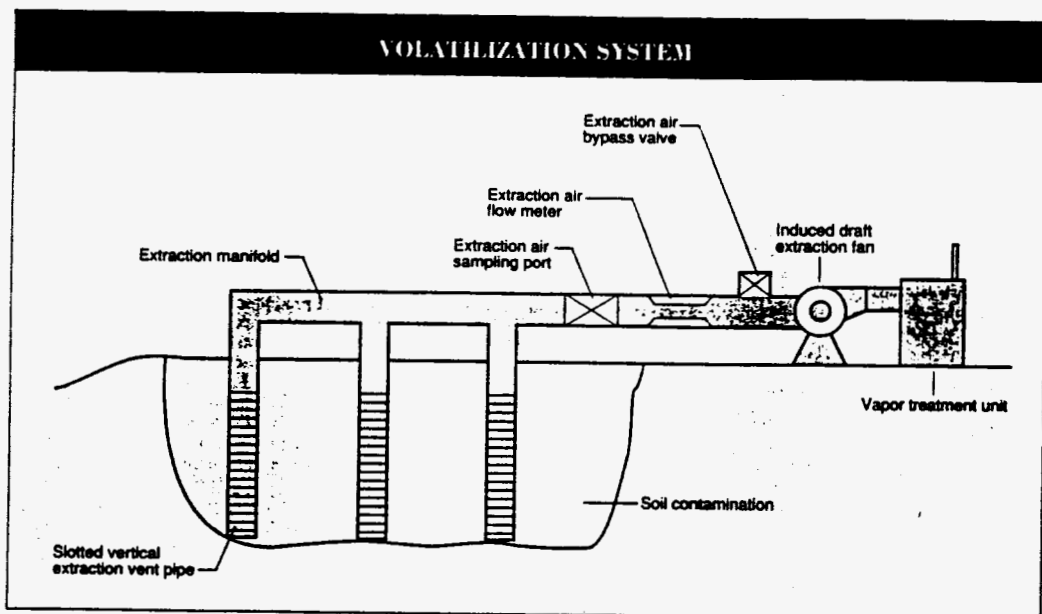
D'après Pollution Engineering December 1990--51

13 techniques sont actuellement disponibles. La biodégradation est classée en cinquième position, pour son prix de revient.

REMIEDIATION TECHNOLOGIES	
Technology	Relative cost
Volatilization (vacuum extraction)	Low
Passive remediation	Low
Soil piles	Low
Isolation/containment	Low to moderate
Biodegradation	Moderate
Land treatment	Moderate
Leaching	Moderate
Asphalt incorporation	Moderate
Solidification	Moderate
Excavation/disposal	Moderate to high
Chemical extraction	High
Vitrification	High
Thermal treatment	High

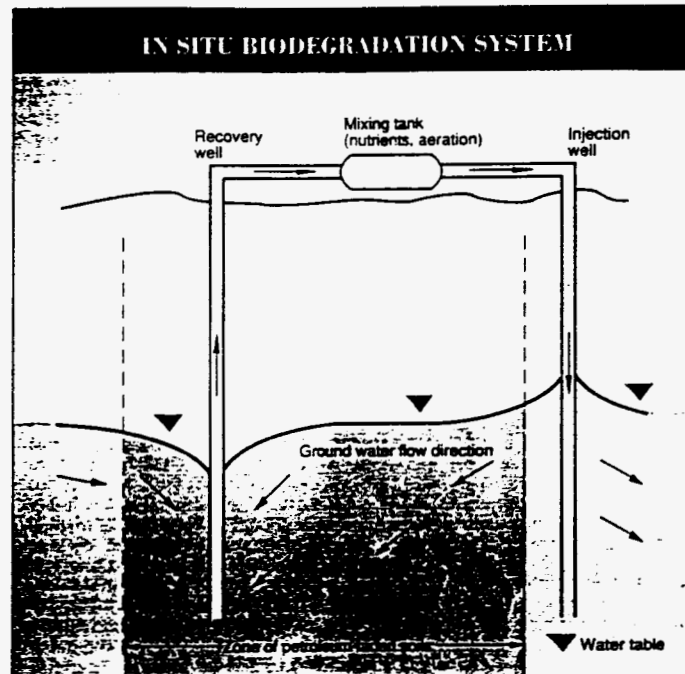
D'après Pollution Engineering December 1990--51

Pour les produits volatils un système de ventilation peut-être installé. Les propriétés physiques et chimiques du sol jouent un rôle important. Si le sol est poreux, des vapeurs se répandent loin de la zone de contamination. Par contre un sol argileux assure par contre une meilleure rétention des hydrocarbures. Le climat joue aussi un rôle, plus l'air est sec et plus la ventilation naturelle est importante quelque soit la nature du sol.



D'après Pollution Engineering December 1990--46

Le traitement par voie biologique est donc une possibilité. Son coût se situe entre 20 000 dollars et 200 000 dollars pour une station service. Il nécessite au moins un an pour un résultat correct. Cependant les compagnies préfèrent avoir recours à ce procédé qui permet une dégradation in-situ.



D'après Pollution Engineering December 1990--47

Dans certaines régions comme l'Arizona où la nappe phréatique est entre 100 m et 120 m de profondeur, la technique n'est pas utilisable, elle nécessiterait de trop gros investissements en forage, aspiration, et matériel puissant. Cette technique est utilisée lorsque le volume de sol contaminé est bien circonscrit ou lorsque la nappe phréatique est peu profonde.

Lorsque le traitement nécessite l'injection d'oxygène et de nutriments son coût est plus élevé.

### 3-4-2-12 Le traitement mixte

Bien souvent le traitement des déchets dangereux ne demande pas l'utilisation d'un seul mais de plusieurs traitements. Les eaux des industries pétrochimiques, des aciéries, contiennent de fortes concentrations de phénols, sels de cyanures, ammoniacque qui sont toxiques pour les organismes.

Il faut donc traiter chimiquement ou physiquement les eaux avant de faire agir des micro-organismes. Le traitement s'effectue donc en plusieurs temps.

Pour traiter les eaux de lixiviation des canadiens associent des traitements physiques et chimiques au traitement biologique anaérobie. Pour coaguler et stabiliser les substances polluantes il faut ajouter de la chaux, du carbonate de sodium et/ou du phosphate avant l'action des bactéries. L'élévation du pH permet de précipiter les métaux. Le traitement par voie biologique est alors possible.

Les déchets dangereux sont parfois dilués. Le Dr. Sheldon F. Roe (Cape Coral, Florida) étudie la réduction des volumes par évaporation. L'évaporation avant le traitement anaérobie permet de concentrer les substances à traiter, mais elle peut aussi se traduire par la floculation de particules qui ne seront plus dégradables.

Si la digestion anaérobie est effectuée en premier, l'évaporation va s'accompagner de l'émission de CO<sub>2</sub>, méthane, H<sub>2</sub>S... Il faut aussi séparer la matière solide. L'évaporation à température ambiante est utilisée, elle présente l'inconvénient d'être lente.

#### **3-4-2-13 Le traitement des vapeurs**

La technique consiste à absorber les substances odorantes qui se dégagent des milieux liquides ou solides lorsqu'ils se décomposent et de les dégrader par des micro-organismes. Les procédés sont nombreux, certains utilisent des biofiltres d'autres des colonnes ou les gaz barbotent. Les unités de compost, les compagnies agroalimentaires, les fonderies ... utilisent couramment cette technique aux Etats-Unis (10--108).

#### **3-4-2-14 Le traitement du charbon : l'approche de l'IGT et de JHU**

L'Institut of Gas and Technology (IGT) de Chicago a mis au point une bactérie capable d'absorber le soufre du charbon, réduisant ainsi l'acidité des pluies sans avoir à arrêter l'activité des mines de la région des Appalaches et du Middle-West. Le Clean Air Act de 1990 limite, pour chaque centrale thermique la masse des rejets de SO<sub>x</sub>. Cette mesure met en difficulté les exploitations de charbon de l'Est du pays dont les minerais sont riches en soufre. Par contre elle favorise les gisements des Rocheuses qui en sont pauvre. La découverte de l'IGT, si elle est mise au point à grande échelle et si elle est économique permettra de traiter le charbon et de maintenir le plein emploi dans une région actuellement touchée par la crise et le chômage.

Une autre bactérie convertit ensuite le charbon en méthane, la gazéification bien que lente ne demande l'apport d'aucune énergie (21). Au



moins deux autres équipes l'une chez Battelle et l'autre à Johns Hopkins University (JHU) travaillent aux Etats-Unis sur cette désulfuration suivie d'une gazéification. Dans cette dernière université l'équipe dirigée par le Dr. Robert Kelly a isolé une bactérie capable de dégrader du charbon très riche en soufre.

### 3-4-2-15 Biodégradation des composés aromatiques

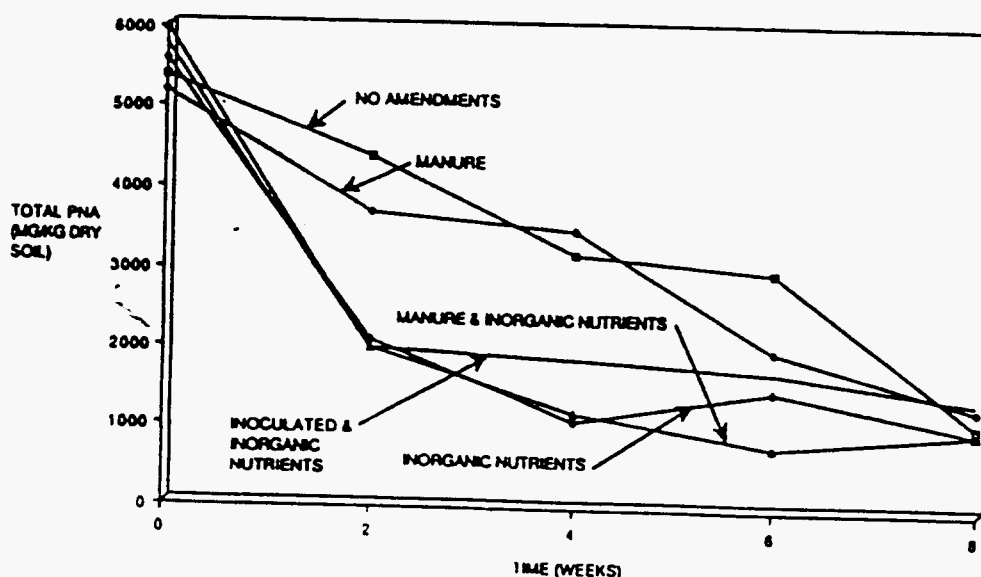
Ecova Corp. (Redmond-Washington) a poursuivi une étude durant vingt mois pour traiter des sols contaminés par des composés aromatiques (pentachlorophénols, naphthalène, phénanthrène). Le traitement dans une enceinte de type serre a permis au bout de 4 mois de faire passer le phénanthrène de 170 ppm à moins de 1 ppm. Des tuyaux permettent de distribuer l'eau, les nutriments et l'inoculum. Les émissions sont contrôlées par adsorption sur du carbone activé. 200 m<sup>3</sup> de sol contaminé furent ainsi traités en 94 jours avec une réduction de la pollution de 99%, après 131 jours le phénanthrène était en dessous de 0,33 ppm, la limite permise par l'EPA.

Le traitement du sol d'une ancienne scierie a permis de vérifier que les microorganismes présents étaient capables de minéraliser les composés aromatiques dans des proportions variables selon la molécule. Sur une grande superficie, dans ce cas 40 hectares, la dégradation est loin d'être uniforme et nécessite une redistribution, mais la conclusion d'Ecova est : "*Mineralization of most compounds tested can be achieved by microorganisms present in the site*". Dans tous les cas il faut activer le processus naturel en ajustant le pH, l'humidité, ajoutant des nutriments, ou/et en injectant de l'oxygène.

Plusieurs techniques ont été mises au point pour se débarrasser des composés aromatiques. Le traitement de surface est le plus simple, il permet de réduire considérablement la pollution

Ce traitement consiste à stimuler la dégradation sur une couche de 50 cm de profondeur (< 18 inches). L'oxygénation est fournie par un labourage, elle est obligatoire.

L'oxygénation et la présence d'eau suffisent pour que la dégradation des molécules soit assurée.



16--782

### 3-4-2-16 Le traitement des lixiviats :

Le problème des déchets de la lixiviation est sérieux. Il diffère selon la nature du sol, l'hydrologie, la pluviosité... La plupart des décharges anciennes sont polluées par les déchets de la lixiviation (1--198). L'installation d'un système de collecte est onéreuse lorsqu'il s'agit de l'adapter à une décharge ancienne.

La deuxième phase du traitement consiste à faire agir des bactéries. Le Department of Civil Engineering de la State University de New York, à Buffalo fait passer la solution sur du carbone activé après le traitement biologique pour fixer les composés organiques non-biodégradables (1--223).

Le traitement des eaux se fait en général de façon intermittente, en fonction des volumes récupérés.

La composition des lixiviats est complexe. Sur un site près de New York le Department of Civil Engineering de la State University a identifié une quarantaine de molécules.

POLLUTANTS IDENTIFIED FROM GC/MS SCAN  
AND CHEMICAL ANALYSES OF GROUNDWATER/LEACHATE

Pollutant identified above detectable limit	Concentration, ug/L
<u>Positively Identified</u>	
Methylene chloride	11,000
Acetone	42,000
trans-1,2-dichloroethane	3,500
2-Butanone	14,000
Benzene	1,500
4-Methyl-2-Pentanone	12,000
Toluene	4,300
Total Xylenes	1,600
Phenol	5,700
Aniline	5,600
2-Methylphenol	2,300
4-Methylphenol	15,000
2,4-Dimethylphenol	3,400
Iron, mg/L	96,000
Nickel, mg/L	2,600
COD, mg/L	1,950
TOC, mg/L	1,020
BOD <sub>5</sub> , mg/L	1,090
<u>Tentatively Identified</u>	
Ethyl benzene	620
Oxirane,2,3-Diethyl	28,000
2-Pentanol,4-Methyl	6,400
Benzene, Methyl	8,500
Formamide,N,N-Dimethyl	5,400
Butanoic acid	14,000
Ethanol,1-Methoxy-,Acetate	2,900
Benzene, ethyl-	940
Benzene,1,4-Dimethyl-	2,400
Pentanoic acid	6,300
Butanoic acid, 2-Ethyl-	2,300
2-Pyrrolidinone,1-Methyl	7,900
Benzenamine,N,N-Dimethyl	4,700
Hexanoic acid,2-Ethyl	4,200
Phenol,2,3-Dimethyl	20,000
Benzene acetic acid	1,700
Benzoic acid,3-Methyl-	5,200

Le traitement anaérobie permet une destruction des substances organiques qui se situe entre 90% et 96% avec une période de rétention dans les fermenteurs de 5 à 20 jours.

L'ensemencement des réacteurs est réalisé à partir de cendres de traitement urbains. En général un ajustement de pH est nécessaire pour que les bactéries puissent se développer.

### 3-4-3 Les problèmes

Les traitements biologiques dépendent des variations des paramètres de l'environnement. Le pH, la température, la concentration en oxygène jouent sur la cinétique de la croissance, sans oublier les métaux lourds qui sont des inhibiteurs. Un changement de climat peut affecter le développement des bactéries.

Le commensalisme est très important, toute disparition d'une espèce peut entraîner la disparition de l'ensemble. Dans des sols argileux contaminés l'utilisation de micro-organismes est impossible car l'alimentation en eau est très difficile. Devant tous ces aléas, l'objectif est d'optimiser l'activité des micro-organismes.

Une autre difficulté est de sélectionner les bactéries dans les zones contaminées et de les faire croître. Le Department of Chemical Engineering, Chemistry and Environmental Science du NJIT (New Jersey Institute of Technology) a montré que sur les 11 espèces de bactéries prélevées sur le Passaic Valley Sewerage Commissioners Wastewater Treatment Plant de Newark qui contient du phénol, seulement trois (*Klebsiella pneumonia*, *Serratia liquefaciens* et *Pseudomonas putida*) étaient capables de dégrader cette molécule.

Lorsque ces trois espèces sont achetées dans le commerce aucune dégradation n'est observée ce qui indique qu'en plus de l'espèce les lignées sont déterminantes, d'où les difficultés pour faire un autre traitement avec les mêmes souches. Chaque site est un cas particulier et doit être traité en tant que tel. Lorsque les espèces sont mélangées il semble qu'il y ait, dans certains cas production d'agents inhibiteurs à la croissance des autres organismes (1--314). Cette concurrence est un phénomène bien connu du règne végétal .

La firme Hercules qui a mis au point des réservoirs pour la culture des micro-organismes s'est heurtée à la prolifération imprévue de bactéries filamenteuses qui n'avaient aucune activité sur l'agent polluant. Leur présence est révélée par l'apparition de mousse à la surface des bassins. Le contrôle du pH a permis d'éviter le développement de ces organismes pathogènes et la dégradation de la nitroglycérine contenue dans les effluents a pu atteindre 99 %.

Cet ajustement du pH est déterminant. Ecova (Redmond, WA) a traité, avec des bactéries sélectionnées en laboratoire, des sols contaminés avec du pentachlorophénol (PCP), pesticide utilisé pour traiter les bois coupés. Dans un réservoir de 25 000 gallons contenant 15 à 30 m<sup>3</sup> de sols contaminés la dégradation obtenue a été satisfaisante en 14 jours, dans un autre réservoir il a fallu attendre 21 jours. La différence provient d'un mauvais contrôle du pH.

### **3-4-3-1 Les problèmes techniques**

En général le traitement par voie biologique a le gros inconvénient d' être long, les micro-organismes ont une activité décroissante lorsque la concentration du produit qu'elles doivent détruire diminue, de plus un certain nombre de problèmes se posent comme celui des dégagements gazeux.

#### **- Les odeurs**

La plupart des déchets qui se trouvent dans les eaux usées sont volatiles. L'Office of Air Quality Planning and Standards de l'EPA réglemente les rejets dans l'air. La biodégradation, l'incinération ou l'adsorption sur carbone peuvent être contre-productives. Une étude récente estime que dans les trois traitements 40 % du prix de l'opération est due au nettoyage des gaz afin d' éliminer les émissions malodorantes (6--223) .Les émissions sont réduites lorsque l'on utilise le bioréacteur OXITRON. L'injection d'oxygène et l'utilisation de carbone activé qui retient certains composés volatiles limitent la masse gazeuse rejetée.

### **3-4-3-2 Clean : " Clean enough"**

C'est un problème majeur. L'EPA demande que le pH des eaux rejetées après traitement soit entre 6 et 9 alors que le pH de l'eau en West-Virginie est de 4,86 avec une concentration de fer supérieure à celles permise dans les rejets (plus de 3,5 ppm) (10--154). Les difficultés que l'on a à régler des rejets sont flagrants. C'est la nature qui "viole la loi".

D'après l'Environmental Protection Systems (Fairlawn, New Jersey), la propreté du site ne peut être obtenue qu'au cas par cas avec le "Best Professional Judgement " (l' avis du professionnel).

L'objectif est différent si l'on veut restaurer le site dans son état initial ou si l'on veut éliminer les contraintes à l'homme ou à son environnement. D'après Remediation Technologies Inc. (Concord, MA), un

site est considéré comme traité quand les produits toxiques qu'il renfermait ne présentent plus de risques pour la santé. La notion demeure subjective.

Le traitement par voie biologique ne sous entend pas que tous les contaminants aient disparu. Cette destruction partielle autorise à travailler ou habiter sur le site traité. Les normes édictées par l'EPA sont respectées (6--64).

La notion de risque est différente aux Etats-Unis et en France. De nombreux produits ne sont pas réglementés de part et d'autres de l'Atlantique. Les Etats fédérés ont aussi leur propre législation.

#### 3-4-3-2-1 Destruction partielle ou totale : (?)

Le " Pennsylvania Department of Environmental Protection " est beaucoup plus laxiste que ne l'est l'EPA.

Le traitement ne peut être qu' une dégradation partielle. Il peut subsister des agents contaminants dans la mesure ou leur action soit " *benign to the environment* ". L'Alleghany County (Pennsylvania), qui devrait agrandir son aérodrome de un hectare est "tombé" "sur une ancienne carrière comblée durant cinquante ans par des déchets urbains et industriels et abandonnée depuis une vingtaine d'années. Plusieurs compagnies ont répondu à l'appel d'offre pour traiter les déchets par des techniques classiques. Le coût le plus élevé était de 7,5 millions de dollars. Le groupe Severson Environmental Services en collaboration avec Waste Stream Technology (WST), fut choisit pour traiter le site par voie biologique pour un montant de 5 millions de dollars. 15 produits contaminants furent trouvés, 4 n'avaient pas été découverts avant l'appel d'offre avec les concentrations suivantes : 21 300 ppm pour les huiles et les graisses, 1900 pour le xylène, 1200 ppm pour le naphthalène, 480 ppm pour le toluène. 24 000 tonnes de terrain furent extraites et étalées sur une surface de 2 hectares, surface qui avait été auparavant recouverte d'une couche synthétique imperméable similaire à celle utilisée pour les décharges classiques, une fosse de rétention d'un demi hectare a permis de retenir les liquides. WST a multiplié les bactéries dans un bioréacteur en prélevant les micro-organismes sur le site même, ainsi que dans une retenue d'eau située au voisinage. Le terrain futensemencé par un bouillon de culture. L' aération fut fournie par des labours successifs. A la fin de 1989, la concentration de toluène avait diminuée de 98%, celle de xylène de 99 %, les huiles de 58%. Le traitement se poursuit actuellement et la terre sera remise sur le terrain lorsque l'Etat considérera que les concentrations subsistantes sont " *benign to the environment*" (5--19).

### 3-4-3-2-2 La modélisation et le risque

La modélisation est nécessaire pour prévoir les effets futurs du développement de la technologie. L' EPA a publié un rapport " Modeling Remedial Actions at Uncontrolled Hazardous Waste Site" pour aider les compagnies à trouver le bon modèle. Il faut ensuite essayer la technique et voir si les résultats confirment les hypothèses. Chaque technique a ses limites et ses inconvénients. Il est impossible de tout standardiser. Il convient de regrouper les informations sur des bases de données afin de pouvoir comparer les résultats (10--159).

Les compagnies doivent prendre une assurance avant d'entreprendre tout traitement. Pour un stockage son coût se situe entre 11 et 12 dollars pour un gain de 100 dollars. Les compagnies qui traitent sont leurs propres assureurs, car il est difficile de trouver une compagnie susceptible de prendre un risque jugé trop important.

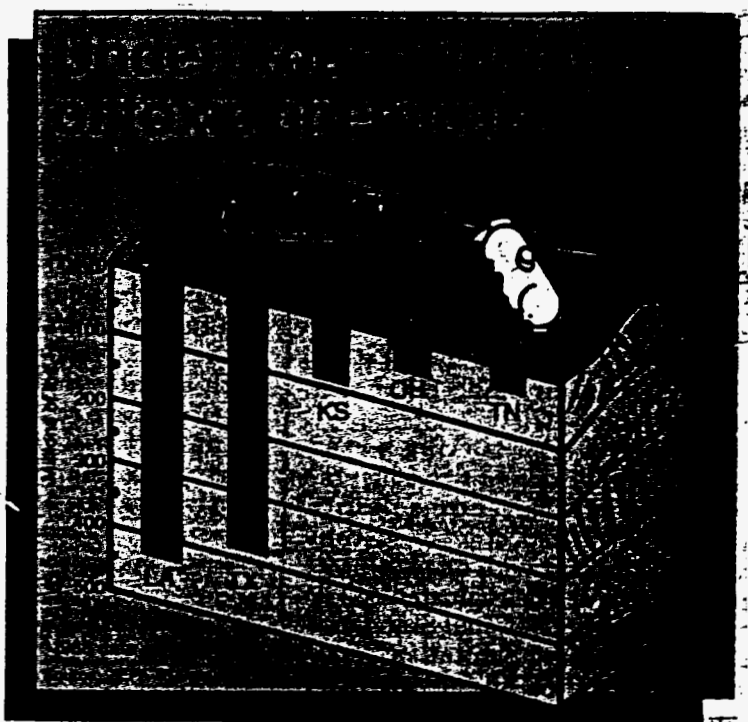
La biodégradation ne présente que peu de danger. Le public pourra avoir des craintes lorsque l'on utilisera des bactéries modifiées génétiquement. Cette technique n'est cependant pas pour demain bien que de nombreux micro-organismes modifiés génétiquement aient déjà été lâchés dans la nature pour prévenir la gelée des plantes, ou pour lutter contre certaines pestes.

## 4- Les développements futurs

### 4-1 Le DOE Deep Subsurface Microbiology Program et recherches en milieux hostiles :

L'objectif de ce programme est de chercher en profondeur la présence de micro-organismes capables de dégrader des substances toxiques. Le Woods Hole Oceanographic Institution (Massachusetts), célèbre pour ses recherches en eaux profondes, a découvert dans le Golfe de Californie des bactéries anaérobies vivant à 1800 mètres, bactéries capables de dégrader le naphthalène (13--98).

En Caroline du Sud des bactéries ont été découvertes dans des sédiments à 200 mètres de profondeur. Anaérobies, inconnues jusqu'alors elles viennent aussi d'être trouvées par l'U.S. Geological Survey (USGS), dans des sédiments profonds du Potomac. En l'absence d'oxygène elles dégradent le toluène, le benzène, et des hydrocarbures aromatiques. (28--1). On pense que ces bactéries sont capables de détruire une partie des produits toxiques injectés dans le sol de certains Etats comme la Louisiane et le Texas.



30--1

L'objectif de la recherche de bactéries en milieux hostiles est de trouver des organismes nouveaux proliférant à des températures élevées sous des hautes pressions, dans des milieux où la concentration en métaux toxiques est importante. Ces propriétés devraient permettre de traiter des déchets toxiques. Des bactéries ont été trouvées dans les geysers du Yellowstone National Park vers 1970. Depuis cette date on en a aussi trouvé au fond des puits de pétrole, sous des laves du Mt. St. Helens et dans les "black smoker chimneys" du Pacifique à des températures de 350 ° C. et à des pressions de 250 atmosphères (29--654).

L'injection souterraine pratiquée aux Etats-Unis, est peut-être la solution si ces bactéries sont capables de dégrader des déchets toxiques. La densité de bactéries reste cependant très faible en profondeur, mais les connaissances en ce domaine sont encore fragmentaires.

#### 4-2 Le cas des PCBs

Les PCBs sont l'exemple même d'une pollution dont on n'a pas su, au départ contrôler et analyser les effets. Du fait des propriétés diélectriques de sa molécule, le PCB a été utilisé dans les transformateurs à partir de 1929. Aux Etats-Unis, 5 millions de kilogrammes ont été commercialisés, et de par le monde 2 milliards de kilogrammes ont été produits dans les usines. Le PCB existe sous 103 configurations différentes. Certaines comme les diphényles bichlorés peuvent être réduites facilement, par contre les diphényles tétra et hexachlorés sont réfractaires et la



biodégradation est quasi impossible (12--52). D'une façon générale la biodégradation décroît lorsque la quantité d'halogènes augmente sur la molécule. La toxicité évolue dans le même sens.

L'Oak Ridge Reservation (Tennessee) possède des zones polluées avec du PCB. Des études préliminaires réalisées par le Dr. Terry Donaldson, ont montré que lorsque la concentration dépassait plusieurs centaines de mg/kg l'incinération était le procédé le plus économique. La biodégradation est une technique envisageable lorsque la concentration est inférieure à 100 mg/kg. Les espèces indigènes dégradent les PCBs.

Les analyses par divers laboratoires ont cependant produit des résultats contradictoires ou tout au moins divergents. Les chercheurs travaillent pour déceler les conditions optimales au développement, en sélectionnant les organismes les plus performants et en effectuant des manipulations génétiques. L'utilisation de bactéries anaérobies capables de déchlorer la molécule est envisagée. Ces molécules sont isolées dans les sédiments des rivières ou des lacs.

Bioremediation Inc. travaille sur le PCB avec des champignons au niveau du site de Richmond (Utah). L'objectif est de démontrer qu'aucun sous-produit dangereux ne se forme et qu'aucune substance volatile ne se dégage. L'expérience se heurte à une difficulté à priori insoluble. La réduction du PCB est de 50 % en huit semaines puis cesse. D'après General Electric, une décharge contenant des PCBs renferme au moins 100 types différents. Chaque bactérie catabolise un ou plusieurs types de PCB et l'on conçoit très bien que certains PCB soient ignorés par les micro-organismes. Il faut quelque fois une dizaine d'années pour qu'apparaisse des bactéries capables de dégrader certaines molécules, elles apparaissent par mutations naturelles. Alors la molécule disparaît très rapidement(17--56).

Une question de fond demeure. Pourquoi certaines bactéries renferment un gène qui dégrade une molécule récemment synthétisée?

On conçoit logiquement que les bactéries soient plus aptes à décomposer le très ancien pétrole ... malgré la présence de 30 000 molécules différentes !(21).

La biodégradation du PCP (pentachlorophénol) peut-être réalisée dans un réacteur en présence de plusieurs espèces de micro-organismes. En général 6 semaines sont nécessaires pour arriver à une concentration de 0,5 mg/kg. Keystone Environmental resources Inc. (Monroeville, Pennsylvania) a mis au point une dégradation anaérobie in-situ du PCP. Le Michigan Biotechnology Institute a confirmé la réaction en utilisant *Methanobacterium ivanovii* qui tolère des concentrations de l'ordre de 14 ppm, la dégradation dépasse 60 %.

Bioremediation Inc. (San Diego, California) a effectué des essais sur des sites de l'Utah Power et du Light Idaho Falls où les champignons dégradent la créosote. L'expérience s'est poursuivie normalement lorsque les conditions atmosphériques étaient bonnes. En novembre la dégradation s'est arrêtée. Le champignon a repris son activité au printemps. Cette constatation n'a rien d'original puisque le métabolisme de nombreux organismes est conditionné par la température.

L'équipe du Biological Sciences Branch de General Electric, dirigée par Ronald Unterman a montré qu'en laboratoire, *Cornebacterium sp.MB1*, *Alcaligenes eutrophus H 850*, et *Pseudomonas putida LB 400*, étaient excellentes pour dégrader les PCBs. Durant les essais il a été démontré que MB1 et LB 400 dégradaient 95 % des PCBs en un jour (1--377). In situ des résultats comparables furent obtenus alors que l'on pouvait imaginer que le PCB absorbé dans les particules du sol était beaucoup moins accessible aux micro-organismes. Il n'en fut rien, on doit noter que l'expérience a été réalisée avec un excès d'eau, 1,0 ml d'eau pour 0,1 g de sol. Des essais sont actuellement réalisés afin d'établir une corrélation entre biodégradation et humidité du sol. Les travaux de modélisation du phénomène permettront d'optimiser les dégradations futures.

#### **4-3 Les collections de microorganismes : Sybron Chemicals et LSU**

Aux Etats-Unis, l'American Type Culture Collection rassemble tous les organismes naturels ou modifiés génétiquement. La plupart des compagnies de biotechnologie ont leurs propres collections. Biotrol (Minnesota) a ainsi des colonies de *Flavobacteria* capables de dégrader des pentachlorophénols qui sont appliqués sur les planches pour tuer les autres bactéries avant leur utilisation comme matériaux de construction. Les *Flavobacteria* sont appliquées lorsque les bois sont recyclés ou utilisés comme source de combustible. Les rejets atmosphériques de substances susceptibles d'être toxiques sont alors nulles.

Sybron Chemicals commercialise 30 lignées de bactéries capables de dégrader des substances polluantes. La technique est simple. Les chercheurs se rendent sur des sites contaminés par des substances dont on connaît précisément la nature chimique et prélèvent des échantillons. Après culture ils sélectionnent les organismes les plus performants. Lors des essais les organismes peuvent être mélangés afin d'élargir leur champ d'application. Lors de traitement de zones polluées par de l'essence 3 espèces sont appliquées simultanément sur le sol afin de dégrader les benzènes, xylènes et toluènes (19--78).

Le Department of Civil Engineering de la Louisiana State University a développé durant une période de trois ans une culture de micro-organismes (champignons et protozoaires parmi lesquels *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Azomonas*, *Beijerinckia*) capables de dégrader les hydrocarbures, y compris le diesel. La culture est supérieure à toutes les autres et permet de venir à bout de concentration de polluant allant jusqu'à 24 %. On atteint une dégradation de 80 à 90 % par l'emploi du mélange. L'expérimentation et la mise au point de la technique se poursuit en laboratoire (6--289).

#### 4-4 Les recherches futures

Cette technique n'en est qu' à ces débuts, il faudra poursuivre la recherche dans de nombreuses directions (10--166):

- développer des unités pilotes en faisant de multiples essais avec des organismes nouveaux. Toutes les espèces de pluri-cellulaires vivant à la surface de la terre n'ont pas encore été découvertes, on imagine donc l'importance du travail à faire sur des micro-organismes qui ont, de plus, une aptitude importante à muter du fait de la rapidité de la cynétique de leur cycle.

- développer des méthodes ultrasensibles, en présence de déchets complexes. Une bactérie peut s'attaquer à un déchet les pollutions sont toujours des mélanges.

- développer des techniques complémentaires aérobies / anaérobies.

- améliorer génétiquement des organismes qui peuvent traiter les déchets in-vitro.

- déterminer les fréquences d'application des micro-organismes. Dans le cas d'un traitement in-situ la dégradation obtenue est souvent différente si l'on applique les organismes en une seule dose ou par épandages successifs (1--361).

#### 4-5 Le cas particulier des déchets de laboratoires :

Les universités, centres de recherches, hôpitaux rejettent des solvants qui exigent un traitement approprié (6--403). La compagnie INEL Biotechnology (Idaho Falls) s' est spécialisée dans l' isolement des

micro-organismes qui ont la propriété de dégrader des solvants utilisés dans les laboratoires, comme les toluènes, chloroforme et éther. La quantité produite par chacun d'entre eux est petite mais hétérogène.

Le traitement s'impose car la mise en décharge est interdite. Les micro-organismes furent collectés sur des sites contaminés et la détermination, grâce aux kits (trousses) de Flow Laboratories a permis de sélectionner une espèce de *Chromobacterium* et de *Pseudomonas aeruginosa* et de les tester sur divers substrats.

Growth of bacteria in media containing different substrates.

Substrate	Concentration ul/ml	<i>Chromobacterium</i> sp.	<i>P.aeruginosa</i>
Acetonitrile	25.0	++	++
Aceramide	30.0	++	++
Acrylonitrile	0.1	-	-
Acrylamide	0.1	-	-
Benzonitrile	0.1	-	-
Butyronitrile	5.0	++	++
Isobutyronitrile	5.0	++	++
Malononitrile	0.1	-	-
Methacrylonitrile	5.0	++	++
Methacrylamide	10.0	++	++
Propionitrile	10.0	++	++
Propionamide	10.0	++	++
Succinonitrile	10.0	++	++
Valeronitrile	5.0	++	++
Phenylitrile	0.1	-	+

- + Positive growth on PBA plates containing the particular substrate tested within 4 days.
- ++ Abundant growth on PBA plates containing the particular substrate tested within 4 days.
- No growth even after 7 days of incubation on PBA plates containing the particular tested substrate.

6--412

Plusieurs isolats se sont avérés capables de décomposer le p-xylène et le toluène, en 70 heures (6--408). Cet isolat fut cultivé sur de l'agar-agar avec 100% de p-xylène. La croissance du micro-organisme et la dégradation furent notées. D'après INEL- Biotechnology, c'est la première fois qu'un résultat est observé (6--409).

#### 4-6 Le traitement des déchets radioactifs :

Comme on peut le penser l'objectif n'est pas de se débarrasser des produits radioactifs, mais de les concentrer à l'aide d'organismes

vivants. La technique a été développée par le Dr. Brendlyn D. Faison de l'Oak Ridge National Laboratory. Les bactéries attirent les particules radioactives comme le fait un aimant pour le fer. La biofiltration serait beaucoup moins chère et beaucoup plus efficace que les méthodes actuelles pour fixer ces produits. Une simple filtration permet alors de se débarrasser de la radioactivité, le sédiment obtenu peut être ensuite traité ou entreposé. L'approche ne consiste donc pas à faire disparaître ou décomposer le corps ou la molécule, mais à concentrer. Dans le cas d'une contamination comparable à celle de Chernobyl, le traitement peut-être très économique. Les tests ont été effectués sur une bactérie *Micrococcus luteus*, qui fixe instantanément le strontium. Après traitement des eaux contaminées, la concentration est indétectable, quelques ppb. L'équipe de l'Oak Ridge travaille actuellement sur des algues pour fixer le césium.

Parallèlement l'équipe du Dr. Marios Tsezos de la McMaster University à Hamilton, Ontario, développe depuis 10 ans des unicellulaires capables de fixer des éléments radioactifs, en particulier l'uranium. Les champignons et des bactéries sont tués et immobilisés sur des polymères. Pour des raisons qui ne sont pas connues, certainement des sites sur les membranes, les atomes d'uranium sont fixés. Une unité pilote est en service depuis plus d'un an pour traiter les eaux près d'une mine d'extraction du minerai. Après traitement les eaux ont une contamination inférieure au maximum permis par la loi (30).

## 5- Le marché

### 5-1 Les évaluations de Technical Insight et de Bioprocessing Technology:

Le coût prohibitif des procédés classiques de traitement, des règlements stricts concernant les rejets atmosphériques, et une attitude de plus en plus favorable de l'EPA envers des technologies innovantes, conduisent à penser que le traitement biologique des déchets jouera un rôle important dans les années à venir. Le biotraitement peut permettre de réduire les coûts pour ceux qui devaient obligatoirement passer par l'incinération. La biodégradation permettra de transformer de nombreux déchets toxiques en substances non toxiques et ceci sans faire appel à des procédés chimiques ou physiques. La biodégradation serait dix fois moins chère que l'incinération, qui est toujours considérée aux Etats-Unis comme le moyen le plus sûr pour se débarrasser des substances dangereuses (21).

Cependant cette dernière technique présente le gros inconvénient de générer des cendres toxiques qu'il faut entreposer.

Aux Etats-Unis le marché de la biodégradation en y incluant les services est moins de 100 millions de dollars, il se situerait d'après Technical Insight autour de 70 à 75 millions de dollars. Pour Enviroquest cette méthode n'est encore qu' à ses débuts. Mr. Eric Weber directeur de Hazardous Waste Consultant a précisé ... " *une des difficultés pour estimer le marché est le fait que le biotraitement n'est pas encore bien ancré dans les esprits. La technologie est floue* " (10--157). Cependant des grands groupes comme Waste Management et IT Corp. offrent cette technique parmi leur service (13--96).

D'après Sue Markland Day, du Center for Environmental Biotechnology, University of Tennessee à Knoxville, la biodégradation prendra dans un avenir proche de 5 % à 10 % du marché du traitement des déchets dangereux.

Le magazine Bioprocessing Technology, prévoit que le traitement par voie biologique sera surtout développé pour les déchets contenant des métaux qu'il faudra fixer. Ce seul marché atteindra 510 millions de dollars en 1998. Pour Mr. Richard Cassin, CEO de Bioremediation Inc. (San Diego, California) on devrait arriver a un chiffre d'affaires voisin de 1 milliard de dollars par an. Une étude récente publiée en mai 1991 par Bioprocessing Technology évalue le marché américain en l'an 2 000 à 1,5 milliard de dollars.

**Marché de la biodégradation aux Etats-Unis  
(produits et services en millions de dollars)**

	1990	1995	2000
Hydrocarbures	52	131	525
Créosote	23	56	225
Solvants	23	56	225
Municipaux- Agro-métaux	52	131	525
Total	150	374	1500

D'après Bioprocessing Technology May 1991 (2--4).

Le marché mondial risque d'être très important. Le Koweït pourrait devenir un champ d'expérience pour dégrader biologiquement le pétrole répandu par l' explosion des puits pendant la guerre du Golfe. Dans les pays développés la fermeture des décharges et les réglementations strictes pour l'incinération vont inciter les compagnies à tenir compte de la méthode(2--4).

On estime qu' actuellement 200 compagnies américaines environ travaillent sur l'utilisation des micro-organismes pour dégrader les substances toxiques dont certains grands groupes comme DuPont, GE, ....

Le premier marché est celui de l' " adaptation sélective ". La technique est relativement simple et correspond à ce que certains appellent " la pêche à la ligne ". Le polluant estensemencé avec un ensemble de micro-organismes (voir 3-2-1-4), celui qui se développe est isolé et commercialisé.

## 5-2 Comparaison des coûts de traitement

D'après Remediation Technologies Inc. le coût de traitement des déchets se situerait entre 50 et 1000 dollars la tonne. La biodégradation étant avec la stabilisation chimique le procédé le moins cher.

Procédés de dégradation	Coût dollar/ tonne
Biodégradation	50-100
Stabilisation chimique	50-100
Traitement thermique	200
Incinération sur site	300-400
Incinération en dehors du site	1000

D'après : Remediation technologies Inc. june 4 1990.

Ce n'est que récemment que économie et environnement se sont rejoint. Sur les 600 millions de tonnes de déchets dangereux, y compris les rejets des mines, et les liquides rejetés chaque année aux Etats-Unis une faible partie est traitée par voie biologique. Le marché est évalué au minimum à 85 milliards de dollars. On comprend qu'avec un marché

potentiel important de nombreuses compagnies se tournent vers ces méthodes qui sont considérées comme " une technique douce"(19--77).

La firme Sybron garantit, lorsque ses microorganismes sont adaptés aux produits un coût de traitement situé entre 30 et 50 dollars la tonne. Cette fourchette est voisine de celles proposée par ses concurrents. YWC Midwest fait payer entre 20 et 70 dollars et Groundwater Technology de 40 à 100 dollars. La moitié de ces sommes sont consacrées aux analyses préliminaires et bien souvent à la mise au point en laboratoire. Des échantillons sont utilisés pour déterminer la souche la plus apte à traiter la pollution.

Environemental Remediation Inc. (Baton Rouge) (Louisiana), a fait une offre de 15 millions de dollars pour traîter 170 000 m<sup>3</sup> de sol contaminé sur l'emplacement d'une ancienne raffinerie de Kansas City (Missouri). Deux fosses contenant des huiles souillées et des goudrons sont situées sur le site. Les offres d'autres firmes utilisant des procédés plus classiques et conventionnels étaient de 45 millions de dollars(5--20). On comprend dans ces conditions que ce traitement soit préféré.

Le " producteur " de déchet souhaite s'en débarrasser au moindre coût tout en se pliant aux normes imposées par le gouvernement pour éviter les " bombes à retardement ". Cependant des compagnies qui par le passé ont respecté les réglementation héritent des décharges anciennes, qu'elles doivent traiter à grands frais.

On comprend que la mise en décharge soit la solution de facilité pour les compagnies qui privilégient le court terme. Le traitement biologique doit être compétitif par rapport aux autres possibilités(1--30).

### 5-3 Les limites du traitement biologique :

99,9999 % est la BDAT (Best Demonstrated Available Technology). Si le traitement biologique ou chimique ne peut pas atteindre les 6 "9", la seule option qui demeure est l'incinération. L' EPA permet cependant une certaine flexibilité, celui qui a en charge le déchet peut demander une exemption, dans ce cas l'Agence accorde au cas par cas les limites à ne pas dépasser (1--32).

La complexité de certains déchets et les mélanges font que si l'on demande une destruction de 6 " 9", seule l'incinération permet à coup sûr d'atteindre cet objectif. De plus il est impossible de vérifier qu'il n'y ait pas de " migration", lors du traitement "in-situ", et que des " poches" de déchets ne subsistent pas. Voici quelques années, il était difficile à l'EPA de justifier le traitement biologique. Le Congrès admet maintenant que cette



technique est acceptable. La tolérance est beaucoup plus grande aujourd'hui que par le passé car l'ampleur du problème est connu.

Le traitement par voie biologique est possible si :

- la destruction des déchets est complète (?).
- les micro-organismes sont capables de concentrer les substances polluantes.
- les micro-organismes ont un champ d'application étendu.
- l'application d'une même technique à plusieurs sites est possible, c'est à dire que l'on ne se trouve pas en face de mutations ou de variation biologique lors de la dégradation.
- le prix de revient de cette méthode est acceptable par rapport aux d'autres.

Les produits susceptibles d'être dégradé sont aussi une des limites de cette méthode. Il y a actuellement 60 000 produits chimiques commercialisés aux Etats-Unis et, depuis 10 ans 200 à 1 000 nouvelles molécules sont commercialisées annuellement (1).

D'après Mr. Alan Rotzich du Department of Civil Engineering de l'University du Delaware le traitement physico-chimique des déchets organiques s'impose lorsque la concentration des toxiques est inférieure à 1 mg/l. L'incinération est préférable lorsque la pollution en poids est supérieure à 1%. Le traitement par voie biologique serait préférable entre ces deux valeurs.

## 6- Conclusions :

L'utilisation des micro-organismes est donc limitée comme nous l'avons signalé (3-3-2-1). La popularité de la technique est un élément favorable.

La destruction ne peut pas aller au delà de quelques ppb et peut dans le cas d'un traitement in-situ être très longue. Pour certaines molécules comme la dioxine le but peut ne pas être atteint. Des souches oligotrophes, capables de dégrader des substances qui se trouvent à des concentrations inférieures au ppb pourraient être développées à l'avenir. Mr David Potter, d'Hercules Incorporated concluait sa présentation lors d'une conférence sur ce sujet organisée à Arlington en juin 1986 en précisant : "*Perhaps most important, all of the results demonstrate that with patience and proper process control and acclimation, conventional biological treatment processes are capable of successfully treating acutely toxic wastewaters*" (1--418).

D'une façon générale ce sont les molécules simples à l'état pur qui peuvent être dégradées. La situation est très bien résumée par *Environment Today* " *Clients should deal only with multiple-service firms and/or have their needs examined by independent assessment firms*" (5--20). Le degré de dégradation est difficilement prévisible, car des facteurs externes peuvent inhiber la réaction et le contrôle est difficile. Pour les autres techniques des normes ont été établies, l'incinération doit être complétée à 5 ou 6 " 9". Le gouvernement fédéral se pose la question de savoir si des standards comparables devront être arrêtés pour juger la méthode biologique.

Le développement de réacteurs de plus en plus performants est l'objectif des chimistes, microbiologistes et ingénieurs. D'après les chercheurs américains, le Technical University Hamburg-Harburg serait à la pointe dans la conception d'engins ultra-performants.

Reste à arrêter des protocoles d'application. Le BAC (voir § 1), se propose d'ici la fin 1991 de publier des standards pour la pollution par le pétrole, bien que le puissant American Petroleum Institute n'en voit pas l'utilité. L'objectif du BAC est de permettre aux Coast Guard, dont l'un des rôles est de coordonner le traitement lors de marées noires, de pouvoir envisager ce mode de traitement en temps réel. Ensuite le deuxième objectif est de proposer un deuxième protocole pour le traitement des sols contaminés. Du fait des aléas liés aux multiples caractéristiques des sols, et aux milliers d'agents polluants, avec un nombre de combinaison et de concentrations illimités, il ne faut pas s'attendre à la publication de normes avant de nombreuses années, et nul doute que la parution des propositions au *Federal Register*, avec appel aux commentaires entraînera de nombreux débats à travers tout le pays.

Enfin certains prônent la "*passive remediation*", c'est à dire qu'ils conseillent de ne pas intervenir et de laisser faire la nature, c'est à dire de laisser aux micro-organismes le temps de nettoyer. Les progrès en biotechnologies permettront d'avoir raison des agents polluants les plus stables.

Une des contraintes du système est les problèmes associés à la division cellulaire et aux échanges de DNA qui peuvent se produire lors de la mitose. Une mutation peut entraîner une modification de l'activité. La présence de résidus pourrait aussi être préjudiciable. La réaction doit être complète si l'on veut que cette technique soit adoptée. Les déchets n'ont pas une concentration toujours constante, de brutales variations peuvent être catastrophiques(1--30).

Comparée à d'autres méthodes la biodégradation in-situ a le gros avantage d'être peu chère, en particulier, par rapport à l'incinération.

*Références*

- 1- Biotechnology for Degradation of Toxic Chemicals in Hazardous Wastes by R.J. Scholze, Jr, et al.
- 2- Bioremediation : an Emerging Market Poised fo Rapid Growth in the 1990's Look for a \$ 1,5 billion industry by 2 000. Bioprocessing Technology May 1991.
- 3- Degradation path for dichlorophenol found by Rudy Baum C & EN 1-7-1991.
- 4- The envirotech race : A moral imperative by James D. Snyder Environment Today January/February 1991.
- 5- Bioremediation : respectable at last by James D. Snyder Environment Today November/December 1990.
- 6- Biotechnology Applications in Hazardous Waste Treatment- Editors : Gordon Lewandowski.
- 7- Superfund 89 HMCRI's 10 th National Conference & Exhibition.
- 8- Speeding bioreclamation of contaminated sites by X Chemical Week 11-21-1984.
- 9- Modified Biochemical Methane Pottential (BMP) Assays to Assess Biodegradation Potential of Landfilled Refuse by Bogner, Rose, Piorkowski NTIS . PC A03/MF A01 1989.
- 10- Bioremediation of Industrial Wastes by Technical Insights N° 143 1990.
- 11- Biotreatment-The Use of Microorganisms in the Treatment of Hazardous Materials and Hazardous Wastes. HMCRI's Second National Conference November 27-29-1989
- 12- Bioremediation -Experts- Hazmat World january 1990.
- 13- The Tinst Toxic Avengers by Robert D. Holf BW june 4 1990
- 14- The Superfund Innovative Technology Evaluation Program EPA/540/5-90/001.

**15-** Fungus Shows Promise in Hazardous Waste Treatment by Pamela Zurer C & EN September 1987.

**16-** HMCRI's 11th Annual National Conference & Exhibition Superfund 1990.

**17-** Microbes to the Rescue by Sharon Begley Newsweek june 19, 1989

**18-** Metal-Containing Wastes : Biological Treatment can recover metals. 1998 U.S. Market to reach \$ 510 million Bioprocessing Technology january 1989.

**19-** The Poison Eaters by Susan Chollar Discover april 1990.

**20-** Environmental Factors Dictate Choice of Specific Bioremediation Method by Kate Devine Genetic Engineering News may 1990.

**21-** Toxic Waste : Bacteria to the Rescue by Barnaby Feder NYT june 27, 1990.

**22-** Test of Oil-Eating Microbes Starts in Gulf by William Booth WP june 16 1990.

**23-** Galveston Bay Bioremediation by X Chemical Marketing Reporter august 13 1990.

**24-** Consumer mart Eyes Bacteria-Produced Surfactant. Chemical Marketing Reporter june 6 1990.

**25-** Bug Eats Explosives by X Inside R&D March 29 1989.

**26-** Abstract Proceedings ; Second Forum on Innovative Hazardous Waste Treatment Technologies : Domestic and International, Philadelphia, Pennsylvania May 15-17, 1990.

**27-** Bacteria to Mine Cobalt Chemical Engineering Progress july 1990.

**28-** Bacteria feed on organics U.S. Water News Vol 7, 1 July 1990.

**29** Hot Bacteria, The oceans' cauldrons hold life forms we're just beginning to exploit. by Douglas Clark & Robert Kelly Chemtech, November 1990.

**30- Underground injection of Toxic Chemicals U.S. Water News Vol. 7 N° 3 September 1990.**

*Documents consultés mais non cités dans l'étude :*

- **Dead Microbes Help to Harness Uranium by David Stipp- WSJ- Bioremediation Removes Gasoline Residues by Kevin G. Robinson Pollution Engineering August 1990.**

- **Remediation of Petroleum Contaminated Soils by Jim Newton Pollution Engineering December 1990.**

- **Bacteria Role Is Hailed in Gulf Oil Cleanup NYT July 12 1990**

- **Bioremediation. Microorganisms cleaning up on hazardous wastes. Chemical & Engineering News. August 26, 1991.**

- **Summary of Innovative vs Established Treatment Technologies For Source Control at Superfund Sites. Chemical Engineering Progress. August 1991.**

- **Let the microbes do the eating. Industry Week. August 5 1991.**

- **Determining in situ biodegradation, facts and challenges by Eugene Madsen, Environmental Science & Technology October 1991**

# INSTITUT DE RECHERCHES HYDROLOGIQUES

S.A.R.L. AU CAPITAL DE 650.000 F - RC NANCY B. 756.800.090  
CCP NANCY 20041 01010 0141065J031 27 -SIRET 756.800.090.00083 - APE 8301

11bis, rue Gabriel Péri - B.P. 286 - 54515 VANDOEUVRE CEDEX  
Téléphone : 83.50.36.00 Télécopie : 83.50.36.99

## S O M M A I R E

- A OBJECTIFS ET DEROULEMENT DE L'ETUDE
  - B CONTEXTE INDUSTRIEL
  - C L'ETAT DE L'ART EN RECHERCHES ET DEVELOPPEMENTS
  - D LES AXES DE RECHERCHE PRIORITAIRES
- 
- ANNEXE Rapport détaillé sur "L'état de l'art en recherches et développements de biotechniques appliquées au traitement des déchets"

## A - OBJECTIFS ET DEROULEMENT DE L'ETUDE

## A - 1. Objectifs de l'étude

L'objectif central de cette étude est de présenter l'état de l'art sur les biotechnologies appliquées au traitement des déchets. En exposant les connaissances acquises, les activités de recherche et développement, les réalisations industrielles et les perspectives techniques et économiques, il est possible de dégager des axes de recherche importants ainsi que des pistes de développement de procédés pilotes ou industriels. Les termes "biotechnologies" et "déchets" ayant un champ d'utilisation très large, il a été nécessaire de préciser le type de biotechnologies et le type de déchets pour lesquels la documentation serait rassemblée.

En ce qui concerne les biotechnologies, les applications considérées au cours de l'étude sont les suivantes :

- valorisation partielle ou totale des déchets,
- décontamination des déchets,
- élimination partielle ou totale des déchets,
- lutte contre les nuisances et risques immédiats liés aux déchets.

Dans chacun des cas, on s'intéresse à l'ensemble de la filière de traitement utilisant les biotechnologies même si certaines étapes de transformation sont des procédés physiques ou chimiques.

En ce qui concerne les déchets, les catégories retenues sont :

- les déchets solides industriels (les déchets ménagers tels que les ordures ménagères et les boues de station d'épuration ainsi que les résidus agricoles ne sont pas étudiés particulièrement),
- les matériaux naturels contaminés par des polluants industriels (sol, sous-sol),
- les déchets liquides industriels (les eaux usées municipales et les boues liquides qui en résultent ne sont pas prises en compte),
- les émanations gazeuses, malodorantes ou toxiques, générées par les déchets industriels solides ou liquides.

### A - 2. Démarche suivie

A partir d'une collecte d'informations bibliographiques, médiatiques et commerciales et de la consultation d'organismes extérieurs nationaux et étrangers, les actions menées dans le domaine sont classées, analysées et commentées pour en dégager :

- les principaux axes de recherches et développements (IRH),
- les réalisations concrètes intéressantes (UTC),
- les perspectives techniques et économiques (UTC).

Ces trois points sont étudiés en s'appuyant sur la connaissance des possibilités de la microbiologie et du génie des procédés.

### A - 3. Déroulement de l'étude

L'étude a commencée par une prise de contact générale au niveau français et européen en parallèle avec l'étude menée aux Etats-Unis par Monsieur BERNON. Cette prise de contact a pris la forme d'une enquête par courrier diffusée assez largement (UTC).

Parallèlement à cette enquête, la participation à des congrès, l'achat d'études et des interrogations de bases de données bibliographiques ont permis de rassembler une documentation importante sur le sujet (IRH et UTC).

L'analyse de la documentation scientifique et technique permet de faire le point sur les connaissances et les recherches en cours (IRH).

Les résultats des enquêtes et la documentation technique et commerciale donnent la possibilité de mettre en place un système de documentation sur les réalisations concrètes et de distinguer les perspectives technico-économiques des biotechnologies appliquées au traitement des déchets (UTC).



## B - CONTEXTE INDUSTRIEL

## B - 1. Le développement des biotechnologies

Le développement actuel des biotechnologies pour modifier des procédés de fabrication et surtout pour élaborer de nouveaux produits cache souvent une histoire très ancienne du traitement biologique de la matière inerte ou vivante. Aujourd'hui, elles ont un impact économique important au niveau mondiale et font l'objet d'actions de la Commission des Communautés Européennes [C. du GRANRUT et L. SAMANIEGO, 1991]. En effet, depuis des millénaires, l'homme utilise les biotechnologies pour préparer, conserver et améliorer sa nourriture et ses boissons et même pour produire certains textiles ou utiliser les vertus médicinales des plantes. Ces applications initiales appartiennent au domaine de l'agro-alimentaire et de la pharmacie qui restent aujourd'hui les deux domaines principaux d'application des biotechnologies.

Les procédés utilisant la fermentation se sont vraiment développés, pour leur part, vers la fin du dix-neuvième siècle en même temps que l'essor impressionnant de l'industrie chimique grâce aux progrès de la chimie analytique et de la chimie de synthèse. Les travaux de Pasteur et Büchner donnent des bases solides pour le développement de la microbiologie et de l'immunologie.

La première moitié du vingtième siècle voit se développer, en concurrence ou complémentarité, procédés chimiques et biotechnologiques pour la production de substances chimiques avec une avance des biotechnologies pour les composés organiques complexes (substances d'origine biologique, antibiotiques, stéroïdes, vitamines, acides aminés, ...).

La deuxième moitié du vingtième siècle est caractérisée par le début du génie génétique qui modifie considérablement les possibilités techniques et économiques des procédés biotechnologiques jusque-là chers et peu productifs (insuline humaine par exemple).

Aujourd'hui les connaissances scientifiques et techniques sur les biotechnologies ont donné naissance à de nombreuses applications dans la chimie, la pharmacie, l'agriculture et maintenant l'environnement. Trois raisons principales expliquent l'intérêt des biotechnologies :

- c'est une alternative souvent intéressante économiquement face aux procédés de transformation chimiques ou physiques,
- c'est un domaine où le champ d'innovation reste très ouvert,
- c'est une source de diversification pour les industriels.

## B - 2. Une production importante de déchets très diversifiés

On considère généralement trois types de déchets en fonction de leur source [ANRED, 1991] : les déchets ménagers non considérés dans cette étude (environ 30 millions de tonnes/an en France), les déchets de l'agriculture et des industries agro-alimentaires (environ 400 millions de tonnes/an en France) pour lesquels seuls les déchets de l'industrie agro-alimentaire sont considérés (30 à 50 millions de tonnes/an en France), et les déchets industriels (environ 150 millions de tonnes/an en France), principal objet de la présente étude. L'industrie, dont l'objectif premier est la production, génère une grande quantité de matières tout au long des filières de fabrication qui ne sont pas des produits valorisables directement. Certains sont des sous-produits valorisables par des filières particulières, d'autres sont des déchets dont l'industrie veut se séparer. Ainsi des déchets industriels, tout aussi diversifiés que complexes dans leur composition et leur structure, doivent être gérés en préservant au mieux l'homme et son environnement [SNIIM, 1988]. Les problèmes de caractérisation qu'ils soulèvent illustrent bien leur diversité [ANRED, IRH et INSA, 1984].

D'abord diversifiés par leur état physique, les déchets industriels sont des rejets gazeux, des rejets liquides et surtout de nombreux déchets solides plus ou moins composites. Ces déchets solides sont obtenus soit directement dans les filières de production, soit par l'intermédiaire du traitement des rejets gazeux ou liquides (poussières, cendres, boues...), soit après dépôt volontaire ou accidentel dans l'environnement (sols et sous-sols contaminés).

Diversifiés ensuite par les risques associés, les déchets industriels sont classés en déchets inertes (environ 100 millions de tonnes/an en France), déchets banals assimilables aux ordures ménagères et redevables du même type de traitement (environ 32 millions de tonnes/an en France) et déchets spéciaux spécifiques de chaque activité industrielle et présentant des risques plus ou moins grands (environ 18 millions de tonnes/an en France). Au sein de cette dernière catégorie, on distingue des déchets dangereux dont l'élimination nécessite des moyens de traitement spécifiques en raison des risques importants qui les caractérisent (environ 2 millions de tonnes/an en France).

Diversifiés enfin par leur composition, les déchets industriels spéciaux, en particulier, sont très variés : des déchets organiques plus ou moins liquides (hydrocarbures, goudrons, solvants usagés, boues de peinture...), des déchets minéraux liquides (bains de traitement de surface, acides de décapage...) et des déchets minéraux solides générés directement (sables de fonderie, sels de trempes cyanurés...) ou par des procédés de dépollution (boues d'hydroxydes métalliques, boues d'épuration d'eaux usées, résidus de traitement des fumées, cendres volantes...).

## B - 3. Des filières biologiques de traitement

Les filières de gestion des déchets industriels sont nombreuses [M. MAES, 1991]. Certaines filières permettent une valorisation en générant de l'énergie, des matières recyclables ou des amendements agricoles, d'autres filières utilisent différents types de traitement générant des déchets solides ultimes qui sont ensuite mis en décharge en minimisant les risques pour l'homme et son environnement. Les procédés utilisés sont principalement thermiques (incinération, pyrolyse), physico-chimiques (séparation, solidification, détoxification) et biologiques (détoxification, séparation).

Les procédés biologiques sont utilisés depuis longtemps pour l'épuration des eaux usées municipales et de certaines eaux usées industrielles [Innovation 128, 1990]. De même, la valorisation agricole par épandage est classiquement utilisée pour les déchets agricoles et de l'industrie agro-alimentaire ainsi que pour des boues de station d'épuration biologique. Enfin, la mise en décharge des ordures ménagères a longtemps été considérée comme un confinement s'accompagnant d'un traitement biologique permettant, malgré son imperfection, une certaine stabilisation et une production potentielle de gaz de méthanisation. Ceci-dit, le développement des procédés biotechnologiques pour le traitement d'autres types de déchets plus toxiques s'affronte à des limitations techniques tout en restant souvent une alternative intéressante en termes d'efficacité et de coût grâce à la très grande diversité des mécanismes d'action des organismes sur la matière qui peuvent être mis en jeu dans les procédés biotechnologiques [Innovation 128, 1991 ; GERME S.A., 1990 et 1991].

#### B - 4. Des processus de traitement mal maîtrisés

La diversité des déchets générés et des problèmes de traitement à résoudre montre le champ d'action potentiel pour le développement de nouvelles technologies. Cependant, nos connaissances restent limitées sur les mécanismes mis en jeu, ce qui rend difficile la conception, l'optimisation et la mise en oeuvre de nouveaux procédés. Aussi, les biotechnologies ne se développeront rapidement dans le cadre du traitement des déchets qu'avec la compréhension et la maîtrise des mécanismes prépondérants mis en oeuvre dans les différents procédés envisagés [GERME S.A., 1990 et 1991 ; R.C. SIMS, 1990 ; G. LEWANDOWSKI et al., 1988 ; A.W. BOURQUIN , 1989].

Quatre domaines particuliers nécessitent une attention accrue :

- les mécanismes d'action des organismes vivants et la capacité de ces organismes à les mettre en oeuvre au niveau des déchets : la physiologie et la génétique sont à la base de ce domaine d'investigation (axe central du schéma qui suit).
- les conditions de développement et de fonctionnement des organismes au contact des déchets : l'écologie s'intéressant à l'influence des facteurs physiques, chimiques et biologiques du milieu permet d'aborder ces problèmes fondamentaux dans la mise en oeuvre des procédés biotechnologiques (partie gauche du schéma).
- les facteurs qui influencent l'action effective des organismes au sein des déchets et liés à la mobilité respective des substances dangereuses et des organismes : l'étude des effets de structure et de composition des déchets sur la biodisponibilité des polluants et la biocolonisation des déchets est nécessaire à l'optimisation des conditions de traitement biologique (partie droite du schéma).
- la conception pratique d'installations industrielles performantes : le génie des procédés, au vu des connaissances acquises sur l'ensemble des mécanismes fondamentaux et des facteurs limitants possibles, permet de rechercher des configurations de bioréacteurs optimales (base du schéma).

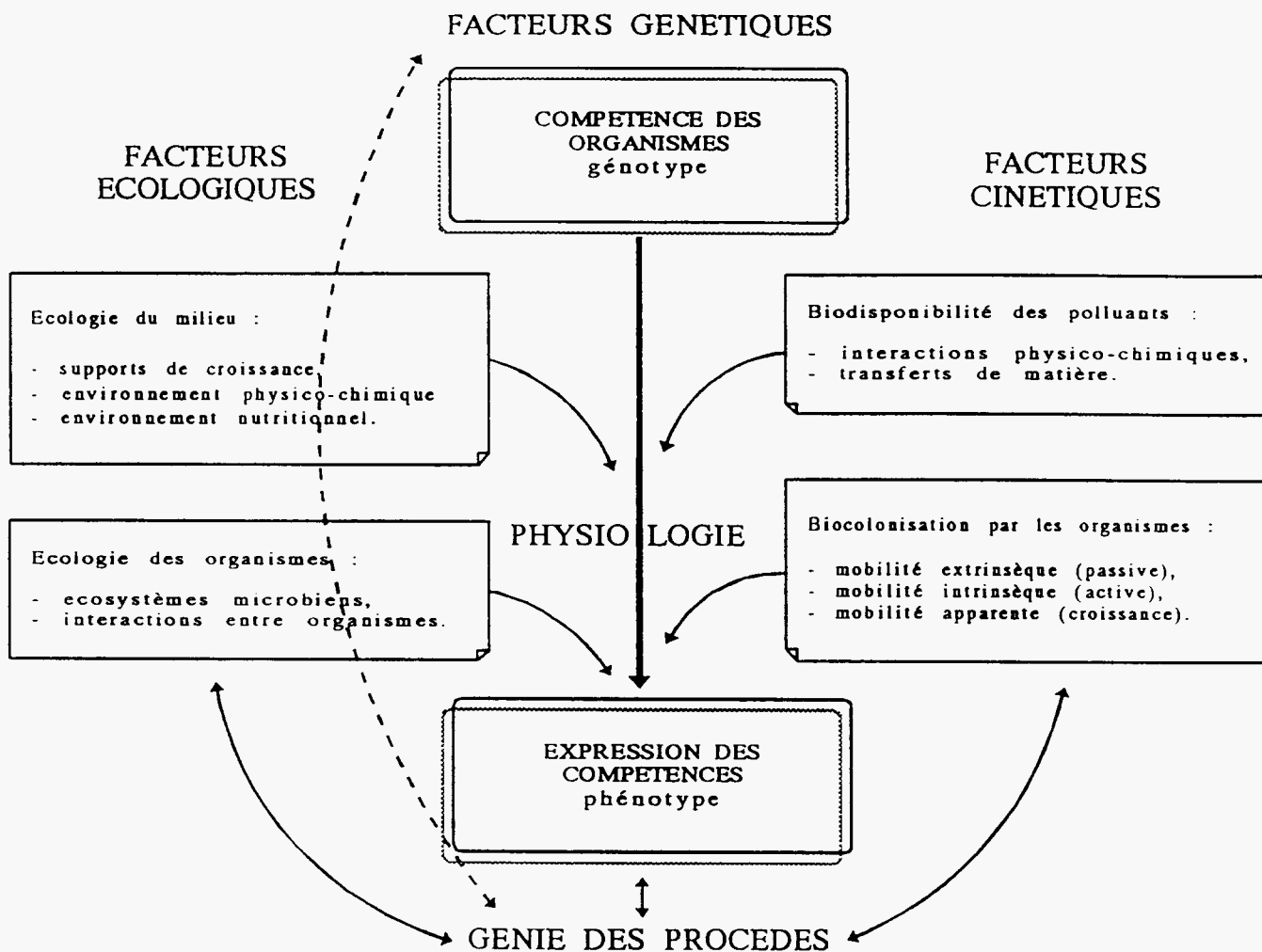


Schéma synthétique : Les facteurs de l'efficacité des biotechnologies appliquées au traitement des déchets et autres matériaux contaminés par des substances dangereuses

## C - L'ETAT DE L'ART EN RECHERCHES ET DEVELOPPEMENTS

L'ensemble des documents bibliographiques consultés au cours de cette étude, et en particulier ceux qui constatent les limites de certaines techniques de décontamination des sols, font ressortir les quatre domaines d'action précédents. De plus ces domaines sont abordés en général par des scientifiques spécialisés en biochimie, physiologie, écologie, chimie, agronomie ou hydrogéologie suivant le sujet abordé. En conséquence, l'approche globale est rarement présentée du fait de la pluridisciplinarité caractéristique de l'application des biotechnologies environnementales.

Ainsi, la synthèse bibliographique qui a été réalisée n'est pas strictement une revue de littérature mais plutôt une discussion organisée autour de la phénoménologie du traitement biologique des déchets, et des méthodologies d'approche de ces phénomènes dans un esprit d'analyse systémique (voir le rapport détaillé en annexe).

Dans l'objectif de développer des procédés de traitement biologiques performants, les recherches et développements menés doivent aboutir à une meilleure gestion des facteurs limitants que sont :

- 1) les facteurs génétiques, par les compétences des organismes utilisés comme outils biotechnologiques et l'expression potentielle de ces compétences au travers de la physiologie ;
- 2) les facteurs écologiques, par les facteurs du milieu où se développent les organismes et qui conditionnent l'expression des compétences ;
- 3) les facteurs cinétiques, par les processus dynamiques réglant la biodisponibilité des polluants et la biocolonisation par les organismes ;
- 4) la conception des procédés, par l'ensemble des apports du génie des procédés quant à l'application industrielle des acquis précédents.

### C - 1. Aspects génétiques et physiologiques

La composition élémentaire de la matière vivante nous suggère que seules les molécules contenant du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène ou de l'azote voire du phosphore pourront être transformées en grande quantité par intégration directe dans les réactions métaboliques (traitement des pollutions organiques ou minérales comme les nitrates ou les phosphates). D'autre part, l'activité des organismes vivants génère des modifications physico-chimiques importantes dans leur environnement immédiat en raison de systèmes membranaires sélectifs et actifs. Ces modifications ont une importance particulière dans le traitement des pollutions métalliques ou de certaines pollutions organiques dont la disponibilité et faible vis-à-vis des organismes.

La métabolisation directe des substances a donc des applications pour les résidus des productions agricoles et agro-alimentaires ou les déchets minéraux contenant de l'azote, du phosphore ou du potassium, par contre dans le cas des substances dangereuses, elle est souvent limitée. La dégradation des substances organiques polluantes s'effectue plutôt en parallèle du métabolisme central et de très nombreuses substances xénobiotiques sont ainsi biodégradables. Seulement des composés intermédiaires plus

toxiques peuvent apparaître et il faut envisager une dégradation complète pour être sûr d'une réelle détoxification.

Dans le cas des pollutions métalliques, les métaux ne peuvent disparaître, ils peuvent cependant être mobilisés (biolixiviation) ou immobilisés (bioaccumulation) par des procédés biotechnologiques. Dans le cas des déchets solides, la biolixiviation peut être un moyen d'améliorer l'extraction en solution d'une contamination métallique. Par contre la bioaccumulation est un piège potentiel pour les métaux toxiques ou certains polluants radioactifs qui peut s'employer pour des déchets fluides ou même des sols (bioaccumulation dans des plantes).

Ainsi, les recherches sur la biodégradation et la biolixiviation des toxiques ainsi que sur les mécanismes métaboliques associés sont des domaines où la recherche a encore beaucoup à apporter bien que les organismes compétents ne semble pas manquer dans la nature, même en l'absence d'intervention génétique directe.

### C - 2. Aspects écologiques

Une fois que l'on dispose d'un outil biotechnologique qu'il s'agisse d'une souche pure, d'une communauté microbienne ou de communautés couplées, il est nécessaire de s'intéresser à l'inoculation, en développement et surtout un maintien des organismes vivants en contact du déchet à traiter. L'étude de cet environnement en termes de conditions optimales ou limites pour l'activité des organismes relève d'une analyse des facteurs du milieu physique, chimique et biologique. Cette étude écologique des outils biotechnologiques est fondamentale dans la conception des procédés de traitement et de leur pilotage mais reste peu étudiée aujourd'hui.

L'étude des supports biologiques aptes à fixer les outils biotechnologiques pour mieux les contrôler dans la pratique industrielle est le domaine le plus avancé. Des matériaux synthétiques ou naturels sont disponibles et connus pour être de bon supports. De plus des technologies basées sur des structures communautaires comme les biofilms et les biogranules se sont développées.

L'étude de l'environnement physico-chimique et nutritionnel s'est limitée jusqu'à aujourd'hui aux nutriments principaux nécessaires au développement des microorganismes (C, N, P) et aux composantes globales de la physico-chimie du milieu (pH, Redox). Si les conditions optimales de développement des microorganismes sont à peu près connues (laboratoire), l'influence des modifications de milieu rencontrées (industrie ou site naturel) sur l'activité de ces mêmes organismes est mal comprise et nécessite des recherches plus poussées.

Enfin les interactions entre organismes, obligatoires dans certains cas (dégradation anaérobie), utiles dans d'autres cas (compétition) ou parfois gênantes (antagonismes) sont peu abordées et leur étude se limite souvent à des constatations. Un effort est nécessaire ici pour la compréhension du fonctionnement des écosystèmes microbiens qui aura sans doute pour effet une augmentation du potentiel des biotechnologies dans tous les domaines.

Dans les trois domaines exposés, l'étude des supports de cultures, des apports de substances chimiques correctrices ou nutritives, et la compréhension des complémentarités ou incompatibilités entre organismes permet de mieux préparer l'étape

de conception des procédés biotechnologiques. Elle conditionne en effet le choix des méthodes de sélection des organismes compétents et de production d'un outil biotechnologique opérationnel, le choix des matériaux support éventuels, et celui de la composition des apports en solution au cours du fonctionnement du procédé.

### C - 3. Aspects cinétiques

Si les aspects génétiques et écologiques règlent en grande partie la faisabilité des procédés biologiques, des aspects cinétiques vont permettre d'agir sur l'efficacité des transformations. Il s'agit d'une part des interactions physico-chimiques et des limitations au transfert de matière influençant la disponibilité biologique (biodisponibilité) des polluants. Il s'agit d'autre part de la mobilité des organismes dans le milieu qui va conditionner la colonisation biologique du déchet (biocolonisation). Cette mobilité est soit passive lors du transport des organismes dans de l'eau s'écoulant au travers du matériau, soit active quand les organismes disposent de systèmes moteurs propres, soit apparente par simple croissance de la communauté en nombre.

L'étude de la biodisponibilité commence juste à être approfondie. Elle dispose d'outils préexistant dans la modélisation des interactions physico-chimiques et des transferts en milieu poreux et dans les méthodologies d'études, mais leur application à la compréhension de la biodisponibilité reste à réaliser. Cette voie de recherche semble la plus prometteuse en termes d'amélioration de l'efficacité des traitements biologiques. Enfin la biocolonisation des déchets et sols contaminés ne dispose aujourd'hui d'aucun résultat scientifique ou technique permettant d'en comprendre les phénomènes prépondérants.

### C - 4. Les apports du génie de procédés

Une fois réunies, les données génétiques, physiologiques, écologiques et cinétiques doivent aboutir à la conception de procédés industriels de traitement des déchets. Les méthodologies du génie des procédés permettent par une approche systémique de proposer des configurations d'installation comprenant un ou plusieurs bioréacteurs adaptés à chaque situation rencontrée. Le passage d'un mécanisme biologique observé au laboratoire à une unité industrielle de traitement biologique nécessite un certain nombre d'étapes comme celle du pilote industriel. Faute de temps et de moyens, la méthodologie théorique n'est pas toujours suivie avec souvent des conséquences sur la viabilité future du procédé.

Dans certains cas même, une approche empirique permet de mettre en place des procédés opérationnels. Ainsi, on dispose aujourd'hui de systèmes de traitement biologiques de déchets au stade industriel, certains disposant d'un certain acquis scientifique et technique et d'autre basés principalement sur une démarche empirique sans garantie à long terme. Le génie des procédés est donc nécessaire pour faire le lien entre la recherche et le développement de procédés pour adapter les installations industrielles et leur contrôle aux connaissances acquises progressivement sur les processus mis en jeu et les moyens disponibles pour les piloter. Depuis le laboratoire jusqu'aux procédés in situ en passant par les installations industrielles fixes ou mobiles, les grandes lignes des procédés sont déjà établies, il reste à les valider et à les optimiser en concevant des procédures de contrôle basées sur la connaissance des processus de transformation.

## D - LES AXES DE RECHERCHE PRIORITAIRES

Quelque soit l'option de traitement choisie en fonction de la faisabilité des transformations biologiques et des caractéristiques propres à chaque cas (type de déchet, état physique et chimique du déchet, contraintes techniques et économiques liés à la quantité de déchet ou à l'étendue de la zone contaminée), les données physiologiques et écologiques sont à la base de l'étude de faisabilité et d'optimisation des procédés. Ensuite, la connaissance des facteurs limitant la biodisponibilité des polluants vis à vis des mécanismes de transformation et la biocolonisation par les organismes est fondamentale pour une amélioration de l'efficacité des traitements. Enfin, les configurations technologiques de traitement peuvent varier fortement en fonction de chaque cas réel rencontré. Ainsi, l'étude de cas concrets et la validation en vraie grandeur de nouvelles configurations parfois couplées à des traitements non biologique (physico-chimique, thermique...) est indispensable à la bonne maîtrise de ces techniques en plein essor.

## D - 1. Inventaire des compétences d'organismes en tant qu'outils biotechnologiques

Les possibilités du génie génétique, si elles sont théoriquement intéressantes, nécessitent une meilleure maîtrise pour être appliquées sans incertitudes de risques vis à vis de l'homme et de son environnement. Parallèlement aux études de génie génétique, de nombreuses compétences ont pu être mises en évidence ces dernières années au sein de communautés naturelles (biodégradation des produits xénobiotiques tels que des organochlorés, des hydrocarbures polycycliques aromatiques, des polychlorobiphényles, des pesticides, ... biolixiviation de métaux précieux, bioaccumulation de métaux lourds et de radionucléides ...). L'information sur ces compétences reste encore très disséminée et nécessite d'être regroupée et complétée. Pour ce faire, la découverte de nouvelles compétences au sein des communautés d'organismes naturellement présents dans les écosystèmes doit être une source privilégiée d'outils biotechnologiques.

## D - 2. Etudes des niches écologiques et du fonctionnement des écosystèmes microbiens dans les déchets

La première limite rencontrée dans les procédés biotechnologiques est le maintien en continu de la culture compétente surtout dans des conditions relativement variables en raison de l'hétérogénéité des déchets traités. Seule une bonne connaissance des contraintes écologiques liées à chaque culture permettra un suivi et un contrôle effectif du fonctionnement optimal des procédés biotechnologiques. En particulier, si l'acidité, les conditions d'oxydo-réduction, la salinité et les nutriments majeurs sont étudiés précisément, les interactions entre les divers organismes vivants d'une communauté sont peu étudiées et devraient aider à l'optimisation des conditions d'application des biotechnologies, et ce dans un domaine plus large que le traitement des déchets.

## D - 3. Etude, modélisation et contrôle de la biodisponibilité des polluants et de la biocolonisation dans les déchets

La deuxième contrainte importante du traitement des déchets solides est l'ensemble des limitations aux transferts des polluants vers les zones où les transformations nécessaires à la dépollution s'opèrent. Ces limitations dont les origines sont les interactions physico-



chimiques entre le polluant et les substances présentes dans le milieu, ainsi que les étapes de transferts par diffusion, convection et dispersion dans le milieu, déterminent la biodisponibilité des polluants. Cette notion intégrant à la fois la mobilité du polluant vers les organismes actifs et celle des organismes ou des substances qu'ils génèrent vers le polluant, semble être une source potentielle d'amélioration des techniques actuelles de première importance. Ces améliorations passent par la mise en évidence, la compréhension, la modélisation, la validation puis le contrôle des mécanismes prépondérants de limitation.

#### D - 4. Validation et optimisation de procédés biologiques existants pour le traitement des déchets

Si dans les domaines pharmaceutiques et agro-alimentaires, les biotechnologies n'ont plus à faire leurs preuves, dans le cadre du traitement des déchets, la situation est différente face au traitement thermique par exemple. Certaines technologies biologiques sont encore appliquées de manière empirique et donc dans des conditions qui ne sont pas optimales. Il est sûr que l'amélioration constante des connaissances sur les mécanismes des transformations mises en oeuvre permettront d'améliorer des procédés déjà utilisés. De plus, beaucoup de techniques sont encore au stade de l'étude de faisabilité ou de l'optimisation sur installation pilote. En conséquence, un gros effort de validation des techniques proposées est nécessaire pour un développement industriel moins réticent.

#### D - 5. Méthodologie de prévision de l'efficacité des méthodes de réhabilitation biologique "agricole" ou in situ des zones naturelles contaminées

Les techniques biologiques de réhabilitation des sols contaminés sont proposées par des industriels et sont appliquées de manière plus ou moins empirique. Le principal problème, dans cette situation est d'afficher un résultat en terme d'efficacité et de durée du traitement. En conséquence, la mise en place de méthodologies de prévision de ces résultats et des études de démonstration sur sites réels sont aujourd'hui nécessaires pour une meilleure argumentation des choix technico-économiques de traitement des contaminations.

**ASSOCIATION RE.CO.R.D.**

**CONTRAT N 91-401/EUR**

**AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE  
ET DE L'ENERGIE**

**ADEME**

**CONTRAT ANRED 90.270.C.01.0**

**RAPPORT ANNEXE, PARTIE 1 :  
Etat de l'art en recherches et développements  
de biotechnologies appliquées au traitement de déchets**

**INSTITUT DE RECHERCHES HYDROLOGIQUES**

**11 Bis rue Gabriel Péri  
54500 VANDOEUVRE-LES-NANCY  
Tél : 83 50 36 00 Fax : 83 50 36 99**

*Michel JAUZEIN*

*30 octobre 1992*

# INSTITUT DE RECHERCHES HYDROLOGIQUES

S.A.R.L. AU CAPITAL DE 650.000 F - RC NANCY B. 756.800.090  
CCP NANCY 20041 01010 0141065J031 27 -SIRET 756.800.090.00083 - APE 8301

11bis, rue Gabriel Péri - B.P. 286 - 54515 VANDOEUVRE CEDEX  
Téléphone : 83.50.36.00 Télécopie : 83.50.36.99

## S O M M A I R E

### INTRODUCTION

#### I DEMARCHE DE DOCUMENTATION

#### II COMMENT GERER AU MIEUX LES FACTEURS LIMITANTS DES BIOTECHNOLOGIES DANS LE DOMAINE DES DECHETS

- I - 1. La génétique : gérer les compétences des outils
- I - 2. L'écologie : gérer le milieu où agissent les outils
- I - 3. La cinétique : gérer la dynamique des transformations
- I - 4. Le génie des procédés : gérer les applications industrielles

#### III DEFINITION D'AXES DE RECHERCHE PRIORITAIRES

### DOCUMENTATION UTILISEE

ANNEXE Liste de références complémentaires issues de la synthèse bibliographique  
réalisée par GERME S.A. en 1990.

## INTRODUCTION

L'objectif central de cette étude est de présenter l'état de l'art sur les biotechnologies appliquées au traitement des déchets. En exposant les connaissances acquises, les activités de recherche et développement, les réalisations industrielles et les perspectives techniques et économiques, il est possible de dégager des axes de recherche importants ainsi que des pistes de développement de procédés pilotes ou industriels. Les termes "biotechnologies" et "déchets" ayant un champ d'utilisation très large, il a été nécessaire de préciser le type de biotechnologies et le type de déchets pour lesquels la documentation serait rassemblée. En ce qui concerne les biotechnologies, les applications considérées sont centrées sur la valorisation partielle ou totale des déchets, la décontamination des déchets, l'élimination partielle ou totale des déchets et la lutte contre les nuisances et risques immédiats liés aux déchets. En ce qui concerne les déchets, il s'agit principalement des déchets industriels liquides ou solides et des autres matériaux contaminés par des substances dangereuses (essentiellement polluants organiques et polluants métalliques) ainsi que des émanations gazeuses, malodorantes ou toxiques, générées par ces déchets et matériaux.

Le développement actuel des biotechnologies pour modifier des procédés de fabrication et surtout pour élaborer de nouveaux produits cache souvent une histoire très ancienne du traitement biologique de la matière inerte ou vivante. Aujourd'hui, elles ont un impact économique important au niveau mondial et font l'objet d'actions de la Commission des Communautés Européennes [C. du GRANRUT et L. SAMANIEGO, 1991]. Aujourd'hui les connaissances scientifiques et techniques sur les biotechnologies ont donné naissance à de nombreuses applications dans la chimie, la pharmacie, l'agriculture et maintenant l'environnement. De plus la production importante de déchets industriels tout aussi diversifiés que complexes dans leur composition et leur structure, doivent être gérés en préservant au mieux l'homme et son environnement [ANRED, 1991 ; SNIIM, 1988]. Les problèmes de caractérisation qu'ils soulèvent illustrent bien cette diversité d'état physique, de composition et de risques associés [ANRED, IRH et INSA, 1984].

Les filières de gestion des déchets industriels sont nombreuses [M. MAES, 1991]. Certaines filières permettent une valorisation en générant de l'énergie, des matières recyclables ou des amendements agricoles, d'autres filières utilisent différents types de traitement générant des déchets solides ultimes qui sont ensuite mis en décharge en minimisant les risques pour l'homme et son environnement. Les procédés utilisés sont principalement thermiques (incinération, pyrolyse), physico-chimiques (séparation, solidification, détoxification) et biologiques (détoxification, séparation).

Les procédés biologiques, utilisés depuis longtemps pour l'épuration des eaux usées municipales et de certaines eaux usées industrielles [Innovation 128, 1990], se développent pour le traitement d'autres types de déchets plus toxiques en s'affrontant à des limitations techniques tout en restant souvent une alternative intéressante en termes d'efficacité et de coût grâce à la très grande diversité des mécanismes d'action possibles des organismes sur la matière [Innovation 128, 1991 ; GERME S.A., 1990 et 1991].

Cependant, la diversité des déchets générés et des problèmes de traitement à résoudre se heurtent à nos connaissances qui restent limitées sur les mécanismes mis en jeu, et qui limitent la conception, l'optimisation et la mise en oeuvre de nouveaux procédés.

Ainsi, les biotechnologies ne se développeront rapidement dans le cadre du traitement des déchets qu'avec la compréhension et la maîtrise des mécanismes prépondérants mis en oeuvre dans les différents procédés envisagés [GERME S.A., 1990 et 1991 ; R.C. SIMS, 1990 ; G. LEWANDOWSKI et al., 1989 ; A.W. BOURQUIN , 1989].

Quatre domaines particuliers nécessitent une attention accrue :

- les mécanismes d'action des organismes vivants et la capacité de ces organismes à les mettre en oeuvre au niveau des déchets : la physiologie et la génétique sont à la base de ce domaine d'investigation (axe central du schéma qui suit).
- les conditions de développement et de fonctionnement des organismes au contact des déchets : l'écologie s'intéressant à l'influence des facteurs physiques, chimiques et biologiques du milieu permet d'aborder ces problèmes fondamentaux dans la mise en oeuvre des procédés biotechnologiques (partie gauche du schéma).
- les facteurs qui influencent l'action effective des organismes au sein des déchets et liés à la mobilité respective des substances dangereuses et des organismes : l'étude des effets de structure et de composition des déchets sur la biodisponibilité des polluants et la biocolonisation des déchets est nécessaire à l'optimisation des conditions de traitement biologique (partie droite du schéma).
- la conception pratique d'installations industrielles performantes : le génie des procédés, au vu des connaissances acquises sur l'ensemble des mécanismes fondamentaux et des facteurs limitants possibles, permet de rechercher des configurations de bioréacteurs optimales (base du schéma).

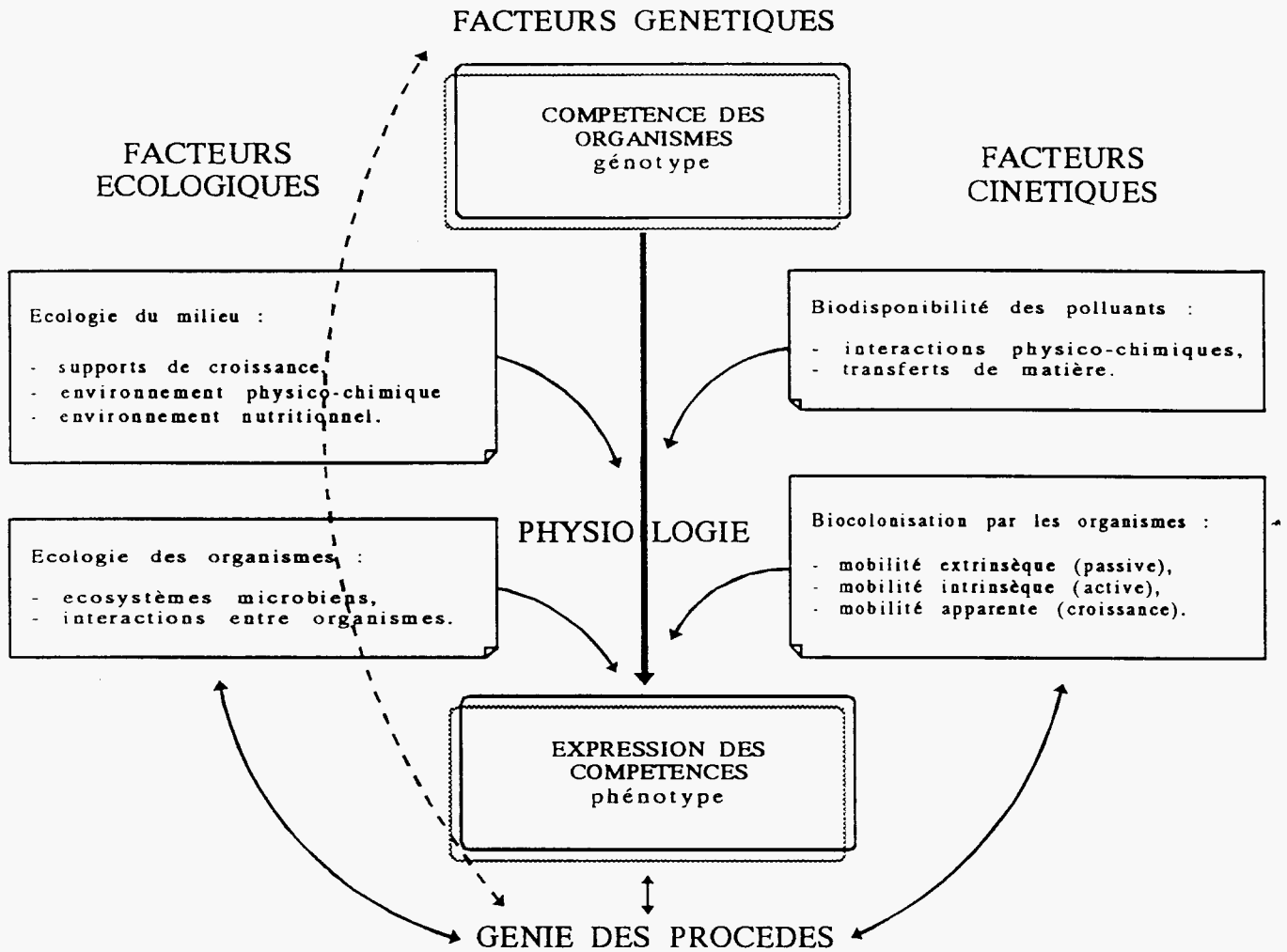


Schéma synthétique : Les facteurs de l'efficacité des biotechnologies appliquées au traitement des déchets et autres matériaux contaminés par des substances dangereuses

## I DEMARCHE DE DOCUMENTATION

A partir d'une collecte d'informations bibliographiques et documentaires, les actions menées dans le domaine ont été analysées et commentées pour en dégager les principaux axes de recherches et développements (IRH). Ces documents sont étudiés en s'appuyant sur la connaissance des possibilités de la microbiologie et du génie des procédés.

Parallèlement à l'enquête technologique menée par l'UTC, la participation à des congrès, l'achat d'études et des interrogations de bases de données bibliographiques ont permis de rassembler une documentation importante sur le sujet. L'analyse de cette documentation scientifique et technique permet de faire le point sur les connaissances et les recherches en cours.

Dans un premier temps des documents généraux ont été rassemblés pour aborder le contexte industriel général dans lequel les biotechnologies sont développées pour le traitement des déchets.

Ainsi, le dossier "Les stratégies de la chimie européenne - Les bouleversements dus aux biotechnologies" de C. du GRANRUT et L. SAMANIEGO, édité dans La Recherche en Septembre 1991, et auquel nous nous référons, donne un bon aperçu de la place des biotechnologies dans l'industrie européenne et mondiale vue par les experts du programme MONITOR/FAST de la Commission des Communautés Européennes. Cet article rappelle en outre l'histoire des biotechnologies, leur impact économique et la politique européenne dans ce domaine en donnant 16 références complémentaires.

Le petit fascicule "Les déchets en France : les chiffres clés" rédigé et édité l'Agence Nationale pour la Récupération et l'Élimination des Déchets (ex ANRED, aujourd'hui ADEME) en Janvier 1991, dont sont issus les chiffres cités sur la production de déchets en France, permet d'avoir une vue d'ensemble sur la diversité des déchets et donne les moyens de se procurer plus d'information. Le numéro spécial n 7 de Print Industrie sur "Le monde des déchets" conçu par le Syndicat National des Ingénieurs de l'Industrie et des Mines en Juin 1988 regroupe un ensemble de 18 documents représentatifs des différents problèmes et points de vue concernant les déchets. Enfin le Cahier technique n 12 "Analyse et caractérisation des déchets industriels" réalisé avec l'assistance de l'IRH et la collaboration de l'ANRED et l'INSA de Lyon et édité par le Secrétariat d'Etat à l'Environnement et la Qualité de la Vie et l'ANRED illustre bien la diversité des déchets par les problèmes de caractérisation qu'ils soulèvent.

En ce qui concerne la place des biotechnologies dans les filières de traitement des déchets, le livre intitulé "La maîtrise des déchets industriels" de M. MAES et édité par P. JOHANET S.A. en avril 1991 consacre 88 pages aux bioconversions en donnant des éléments assez complets sur les biotechnologies dans le domaine des déchets industriels en insistant sur l'épuration biologique, la méthanisation, le compostage-épandage et l'impact sur les techniques d'enfouissement technique. Il permet aussi de s'informer sur les autres filières de traitement ou de valorisation des déchets.

Pour ce qui concerne le génie des procédés l'ouvrage de J. VILLERMAUX édité par Lavoisier en 1985 sur le "Génie de la réaction chimique - Conception et fonctionnement des réacteurs" donne une vue assez large des méthodes et acquis du génie des procédés dans la conception et la compréhension des procédés industriels.

Dans un deuxième temps, des documents synthétiques sur l'applications des biotechnologies au traitements des déchets ont été recherchés. Ainsi, la synthèse bibliographique "Biotechnologies appliquées au traitement des matières toxiques" éditée par la société GERME S.A. en janvier 1991 pour les agences de l'eau et le ministère de l'environnement regroupe des données précises sur les outils biotechnologiques adaptés à environ 85 substances chimiques toxiques, un aperçu des possibilités techniques et l'état de développement depuis le laboratoire jusqu'aux applications industrielles. L'étude bibliographique associée éditée par la même société en juillet 1990 regroupe plus de 350 références sur le sujet en insistant sur les substances chimiques visées et les outils biologiques utilisés et en présentant quelques réalisations industrielles.

De plus, l'étude Innovation 128 "Traitement et valorisation des déchets toxiques" de mai 1991 sans donner de références consacre plus de 50 pages aux procédés biotechnologiques (procédés, outils disponibles, exemples de traitements pour 4 catégories de substances organiques, les métaux lourds et les autres résidus minéraux). L'étude Innovation 128 "Le traitement des eaux et des déchets par procédés biotechnologiques" de février 1990, que l'on peu ajouter, s'intéresse surtout au traitement des eaux mais consacre 115 pages au cas des déchets mais surtout ceux de l'agriculture et de l'agro-alimentaire dans une optique de valorisation.

Enfin il faut y ajouter un ouvrage de synthèse qui s'intitule "Biotechnology applications in hazardous waste treatment" édité par G. LEWANDOWSKI, P. ARMENANTE et B. BALZIS en 1989 et qui comprend 28 contributions sur les différents problèmes scientifiques posés par les biotechnologies dans ce domaine du traitement des déchets.

Dans un dernier temps, au vue de l'absence de document de synthèse sur les biotechnologies appliquées au traitement des sols contaminés, l'interrogation complémentaire de banques de données bibliographiques sur le traitement biologique des déchets et des sols contaminés a permis d'obtenir les références données à la fin de ce document, qui, avec les documents déjà cités sont à la base du travail de synthèse.

Enfin quelques références de M. JAUZEIN sont utilisées pour illustrer les acquis dans le domaine de la modélisation couplée des transferts de substances chimiques et des interactions physico-chimiques susceptibles de les influencer. En effet ces connaissances utilisées principalement pour prévoir la migration des pollutions dans les milieux souterrains peuvent avoir des applications dans la prévision et le contrôle de la biodisponibilité des polluants vis à vis des transformations biologiques.

L'ensemble de ces documents auquel on ajoutera la liste complémentaire fournie dans la synthèse bibliographique réalisée par GERME S.A., sont une source d'informations sur l'état de l'art des biotechnologies appliquées au traitement des déchets et permettront au lecteur de compléter l'analyse qui en est faite d'un point de vue prospectif de recherches et développements dans le présent document. L'ensemble des documents bibliographiques consultés et en particulier ceux qui constatent les limites d'application de certaines techniques comme dans le cas de la décontamination des sols font ressortir les quatres domaines d'action présentés en introduction. De plus ces domaines sont abordés en général par des scientifiques spécialisés en biochimie, physiologie, écologie, chimie, agronomie ou hydrogéologie suivant le sujet abordé. En conséquence, l'approche globale est rarement présentée du fait de la pluridisciplinarité caractéristique de l'application des biotechnologies environnementales.



## II COMMENT GERER AU MIEUX LES FACTEURS LIMITANTS DES BIOTECHNOLOGIES DANS LE DOMAINE DES DECHETS

### I - 1. La génétique : gérer les compétences des outils

Les organismes vivants fonctionnent sur la base de mécanismes physiques et chimiques propres à leur activité. L'analyse de la composition chimique des organismes vivants montre une unité chimique particulière malgré la complexité de leur organisation. Ainsi, une certaine limite d'action peut-être envisagée dans le cadre des biotechnologies.

Environ 96 % de la matière vivante est constituée de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote. En ajoutant le phosphore, le sodium, le magnésium, le calcium, le chlore, le potassium, le soufre et le silicium on atteint plus de 99,9 %. Cette sélection naturelle d'éléments est liée en grande partie à la mobilité accrue de ces éléments dans la nature et en particulier celle des corps gazeux de l'atmosphère ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  et  $H_2O$ ), celle de l'eau, constituant principal de la matière vivante active (plus de 50 % en général et jusqu'à 98 % chez certains organismes) et lieu privilégié de transfert des autres substances solubilisées en milieu aqueux (les cations  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $NH_4^+$ , les anions  $Cl^-$ ,  $SO_4^{--}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{--}$ ,  $NO_3^-$ ,  $HPO_4^{--}$ ,  $PO_4^{---}$ ,  $H_3SiO_4^-$ , des solutés neutres comme  $H_4SiO_4$  ... et les substances organiques solubles).

L'organisation structurale des organismes vivants est possible grâce aux propriétés de l'atome de carbone s'associant facilement sous la forme de chaînes carbonées plus ou moins longues et structurées. Le carbone des organismes vivants provient essentiellement de l'intégration du  $CO_2$  atmosphérique par les organismes photosynthétiques grâce à l'énergie solaire et à l'oxydation de l'eau. Ce mécanisme global permet au monde vivant d'emmagasiner de l'énergie qu'il utilise ensuite progressivement par les métabolismes respiratoire et fermentaire. La disponibilité de l'oxygène permet de restituer à l'environnement le  $CO_2$  et l'eau. Ce cycle ouvert en termes d'énergie semble pouvoir fonctionner en circuit fermé pour la matière. Cependant, le cycle biogéochimique du carbone nous montre quelques voies de sortie :

- En milieu aqueux en présence de calcium (ou de magnésium) l'appauvrissement en  $CO_2$  dissous utilisé par le métabolisme de la photosynthèse favorise la précipitation de carbonates. Ainsi, la présence du monde vivant entraîne l'immobilisation d'une part du carbone sous la forme de carbonates.
- En milieu pauvre en oxygène, une autre portion de carbone organique se retrouve piégée dans les sols et les sédiments. L'humification puis la diagenèse fait évoluer la matière organique en hydrocarbures et en carbone minéral.
- En cas de combustion partielle des matières organiques, la dégradation thermique produit aussi des hydrocarbures et du carbone minéral.

Le métabolisme de la photosynthèse permet en présence de lumière, d'eau et de phosphates d'oxyder l'eau en générant de l'oxygène, de charger transitoirement un transporteur de protons ainsi qu'un transporteur de groupement phosphorylé à forte énergie de liaison (adénosine-tri-phosphate ou ATP). Cette énergie et ces protons sont transférés pour intégrer le  $CO_2$  dans des chaînes glucidiques (chaînes carbonées linéaires, cycliques et polycycliques à fonctions alcools polaires) qui ont un rôle de réserve énergétique ou un rôle structural (voir Figure 1).

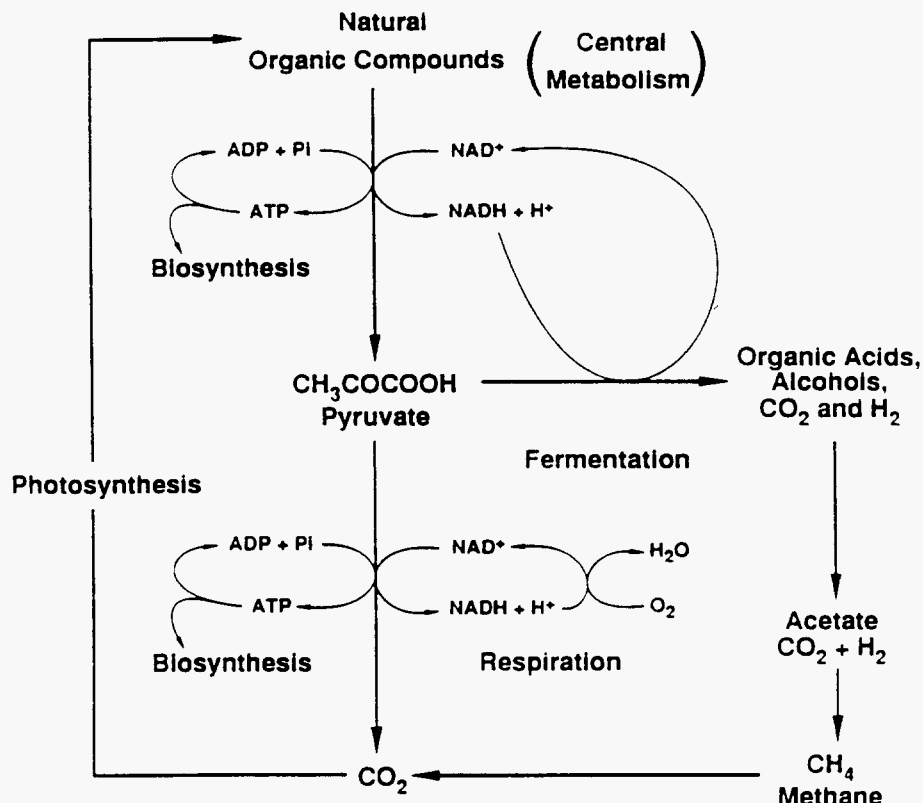


Figure 1 : Schéma résumé des cycles du métabolisme central rencontré chez les organismes vivants (tiré de "Recent advances in the microbial degradation of aromatic hydrocarbons", D.T. GIBSON in G. LEWANDOWSKI et al.,1989)

Les métabolismes respiratoires et fermentaires génèrent à partir des glucides des produits réduits (transporteurs de protons), de l'ATP permettant de récupérer de l'énergie, et un nombre important de molécules organiques dont des acides gras qui sont des intermédiaires pour la biosynthèse des autres molécules telles que les lipides, les protéines et les acides nucléiques.

La biosynthèse d'acides gras plus ou moins lourds (chaînes carbonnées linéaires apolaires à une fonction acide) se combinant par estérification avec des alcools (en général glycérol ou cholestérol) donne des lipides qui ont un rôle de protection vis à vis des transferts d'eau (membranes plus ou moins perméables) ou un rôle énergétique de réserve voire des rôles particuliers (solvants, hormones).

L'intégration de l'azote ammoniacal dans les chaînes carbonnées par amination d'acides organiques donne des acides aminés dont la vingtaine d'unités permet aux organismes de synthétiser des protéines dont les propriétés structurales sont très performantes (reconnaissances de molécules pour les enzymes, les anticorps, les hormones, et les transporteurs spécifiques comme l'hémoglobine, propriétés contractiles pour les fibres musculaires, propriétés mécaniques pour le collagène et la chératine par exemple).

De même, les nucléotides formés de molécules glucidiques, de bases azotées et d'acide phosphorique sont la base de construction de l'acide désoxyribonucléique (ADN) et des acides ribonucléiques (ARN). L'ADN et les ARN sont les supports du patrimoine génétique et du potentiel de biosynthèse des protéines.

En particulier, la biosynthèse des protéines enzymatiques est le moteur de l'ensemble du fonctionnement des organismes vivants et donc l'expression pratique des compétences génétiques acquises au cours de l'évolution. Habituer à vivre suivant des cycles, le monde vivant dispose d'un arsenal d'enzymes plus ou moins spécifiques capables de synthétiser et de dégrader les substances organiques avec une efficacité énergétique certaine. En ce qui concerne les substances minérales, le monde vivant dispose aussi de systèmes membranaires efficaces pour la protection de la matière vivante en contrôlant parfois de manière spécifique les transferts d'eau, d'ions et de substances en solution pour préserver les conditions de fonctionnement des réactions métaboliques.

Cet exposé rapide des bases de la biochimie et de la physiologie des organismes vivants permet de déceler les principales voies d'utilisation des biotechnologies en particulier les biosynthèses et les biodégradations de matières organiques auxquels ont peu ajouter le contrôle des transferts de matières minérales et éventuellement leur métabolisation. L'ensemble de ces compétences fonctionnelles sont transmises par le patrimoine génétique des organismes et leur expression physiologique est dépendante de tout un ensemble de facteurs liés à l'environnement dans lequel se retrouvent les organismes vivants.

### 1.1. métabolisation

La métabolisation des substances chimiques par les organismes vivants consiste en l'intégration directe des substances dans les métabolismes existants. Par exemple, pour des déchets contenant des molécules organiques naturelles, les métabolismes respiratoire et/ou fermentaire permettent de minéraliser les matières organiques. Cette minéralisation est d'autant plus facile que les substances présentes ont un rôle énergétique. Certaines molécules structurales comme la lignine s'avèrent plus difficiles à dégrader mais des organismes particuliers disposent des enzymes nécessaires.

Ainsi les résidus de productions agricoles et agro-alimentaires peuvent être traités directement par métabolisation. Cette métabolisation peut soit mener à la dégradation totale des matières organiques en dioxyde de carbone et en eau (métabolisme respiratoire ou aérobie), voire en méthane (métabolisme fermentaire méthanogène), soit permettre de produire des métabolites valorisables (sucres, alcools, protéines, ...).

Le choix des organismes vivants à mettre en oeuvre est large. Cependant, les matières recyclables directement comme alimentation du monde animal ne sont pas à proprement parlé des déchets. Le monde végétal, quant à lui, puise d'abord dans les substances minérales éventuellement issues de la biodégradation des matières organiques par les microorganismes du sol. Ainsi, la grande majorité des déchets organiques naturels sont soumis à l'action des microorganismes, soit directement par amendement des sols agricoles pour la production de biomasse végétale, soit indirectement par des procédés de transformation biotechnologiques : compostage, méthanisation, production de biomasse alimentaire et production de molécules organiques particulières. La grande adaptabilité des microorganismes, leur vitesse de reproduction, leurs compétences souvent spécifiques et les possibilités de contrôle de leur patrimoine génétique en font l'outil principal des biotechnologies.

En ce qui concerne les déchets contenant des substances minérales importantes pour les fonctions vitales, la métabolisation peut être une voie de valorisation. En particulier, les sels contenant de l'azote (nitrates, sels d'ammonium), du phosphore (phosphates) ou du potassium (sels de potassium) sont métabolisés facilement par les organismes. Leur valorisation vers le monde végétal, comme engrais agricole, peut être envisagée. De même, ces déchets mélangés à d'autres déchets organiques sont un moyen de correction de substrat pour améliorer la dégradation par des microorganismes. Enfin, la métabolisation des éléments traces ou des oligoéléments, en raison de leur concentration faible, ne peut être envisagée comme un mécanisme de traitement de déchets, surtout qu'à concentration plus forte ils sont généralement toxiques pour beaucoup d'organismes.

### 1.2. dégradation

Dans le cas des molécules organiques produites par l'homme en proportion telle qu'elles se retrouvent dans des déchets ou des zones contaminées à des teneurs bien supérieures à leur teneur naturelle (pratiquement nulle pour certaines), le problème de la dégradation se pose différemment. Ces molécules organiques xénobiotiques ne sont pas connues par le monde vivant, ou du moins peu connues. En effet, on s'aperçoit que beaucoup de molécules xénobiotiques sont reconnues et dégradées par des microorganismes que l'on peut isoler du milieu naturel. Par exemple, l'existence de gisement de pétrole, et d'émission naturelle d'hydrocarbures polycycliques aromatique (HPA) semble expliquer

l'existence de microorganismes aptes à dégrader ces molécules. De même, on pourrait se demander si la présence de cholestérol dans le monde animal (comprenant un noyau phénanthrène) n'explique pas les compétences de dégradation du phénanthrène plus répandues que pour les autres HPA. De nombreux scientifiques s'intéressent aujourd'hui à la dégradation des molécules xénobiotiques. Trois pôles d'intérêt se dégagent de ces recherches :

- la recherche des compétences naturelles des microorganismes et la compréhension des voies biochimiques de dégradation,
- les méthodes d'isolement et de multiplication des organismes compétents,
- les méthodes génétiques de sélection ou d'amélioration des compétences.

Les résultats acquis sont divers et concernent principalement les voies de biodégradation des molécules organiques comme les organo-chlorés, les phénols et les HPA chez les microorganismes chez qui des compétences ont été observées (voir les exemples des figures 2, 3, 4 et 5 concernant la dégradation des dichlorobenzènes ortho et para par Pseudomonas et les tableaux 1 et 2 sur la dégradation des HPA par Phanerochaete chrysosporium).

Certaines étapes préliminaires d'attaque des molécules xénobiotiques avant intégration dans les métabolismes classiques ont été mis en évidence et les enzymes responsables font l'objet de recherches plus précises : il s'agit principalement des réactions de coupure des cycles par oxygénation et de déchlorination aboutissant à des acides organiques compatibles avec le métabolisme central des organismes.

Pour mener à bien ces études des méthodes d'isolement, de multiplication et de maintien des microorganismes en activité sont mises au point que ce soit des microorganismes aérobies, anaérobies ou des communautés couplées. La méthode la plus simple utilise des bioréacteurs discontinus dans lesquels la présence du polluant étudié exerce une pression de sélection sur un inoculum initial issu de boue de station d'épuration ou de sol naturel. Progressivement, les microorganismes compétents, s'ils existent, deviennent prépondérants dans les cultures successives. Eventuellement, par évolution génétique, de nouveaux microorganismes, ayant acquis une compétence spécifique, peuvent être générés. Des installations continus existent aussi dans ce but et permettent de travailler avec des cultures fixées ou en lit fluidisé. L'ensemble de ces travaux sont menés sur des solutions aqueuses dont la composition est contrôlée.

L'obtention de nouveaux microorganismes est possible grâce à l'utilisation de pressions sélectives ou parfois par manipulation génétique lorsque des couplages enzymatiques nécessaires à la dégradation sont complétés artificiellement par implantation de fragments d'acides nucléiques. Cependant, les organismes obtenus dans des conditions contrôlées et souvent optimales pour leur développement ont généralement perdu leur adaptabilité au milieu dans lequel on veut les implanter. Aujourd'hui, de nombreux échecs ont été essuyés pour la mise en pratique de biotechnologies basées sur l'utilisation d'organismes mutants ou manipulés. De plus, la multiplication de ces organismes est souvent mal perçue par les médias et elle est rendue difficile par la réglementation. En conséquence, beaucoup d'équipes de recherche se limitent aux deux premiers pôles d'intérêt où l'on isole et multiplie des microorganismes compétents à partir de communautés naturelles (des bactéries, des champignons et des algues compétentes sont donnés dans les tableaux 3, 4 et 5).

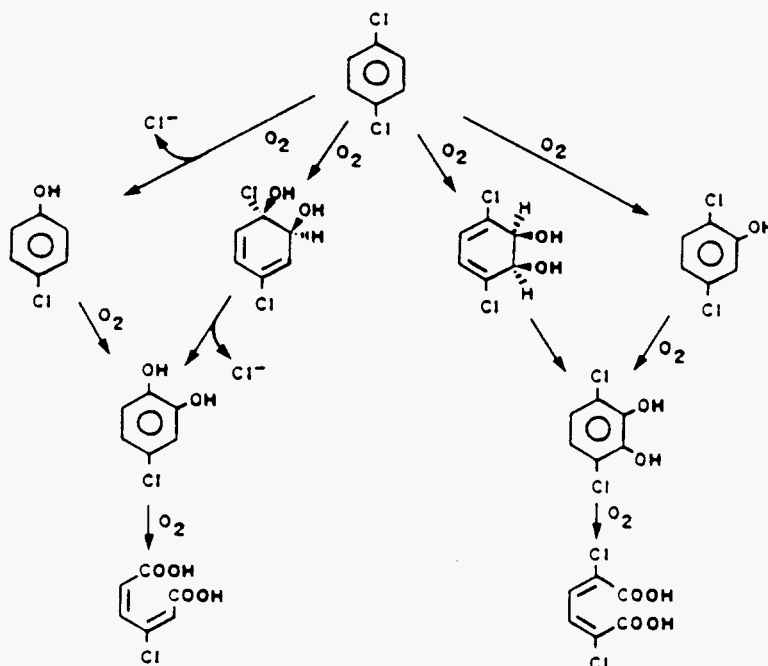


Figure 2 : Voies possibles pour la dégradation initiale du p-DCB (tiré de "Development of bacteria for biodegradation of chloroaromatic compounds", J.C. SPAIN in G. LEWANDOWSKI et al.,1989)

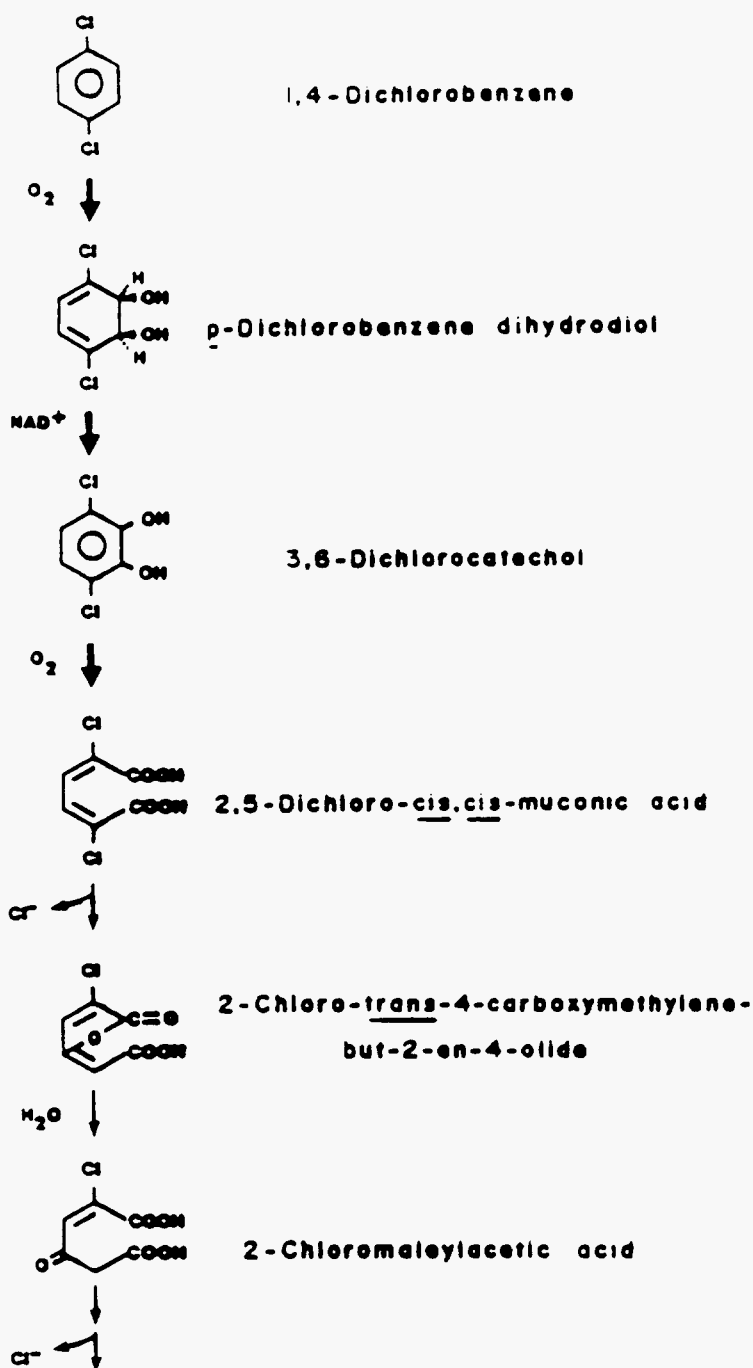


Figure 3 : Voie de dégradation du p-DCB par *Pseudomonas* sp. JS6 (tiré de "Development of bacteria for biodegradation of chloroaromatic compounds", J.C. SPAIN in G. LEWANDOWSKI et al.,1989)

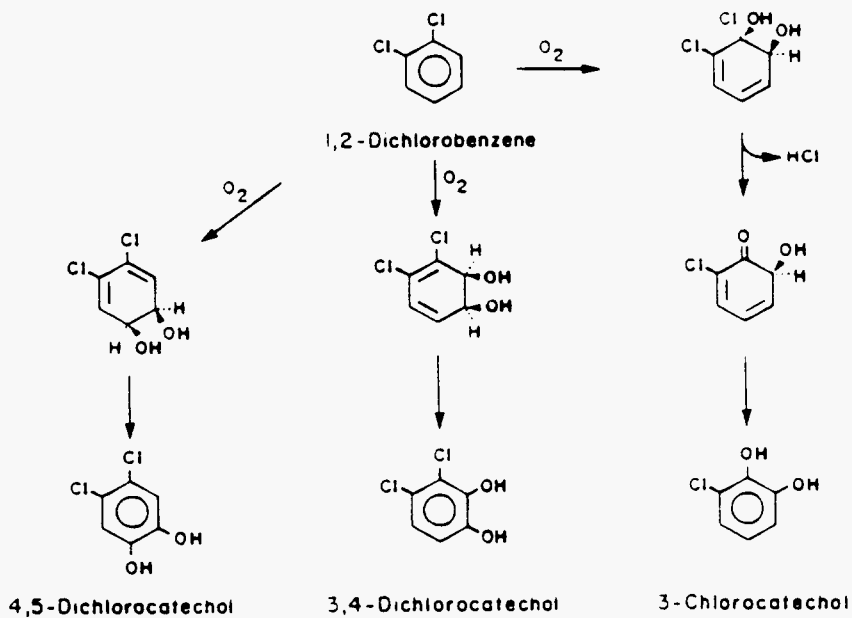


Figure 4 : Voies possibles pour la dégradation initiale de l'o-DCB (tiré de "Development of bacteria for biodegradation of chloroaromatic compounds", J.C. SPAIN in G. LEWANDOWSKI et al.,1989)



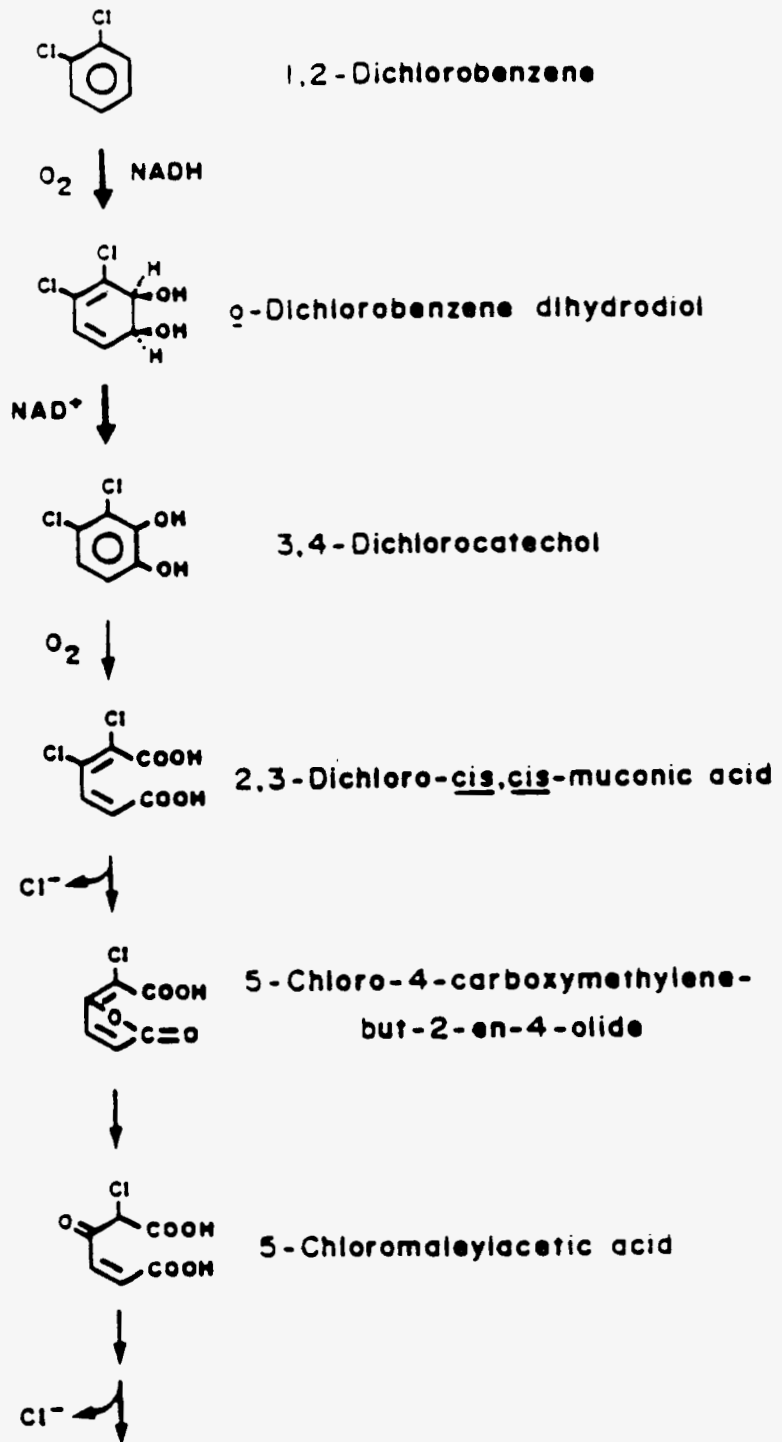


Figure 5 : Voie de dégradation de l'o-DCB par *Pseudomonas* sp. JS100 (tiré de "Development of bacteria for biodegradation of chloroaromatic compounds", J.C. SPAIN in G. LEWANDOWSKI et al.,1989)

---

Polycyclic aromatic compounds	Chlorinated alkyhalides
Benzo[a]pyrene	Lindane
Biphenyl	Chlordane
2-methylnaphthalene	
Phenanthrene	Biopolymers
Benzo[a]anthracene	Lignin
Pyrene	Cellulose
Anthracene	Kraft lignin
Perylene	3-chloroaniline-lignin conjugate
Dibenzo[p]dioxin	3,4-dichloroaniline-lignin conjugate
Chlorinated aromatic compounds	Triphenylmethane dyes
4-chlorobenzoic acid	Crystal violet
Dichlorobenzoic acid	Pararosaniline
2,4,6-trichlorobenzoic acid	Cresol red
4,5-dichloroguaiacol	Bromphenol blue
6-chlorovanillin	Ethyl violet
4,5,6-trichloroguaiacol	Malachite green
Tetrachloroguaiacol	Brilliant green
Pentachlorophenol	
3-chloroaniline	
3,4-dichloroaniline	
2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid	
Polycyclic chlorinated aromatic compounds	
DDT (1,1,1-trichloro-2,2-bis(4-chlorophenyl)ethane	
2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	
3,4,3',4'-tetrachlorobiphenyl	
2,4,5,2',4',5'-hexachlorobiphenyl	
Aroclor 1254	
Aroclor 1242	
2-chlorodibenzo[p]dioxin	
Dicofol (2,2,2-trichloro-1,1-bis(4-chlorophenyl)ethanol	

---

Tableau 1 : Composés organiques dégradés par P. chrysosporium (tiré de "Factors affecting biodegradation of xenobiotics by the white rot fungus Phanerochaete chrysosporium", J.A. BUMPUS et al. in G. LEWANDOWSKI et al., 1989)

PAH	Sample #	Concentration of PAH ( $\mu\text{g/g}$ )		
		Control	After 30 day incubation with <u>P. chrysosporium</u> on corn cobs	% of PAH remaining After 30 day incubation with <u>P. chrysosporium</u> on corn cobs
Naphthalene	1	1506 $\pm$ 156	109 $\pm$ 16	7.2 $\pm$ 1.0
	2	900 $\pm$ 76	173 $\pm$ 22	19.2 $\pm$ 2.4
Phenanthrene	1	916 $\pm$ 220	113 $\pm$ 37	12.3 $\pm$ 4.0
	2	332 $\pm$ 40	41 $\pm$ 5	12.3 $\pm$ 1.5
Anthracene	1	98 $\pm$ 13	0.8 $\pm$ 0.7	0.8 $\pm$ 0.7
	2	48 $\pm$ 10	8 $\pm$ 2	16.7 $\pm$ 4.2
Fluoranthene	1	127 $\pm$ 4	13 $\pm$ 3	10.2 $\pm$ 2.3
	2	42 $\pm$ 7	2 $\pm$ 2	4.8 $\pm$ 4.8
Pyrene	1	609 $\pm$ 107	77 $\pm$ 2	12.6 $\pm$ 0.3
	2	342 $\pm$ 77	18 $\pm$ 1	5.3 $\pm$ 0.3
Benz (a)anthracene and chrysene	1	82 $\pm$ 10	13 $\pm$ 3	15.9 $\pm$ 3.7
	2	25 $\pm$ 8	5 $\pm$ 1	20.0 $\pm$ 4.0
Benzo(a)pyrene	1	58 $\pm$ 16	3 $\pm$ 1	5.2 $\pm$ 1.7
	2	39 $\pm$ 12	4 $\pm$ 3	10.3 $\pm$ 7.7

Tableau 2 : Biodégradation de quelques HPA dans un sol contaminé par de la créosote par P. chrysosporium (tiré de "Biological treatment of hazardous wastes by Phanerochaete chrysosporium", J.A. BUMPUS et al. in G. LEWANDOWSKI et al., 1989)

Bactéries	Substances transformées dangereuses
<u>Acetobacter woodii</u>	tétrachlorométhane tétrachlorure de carbone
<u>Acetobacter sp.</u>	PCB
<u>Achromobacter pcB</u>	PCB
<u>Achromobacter sp.</u>	PCB
<u>Acinetobacter sp.</u>	PCB trichloroéthylène tétrachloroéthylène
<u>Acinetobacter P6</u>	PCB
<u>Aerobacter aerogenes</u>	DDT
<u>Alcaligenes A7-2</u>	chlorophénol
<u>Alcaligenes sp.</u>	phénol 1,3-dichlorobenzène PCB
<u>Alcaligenes denitrificans</u>	PCB
<u>Alcaligenes eutrophus</u>	3-chlorobenzoate 2,4-D
<u>Alcaligenes eutrophus H850</u>	PCB tétrachlorobiphénol hexachlorobiphénol
<u>Alcaligenes odorans</u>	PCB
<u>Alcaligenes paradoxus</u>	2,4-D
<u>Arthrobacter sp.</u>	3-chlorobenzoate 2,4-D PCB
<u>Bacillus circulans</u>	DDT
<u>Bacillus sp.</u>	DDT PCB

TABLEAU 3 : Bactéries compétentes pour la transformation de substances dangereuses

Bactéries	Substances transformées dangereuses
<u>Bacillus subtilis</u>	DDT tétrachloroéthylène
<u>Beijerinckia sp.</u>	benz(a)antracène PCB
<u>Clostridium sp.</u>	1,1,1-trichloroéthane trichlorométhane tétrachlorométhane tétrachlorure de carbone
<u>Corynebacterium KC3</u>	pentachlorophénol 2,3,4,6-tétrachlorophénol 2,4,6-trichlorophénol
<u>Desulfovibrio autotrophicus</u>	tétrachlorométhane trichloroéthane PCB
<u>Enterobacter cloacae</u>	DDT PCB
<u>Erwinia sp.</u>	PCB
<u>Escherichia coli</u>	PCB lindane
<u>Flavobacterium sp.</u>	DDT PCB pentachlorophénol
<u>Hydrogenomonas sp.</u>	DDT
<u>Hyphomicrobium sp.</u>	chlorométhane dichlorométhane
<u>Klebsiella sp.</u>	DDT PCB
<u>Klebsiella aerogenes</u>	DDT
<u>Methanosarcina sp.</u>	tétrachloroéthylène
<u>Methylobacterium sp.</u>	dichlorométhane
<u>Methylococcus capsulatus</u>	chlorométhane

TABLEAU 3 suite : Bactéries compétentes pour la transformation de substances dangereuses

Bactéries	Substances transformées dangereuses
<u>Methylosinus trichosporium OB3B</u>	tichlororéthylène dichlorométhane trichlorométhane 1,1-dichloroéthane 1,2-dichloroéthane 1,2-dichloropropane 1,3-dichloropropylène
<u>Microccus sp.</u>	PCB
<u>Mycobacterium sp.</u>	chloroéthylène phénanthrène pyrène
<u>Nocardia sp.</u>	3-chlorobenzoate PCB
<u>Pseudomonas aeruginosa</u>	DDT 4-chlorobiphénol 1,3-dichlorobenzène PCB
<u>Pseudomonas cepacia</u>	2,4,5-T 2,4-dichlorophénol 2,4-dibromophénol pentachlorophénol
<u>Pseudomonas melophtora</u>	dieldrine
<u>Pseudomonas putida</u>	trichloroéthylène 4-chlorobenzoate 3,5-dichlorobenzoate 3-chlorobenzoate 3-bromobenzoate 3-fluorebenzoate 3-iodobenzoate

TABLEAU 3 suite : Bactéries compétentes pour la transformation de substances dangereuses

Bactéries	Substances transformées dangereuses
<u>Pseudomonas sp.</u>	chloroéthane chlorosalicylate 3-chlorobenzoate chloronaphtalène 4-chlorobenzoate 1,3-dichlorobenzoate naphtalène 2,4-D dichlorométhane 2-fluorobenzoate toluate pentachlorophénate PCB
<u>Seraetia liquefaciens</u>	PCB
<u>Streptomyces sp.</u>	PCB
<u>Vibrio sp.</u>	PCB
<u>Xanthobacter sp.</u>	bromométhane 1,2-dichloroéthane

TABLEAU 3 suite : Bactéries compétentes pour la transformation de substances dangereuses

Champignons	Substances transformées connues
<u>Aspergillus flavus</u>	PCB
<u>Aspergillus niger</u>	2,4-D
<u>Aspergillus terreus</u>	pentachlorophénol PCB
<u>Cicer rhizobium</u>	lindane dieldrine
<u>Chaetomium sp.</u>	trichloroéthylène tetrachloroéthylène
<u>Fusarium sp.</u>	pentachlorophénol
<u>Mucor sp.</u>	lindane parathion
<u>Phanerochaete chrysosporium</u>	DDT pentachlorophénol lindane PCB trichloroéthylène azote hydrocarbures polycycliques aromatiques
<u>Phaseolus rhizobium</u>	lindane
<u>Phoma sp.</u>	pentachlorophénol trichloroéthylène
<u>Rhizoctonia praticola</u>	2,4-dichlorophénol
<u>Rhizopus sp.</u>	DDT lindane parathion
<u>Trichoderma koningi</u>	dieldrine

TABLEAU 4 : Champignons compétents pour la transformation de substances dangereuses



Algues	Substances transformées connues
<u>Achnantes affinis</u>	cuivre
<u>Anabaena sp.</u>	cadmium
<u>Chlamydomonas sp.</u>	α-HCH cuivre cadmium DDT PCB
<u>Chlorella geitheri</u>	PCB cadmium
<u>Chlorella sp.</u>	DDT PCB cadmium cuivre
<u>Cymbella naviculiformis</u>	argent cuivre
<u>Cymbella ventricosa</u>	cuivre DDT PCB dieldrine
<u>Euglena sp.</u>	chrome DDT PCB
<u>Glocotrichia sp.</u>	PCB
<u>Hormidium sp.</u>	métaux
<u>Klebshormidium fluitans</u>	cuivre
<u>Lyngbya sp.</u>	cadmium chrome cuivre
<u>Navicula cuspidata</u>	chrome
<u>Navicula sp.</u>	chrome cuivre
<u>Neidium bisulcatum</u>	cuivre

TABLEAU 5 : Principales algues compétentes pour la transformation de substances dangereuses

Algues	Substances transformées connues
<u>Nitzschia palea</u>	chrome cuivre
<u>Nitzschia sp.</u>	chrome cuivre dieldrine
<u>Nostoc sp.</u>	cuivre
<u>Oscillatoria sp.</u>	chrome
<u>Rivularia sp.</u>	cadmium chrome
<u>Scenedesmus obligus</u>	cadmium chrome cuivre lindane PCB
<u>Trichodesmium sp.</u>	cuivre PCB

TABLEAU 5 suite : Principales algues compétentes pour la transformation de substances dangereuses

### 1.3. détoxification

Est-ce-que la détoxification peut être envisagée comme seul objectif des traitements biologiques ?

Beaucoup d'études ont portées sur la détoxification des déchets par voie biotechnologique. Seulement, de nombreux résultats ont montrés le danger d'une approche qui consiste à étudier la détoxification par rapport à la disparition d'une seule substance toxique. En effet, les voies de dégradation de substances toxiques donnent naissances à des métabolites parfois encore plus toxiques, ce qui est d'ailleurs souvent à la source de leur toxicité chez l'homme.

Par exemple, pour les HPA, chez les mammifères, l'oxydation d'un cycle benzénique par des enzymes du foie (monooxygénases) fait apparaître des métabolites pouvant interagir avec les acides nucléiques et avoir ainsi des effets cancérigènes (cas de la dégradation du benzo(a)pyrène). Chez certains microorganismes, l'oxydation du cycle est réalisée par un autre type d'enzyme (dioxygénase) évitant l'apparition de ces métabolites intermédiaires et simplifiant en même temps le schéma de dégradation.

Cet exemple, qui n'est pas unique, est intéressant car il montre que des voies de détoxification plus avantageuses que d'autres sont mises en évidence. Cependant dans le cas général, la conclusion principale est d'avoir comme objectif final la dégradation complète de la matière organique et non pas la disparition de tel ou tel toxique. Enfin, malgré cela, la dégradation totale est aussi illusoire sauf dans des cas très particuliers. En effet, parallèlement à la minéralisation d'une portion de la matière organique on observe une stabilisation d'une autre portion au travers de la biomasse microbienne en composés humiques complexes. ces composés de forte masse moléculaire sont encore mal connus et encore moins l'effet à long terme de l'intégration de substances organiques toxiques dans ces molécules. Or il est souvent envisagé de valoriser cette matière organique en agriculture (compost de déchet organique par exemple). Ainsi la notion de détoxification reste floue et on s'intéresse peut-être un peu trop à la détoxification apparente sans résoudre le problème d'immobilisation de la toxicité dans les composés humiques qui seront dégradés progressivement au cours du temps.

### 1.4. lixiviation

La détoxification, la dégradation et la métabolisation des matières organiques ne sont pas les seuls mécanismes disponibles pour le traitement des déchets. De manière similaire au système racinaire des végétaux dans les sols, les microorganismes, placés dans un certain milieu mettent en oeuvre des mécanismes biogéochimiques facilitant le transfert des substances dont ils ont besoin. Agissant hors du milieu vivant en produisant des substances chimiques libérées dans le milieu extérieur, les microorganismes modifient passivement ou activement (en dépensant de l'énergie) l'environnement physico-chimique. La production de protons, la mise en oeuvre de couples d'oxydo-réduction particuliers, la libération d'enzymes de dégradation ou de molécules organiques se complexant facilement avec des métaux sont autant de phénomènes favorisant l'extraction des substances à partir des matrices solides.

Ce rôle d'activateur de la lixiviation des matériaux, valable pour des matières organiques qui sont ensuite dégradées ou pour des matières minérales, a été utilisé aujourd'hui pour le traitement de minerais, de déchets et effluents industriels et a donné naissance à la

biohydrométallurgie. De tels processus peuvent être mis en oeuvre pour le traitement de déchets ou de sols contaminés par des métaux lourds hautement toxiques (mercure, cadmium, plomb...) ou par des radionucléides. Le couplage du procédé biotechnologique d'extraction à des procédés physico-chimiques de lavage ou d'extraction permet d'améliorer la récupération de polluant à partir de la matrice.

Liés à la physiologie des microorganismes, les processus de biolixiviation sont complexes et surtout couplés à la physico-chimie du milieu et il nécessitent encore des recherches fondamentales dans l'objectif d'une bonne maîtrise des phénomènes.

#### 1.5. accumulation

Le contrôle des transferts de matières entre le milieu vivant et l'extérieur utilise des systèmes membranaires sélectifs et parfois actifs. Le rôle normal de ces filtres ou de ces pompes biologiques quand ils sont mis en présence d'une substance particulière peut être dévié en favorisant l'accumulation interne de cette substance. De plus, des substances chimiques se fixent préférentiellement sur des matières organiques ou se solubilisent mieux dans la matière organique que dans l'eau. Ainsi, plusieurs phénomènes sont à l'origine d'accumulations sélectives dans les organismes vivants.

L'accumulation est un moyen pour établir un déséquilibre favorisant l'extraction des polluants puis leur concentration dans des organismes vivants. Ainsi, une séparation de la biomasse et du matériau permettra de récupérer les polluants immobilisés. Directement applicables aux effluents liquides et gazeux, ce phénomène est difficile à utiliser pour le traitement des matières solides. Si aujourd'hui, en dehors de l'utilisation de végétaux supérieurs pour extraire des métaux lourds ou des radionucléides de sols naturels contaminés puis récolter la contamination comme on récolte du blé, les méthodes de séparation efficace ne sont pas disponibles, la bioaccumulation peut être considérée comme un traitement d'immobilisation de la toxicité dans de la matière organique stabilisée.

#### 1.6. mieux connaître les compétences du monde vivant

Dans l'ensemble des mécanismes d'action évoqués, des travaux sont encore nécessaires pour mieux connaître les compétences des organismes vivants, en comprendre les mécanismes prépondérants, et en valider l'intérêt pratique. Ainsi on disposera d'outils biotechnologiques adaptés aux problèmes rencontrés et de connaissances fondamentales sur les mécanismes mis en oeuvre, base de conception des procédés de traitement. Les recherches sur la biodégradation et la biolixiviation des toxiques ainsi que sur les mécanismes métaboliques associés sont les domaines où la recherche a encore beaucoup à apporter. Le tableau 6 nous rappelle les déchets et substances dangereuses associées pouvant faire l'objet d'un traitement biologique en parallèle avec les méthodes utilisant des extractions par voie gazeuse ou aqueuse.

Déchets	Substances dangereuses	Traitement biologique	Extraction par voie gazeuse	Extraction par lavage
Solvants halogénés usés et déchets à base d'hydrocarbures aliphatique chlorés	1,1,2-Trichloroéthylène (TCE)	X	X	
	Chloroforme	X	X	
	1,1,1-Trichloroéthane (TCA)	Xa	X	
	Tétrachloréthylène (PCE)	Xa	X	
	1,2-Trans-dichloroéthylène (DCE)	X	X	
	Chlorure de méthylène	X	X	
	1,1-Dichloroéthane		X	
	1,1-Dichloroéthane	X	X	
	Chlorure de Vinyl	X	X	
	Tétrachlorure de carbone		X	
	1,2-Dichloroéthane (EDC)	X	X	
	1,1,2-Trichloroéthane	Xa	X	
	1,1,2,2-Tétrachloroéthane	Xa	X	
	Cis-1,2-dichloroéthylène	X	X	
	Trichlorofluorométhane		X	
	Chlorométhane	X		
	Bis-2-chloroéthyl)ether	X	X	
Dibromochlorométhane		X		
Déchets à base de phénols et benzènes chlorés ou des pesticides dérivés	Chlorobenzène	X	X	
	Pentachlorophénol (PCP)	X	X	X
	Dichlorobenzène	X	X	
	Hexachlorobenzène (HCB)	Xa		X
	2,4-D, sels et esters	X	X	X
	2,4,5-Tt	X	X	
	Trichlorobenzène	X	X	
	Trichlorophénol	X	X	X
	Hexachlorocyclohexane	Xa	X	
	Dichlorophénol	X	X	X
	Cyclohexane	X	X	
	Chlorophénol	X	X	X
Solvants non-halogénés usés	Toluène	X	X	
	Benzène	X	X	
	Phénol	X	X	X
	Ethylbenzène	X	X	
	Xylène (o, m, p)	X	X	X
	Méthyl éthylcétone	X	X	X
	Acétone	X	X	X
	Méthylisobutylcétone	X	X	X
	Crésols	X	X	X
	Ethylether	X	X	X
	Méthanol (alcools)	X	X	X
Déchets de traitement des surfaces métalliques	Plomb	Xb		X
	Cadmium	Xb		X
	Arsenic	Xb		X
	Zinc			X
	Chrome	Xb		X
	Cuivre			X
	Nickel			X
	Barium			X
	Sélénium	Xb		
	Mercure	Xb		
	Cyanure	X		X
Azide	Xb			
Produits et déchets de la pétrochimie alcanes, essence, gasoil, pétrole brut, déchets de raffineries	Naphtalène	X	X	X
	Phénanthrène	X		X
	Benzo(a)pyrène	X		X
	Anthracène	X		X
	Bis(2-éthylhexy)phthalate	X		X
	Styrène	X		X
	Benzo(jk)fluorène	X		X
	Pyrène	X		X
	D-n-butylphthalate	X		X
	Acenaphtène	X		X
	Tetrahydrofuran	X		X
	Chrysène	X		X
	Diethylphthalate	X		X
	Benzo(a)anthracène	X		X
	Dibenzofurane	X		X

a : Dégradation anaérobie

b : Transformation biologique sans dégradation

TABLEAU 6 : Exemple de déchets et de substances dangereuses pouvant être traités par procédés biologiques

## I - 2. L'écologie : gérer le milieu où agissent les outils

Une fois que l'on dispose d'un outil biotechnologique qu'il s'agisse d'une souche pure, d'une communauté microbienne ou de communautés couplées, il est nécessaire de s'intéresser à l'inoculation, au développement et au maintien des organismes au contact du déchet à traiter. Que ce soit avec le monde végétal ou le monde microbien, les organismes mis en oeuvre doivent se retrouver dans un environnement favorable à leur activité normale (métabolismes centraux) et à l'activité parallèle de traitement du déchet. L'étude de cet environnement en termes de conditions optimales pour l'activité des organismes ou plutôt pour le fonctionnement du procédé de traitement et en termes de conditions limites relève d'une analyse des facteurs du milieu physique, chimique et biologique. Cette étude écologique des outils biotechnologiques est fondamentale dans la conception même des procédés de traitement et de leur pilotage.

### 2.1. milieu physique : les supports biologiques

Quand on travaille avec le monde végétal, on sait que le sol et son organisation structurale sont fondamentaux pour l'ancrage des végétaux en influençant le développement du système racinaire. Dans le cas des microorganismes, on retrouve le même type de dépendance vis à vis des caractéristiques physiques du milieu.

L'utilisation de microorganismes dispersés dans une phase aqueuse plus ou moins concentrée en déchet et agitée (bioréacteur agité) évite les questions de support mais pose des problèmes de séparation (eau épurée, déchet épuré et biomasse microbienne). La technologie des stations d'épuration des eaux usées donne une idée des problèmes et solutions trouvés au cours du développement des procédés biologiques et en particulier au niveau de la gestion des boues biologiques (décantation, recyclage, élimination).

L'utilisation des cultures fixées se développe en augmentant souvent les rendements du traitement tout en limitant les problèmes de séparation. Des matériaux de remplissage divers sont développés pour la surface spécifique qu'ils développent et leurs propriétés d'adhésion avec les microorganismes. Ces matériaux supports peuvent être synthétiques (à base de plastique par exemple) ou naturels (à base de matériaux argileux par exemple) et rentrent aussi bien dans la conception de digesteurs agités, en lit fluidisé ou en lit fixé. La fixation de l'outil biologique ou son agglomération en structures communautaires (biofilms, biogranules...) favorise la stabilité des organismes et les interactions biologiques communautaires parfois indispensables au traitement de la contamination tout en disposant d'une surface de contact importante entre milieu liquide contaminé et organismes. De plus, il est possible d'utiliser le pouvoir d'adsorption du matériau support pour favoriser la fixation des polluants aux abords des microorganismes et donc leur transformation biologique (charbon actif par exemple).

Les caractéristiques d'un déchet solide comme support de développement pour les microorganismes sont intéressantes à étudier pour les procédés de traitement direct des solides sans passage par un état de boue liquide. La présence de matériau à forte surface spécifique comme les argiles peut être un facteur important pour la conception d'un traitement biologique de solides. Enfin, si les caractéristiques du déchet comme support biologique sont mauvaises, le mélange avec d'autres matériaux solides, dont les qualités de support biologique sont prouvées, est une solution parfois testée.

Dans le cas du compostage des déchets, on peut citer l'utilisation de copeaux de boies, de sciure ou d'autres matières végétales servant à la fois de matériau structurant (voir les paragraphes sur la biodisponibilité) et de matériau support pour des microorganismes habituellement spécialisés pour la dégradation du bois.

## 2.2. milieu chimique : l'environnement physico-chimique et nutritif

Au milieu physique permettant ou non aux organismes de se stabiliser dans le milieu viennent s'ajouter toutes les conditions physico-chimiques du milieu. Dans le cas général, un organisme aura un fonctionnement fluctuant avec les conditions physico-chimiques extérieures. Pour un fonctionnement envisagé, il existe souvent des conditions physico-chimiques optimales. De plus, les organismes peuvent s'adapter à une certaine variabilité des conditions de milieu en modifiant leur fonctionnement mais uniquement dans un domaine de valeurs limites qu'il est nécessaire de connaître pour limiter les problèmes de maintien en vie des organismes.

Il s'agit d'abord de satisfaire les besoins des métabolismes centraux. Un des points importants, ici, est l'optimisation de la composition des milieux de culture (apport de nutriments nécessaires et suffisants tels que oxygène, azote, phosphore, éléments traces et oligoéléments, cométabolites...) en fonction de la biomasse nécessaire au bon fonctionnement du procédé et des modifications éventuelles du rendement des mécanismes associés au traitement du déchet. Il est sûr, que la bonne connaissance de la physiologie des microorganismes utilisés et des mécanismes mis en oeuvre pour le traitement (stoechiométrie globale des phénomènes) est une aide précieuse à l'évaluation de bilans de matière permettant d'estimer les besoins en nutriments des microorganismes. Le tableau 7 donne un exemple de composition de solution nutritive pour des communautés microbiennes aérobies, mésophiles et hétérotrophes.

Composition	Quantité
H <sub>2</sub> O	100 ml
C	30,0 g
N	2,5 g
P	1,0 g
S	0,3 g
K <sup>+</sup> , Mg <sup>++</sup>	traces
Oligo-éléments	traces

TABLEAU 7 : Composition d'un milieu de culture d'enrichissement en microorganismes aérobies, mésophiles et hétérotrophes

(source : COOK et HUTTER, 1981)

De plus, il s'agit aussi de satisfaire des conditions physico-chimiques importantes pour le bon développement des populations : température, acidité du milieu, conditions d'oxydo-réduction, salinité, pression sélective particulière (présence de méthane par exemple), ... Le contrôle de la température ou la prise en compte de la température en tant que facteur limitant sont deux domaines d'optimisation possible. En parallèle, la recherche de moyens de correction de la physico-chimie du milieu en présence du déchet est indispensable pour assurer une stabilité du procédé dans le temps. En plus des données physiologiques sur les organismes et leur activité, la connaissance des caractéristiques physico-chimiques du déchet lui-même et celle de matériaux tampons disponibles (solutions artificielles ou matériau minéral comme les carbonates pour corriger l'acidité) permettent de concevoir des techniques optimales de pilotage des procédés. Le tableau 8 donne les facteurs limitants principaux du milieu et les recommandations données aujourd'hui pour ces facteurs.

Facteurs	Niveaux recommandés
Eau	25 à 85 % de la capacité de rétention, succion inférieure à 0,01 MPa
Oxygène	aérobiose : > 0,2 mg/l d'oxygène au moins 10 % de la porosité non saturée et aérée anaérobiose : < 1 % d'oxygène en volume
Potentiel Redox	aérobiose : > 50 mv anaérobiose : < 50 mv
pH	5,5 à 8,5
Nutriments	Principalement cosubstrat carboné azote et phosphore (on suggère C:N:P 120:10:1)
Température	15 à 45 °C (Mesophiles)
Toxicité	Inférieure aux concentrations léthales 10 %
Perméabilité	suffisante pour contrôler les transferts d'eau et de gaz

TABLEAU 8 : Principaux facteurs limitants de l'activité des microorganismes



2.3. milieu biologique : symbioses, synergies, compétitions, antagonismes

L'étude des conditions de milieu ne s'arrête pas aux conditions physiques et chimiques certe fondamentales. Travailler avec du vivant implique de connaître les interactions possibles entre les différents organismes d'un système. Ces interactions peuvent être nécessaires, elles peuvent aussi être fatales pour le procédé. La figure 6 rappelant les voies métaboliques de la dégradation anaérobie des substances organiques illustre bien la nécessité, dans ce cas, de travailler avec des communautés couplées dont les interactions sont fondamentales pour l'efficacité du système de transformation.

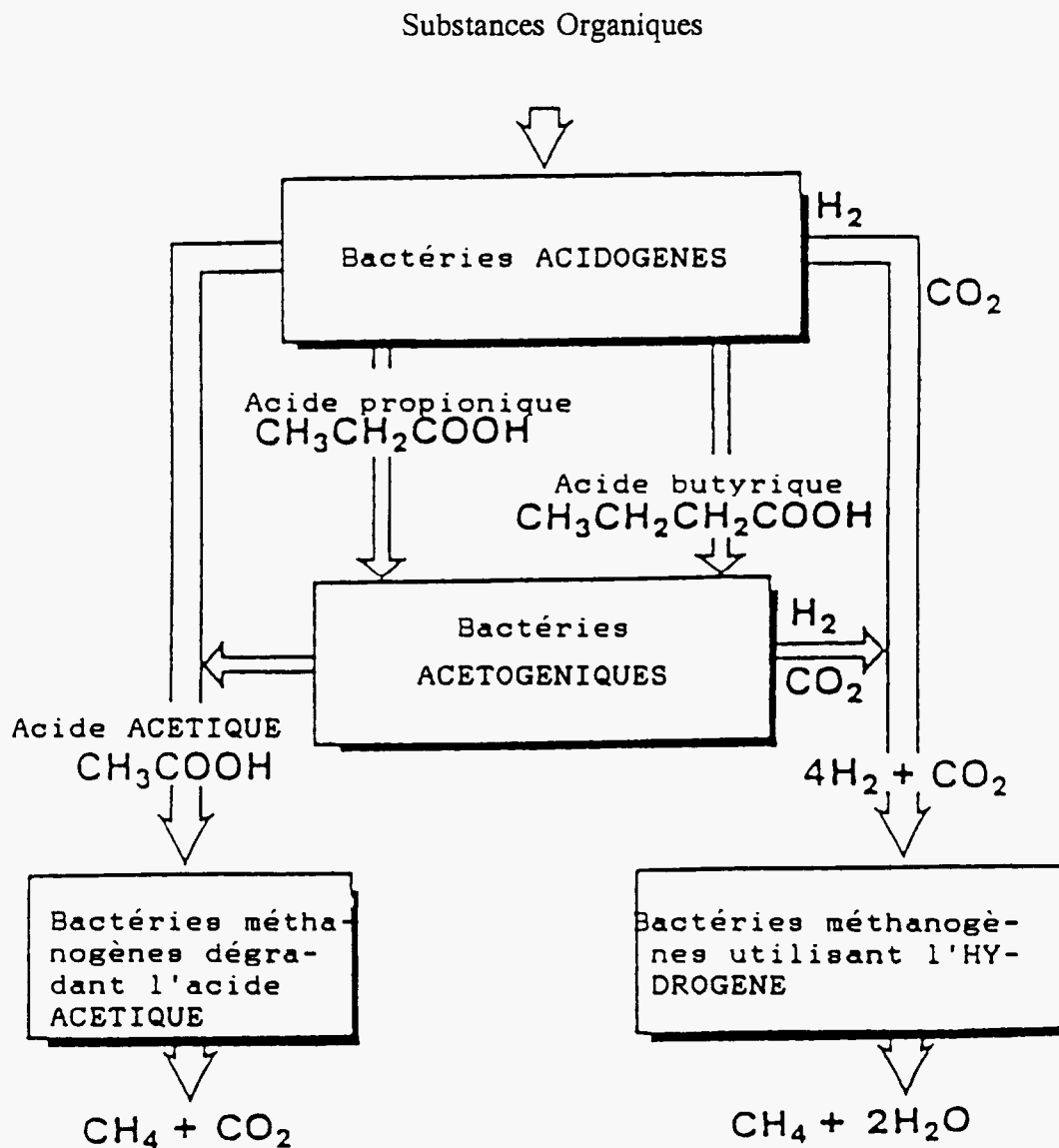


Figure 6 : Voies métaboliques de la digestion anaérobie [Innovation 128, 1990]

La symbiose est la caractéristique de beaucoup de communautés de microorganismes et elle s'étend parfois à des organismes supérieurs (symbiose avec le monde végétal pour la fixation de l'azote, symbiose avec le monde animal pour les fermentations digestives...). En tant que réalité des communautés microbiennes, une chaîne d'organismes est souvent nécessaire à l'accomplissement d'une transformation de la matière (dégradation, détoxification). Connaître ces symbioses permet d'en utiliser au mieux les compétences sans avoir nécessairement recours au génie génétique. Aujourd'hui, de nombreuses études s'intéressent aux compétences des communautés mais des connaissances plus approfondies sur les mécanismes symbiotiques seraient sans doute riches d'enseignement sur les atouts de tels systèmes.

La synergie entre différents organismes est possible. Il y a synergie quand deux organismes ou communautés peuvent effectuer le même type de transformation mais que, réunis ensemble, le rendement de la transformation est meilleur. La différence avec la symbiose est uniquement que les organismes peuvent travailler seuls, chacun de leur côté, alors qu'en symbiose, leur séparation entraîne l'arrêt des transformations. La connaissance des synergies est en conséquence un moyen d'amélioration des rendements des procédés biotechnologiques et sans doute un moyen d'élargir les possibilités d'adaptation du procédé.

La compétition entre les organismes est courante. La mise en place de pressions sélectives, permet d'utiliser la compétition pour rendre prépondérants les organismes les plus compétents. Ensuite, dans le cadre d'un procédé biotechnologique, il est plutôt nécessaire de l'éviter, car elle diminue le potentiel global de transformation et si l'on a pas bien choisi les pressions sélectives, la prolifération d'un autre organisme peut se faire au dépend du procédé lui-même.

L'antagonisme entre organismes peut être rencontré si la présence d'un organisme particulier en plus des aspects classiques de compétition, modifie les conditions de milieu ou même produit des substances toxiques pour d'autres organismes, entraînant ainsi l'arrêt de leur développement. Le résultat final est une prolifération d'un organisme qui ensuite est rarement adapté à la pression sélective initiale.

#### 2.4. Optimiser le pilotage des compétences

Dans les trois domaines exposés, l'étude des supports de cultures, des apports de substances chimiques correctrices ou nutritives, et la compréhension des complémentarités ou incompatibilités entre organismes permet de mieux préparer l'étape de conception des procédés biotechnologiques. Elle conditionne en effet le choix des méthodes de sélection des organismes compétents et de production d'un outil biotechnologique opérationnel, le choix des matériaux support éventuels, et celui de la composition des apports en solution au cours du fonctionnement du procédé.

### I - 3. La cinétique : gérer la dynamique des transformations

Avec des outils biotechnologiques fonctionnant sur des mécanismes connus et dans des conditions de mise en contact avec le déchet favorisant la stabilité du procédé de traitement, d'autres facteurs limitants liés au milieu inerte (déchet dans les conditions de traitement) peuvent être étudiés dans l'objectif unique d'améliorer le rendement des transformations retenues pour le traitement. Les limitations principales de l'action des organismes sur des substances contenues dans un déchet sont les interactions physico-chimiques avec les constituants du déchet et éventuellement les matières ajoutées au déchet et les limitations au transfert de matière entre le déchet et les organismes actifs. La mobilité des organismes eux-mêmes doit être prise en compte dans ces processus dynamiques.

#### 3.1. les transferts de matières : effet de structure des déchets

Les transferts de matières sont de deux types. Ceux liés aux mouvements d'un vecteur et ceux liés aux processus diffusionnels dans un vecteur immobile [J. VILLERMAUX, 1985].

Dans le cas du traitement en phase liquide (bioreacteur agité ou lit fluidisé), ce sont les connaissances sur la qualité du mélange et sur les limitations diffusionnelles aux abords des particules en suspension (solides du déchet et microorganismes) qui seront l'objet des études. L'accent est mis, ici sur les outils de modélisation des processus prépondérants de transfert.

Dans le cas du traitement des effluents liquides ou gazeux par des cultures fixées, la compréhension des limitations diffusionnelles aux abords des structures de support est fondamentale pour la conception des installations.

Dans le cas du traitement en lit fixe d'un déchet en suspension, le problème est légèrement différent puisque les microorganismes sont en situation de biofilms fixes. Les techniques de description sont cependant similaires et des outils conceptuels sont disponibles pour décrire le transfert de matière.

Enfin quand le déchet solide est traité directement, c'est la structure même du déchet, ou celle du mélange réalisé pour l'améliorer, qui conditionne les limitations au transfert. L'état physico-chimique de la contamination et la position de la contamination dans la structure du déchet impose des contraintes sur les distances caractéristiques de transfert et sur les vecteurs mobiles ou immobiles disponibles pour ces transferts. La mobilité des gaz et des liquides du milieu dépend de la perméabilité du matériau et des contraintes de flux ou de potentiel subies par le matériau. La structure de l'espace poral conditionne la colonisation par les microorganismes.

Si l'on dispose aujourd'hui de moyens de description des transferts de matières, la connaissance limitée de la structure complexe et hétérogène des déchets et de son influence sur la biodisponibilité des polluants limite la compréhension des mécanismes prépondérants. En particulier, les facteurs régissant la colonisation d'un matériau solide par des microorganismes sont peu étudiés à ce jour : les étapes prépondérantes de transfert au cours de la dégradation d'un déchet organique par exemple ne sont pas vraiment élucidées.

- Quels sont les mécanismes prépondérants de colonisation d'un matériau où le substrat est peu disponible ?
- Jusqu'où les microorganismes doivent-ils coloniser le matériau et suivant quel mécanismes (mobilité passive, active ou simple colonisation par croissance des communautés) ?
- Comment des dégradations sont réalisées sans contact direct avec des microorganismes ?
- Suivant quels transferts prépondérants : substrat vers organismes ou enzymes vers substrat ?
- Quels concepts peut-on utiliser pour modéliser les transferts de matière et prévoir les limitations ?

De nombreuses questions sont posées, certaines ont sûrement quelques éléments de réponse, mais un travail important reste à réaliser dans cette direction.

### 3.2. les interactions physico-chimiques : effet de composition des déchets

Aux limitations liées aux transferts de matière, il est nécessaire d'ajouter les interactions physico-chimiques limitant la solubilisation et la vitesse des transferts en solution. Ajoutés à la structure du matériau, les polluants présents dans le déchet sont soumis à un ensemble souvent varié d'interactions avec les phases stationnaires : échange d'ions, complexation de surface, adsorption, solubilisation dans des phases organiques, précipitation et dissolution. De plus, les équilibres en solution aqueuse modifient généralement les règles du jeu des interactions avec les phases stationnaires. Ici, la connaissance des propriétés physico-chimiques du matériau et en particulier celles des polluants doit suggérer les interactions prépondérantes aux cours de la mobilisation des substances vers les microorganismes ou inversement. Là aussi, des moyens sophistiqués existent pour mettre en évidence, tester, modéliser et valider des modèles conceptuels d'interactions dans l'objectif de mieux comprendre et gérer les phénomènes de transfert [M. JAUZEIN, 1988].

### 3.3. le couplage transferts/interactions : chromatographie réactive

Le résultat de ces transferts et de ces interactions physico-chimiques est une biodisponibilité plus ou moins grande entre les polluants et les organismes mis en jeu au cours du traitement. L'augmentation de la biodisponibilité est sans doute un moyen d'augmenter sensiblement le rendement des procédés de traitement biologique de solides.

Au niveau des transferts, en dehors du traitement in situ des zones contaminées ou l'on ne peut pas modifier réellement la structure en place, des matériaux plus ou moins inertes peuvent être ajoutés au déchet pour le rendre plus perméable et plus poreux.

Au niveau des interactions physico-chimiques, des apports complémentaires de substances solubilisantes on déjà été testés (tensioactifs), de même on peut rappeler que des microorganismes particuliers peuvent être utilisés à cette fin en synergie avec des dégradeurs.

Au niveau de la prévision des phénomènes, des équipes de recherches ont développé des outils de modélisation couplant la description des transferts de matières et celle des interactions physico-chimiques [M. JAUZEIN et al., 1989]. Les outils de ce type sont de fait un support pour accélérer la démarche d'optimisation des procédés. Ensuite, une fois adaptés à la conception finale du procédé ils peuvent devenir un outil de pilotage si on leur couple les outils conceptuels de description des mécanismes actifs de traitement par les microorganismes.

#### I - 4. Le génie des procédés : gérer les applications industrielles

Une fois réunies, les données génétiques, physiologiques, écologiques et cinétiques doivent aboutir à la conception de procédés industriels de traitement des déchets. Les méthodologies du génie des procédés permettent par une approche systémique de proposer des configurations d'installation comprenant un ou plusieurs bioréacteurs adaptés à chaque situation rencontrée. Le passage d'un mécanisme biologique observé au laboratoire à une unité industrielle de traitement biologique nécessite un certain nombre d'étapes comme l'étape du pilote industriel. Faute de temps et de moyens, la méthodologie théorique n'est pas toujours suivie avec souvent des conséquences sur la viabilité future du procédé [J. VILLERMAUX, 1985].

La première étape concerne la faisabilité du procédé basée sur les mécanismes biologiques mis en oeuvre. Il s'agit de l'étude des compétences physiologiques des organismes vivants et de leur écologie. Ainsi, la nature des transformations attendues, les contraintes opératoires et certains facteurs limitants sont identifiés.

Dans un deuxième temps, il est nécessaire de préciser la dynamique des phénomènes en s'intéressant à la cinétique de croissance des organismes et à celle des transformations induites dans des conditions où les limitations au transfert de matière sont minimisées. Pour réaliser cette étape, il est pratique de travailler avec des réacteurs agités continus ou des systèmes qui s'en approche pour faciliter l'exploitation cinétique des données de fonctionnement de ce type de réacteur. Dans le cas des bioréacteurs, deux autres types de configurations sont utilisées :

- les bioréacteurs piston recyclés en particulier dans le cas des biomasses fixées ou en lit fluidisé (le recyclage permet de se rapprocher des conditions de réacteur agité continu),
- les bioréacteurs à fonctionnement séquentiel permettant d'inclure une étape de séparation de la biomasse en suspension en simulant ainsi des installations industrielles où bioréacteur et décanteur sont séparés dans l'espace (le fonctionnement semi-continu et l'étape réactionnelle en mélange permet de se rapprocher des conditions de réacteur agité continu).

L'étude de la cinétique de transformation d'un composé toxique en fonction de sa concentration permet de choisir un modèle d'installation de bioréacteur(s) (dans un réacteur agité continu on s'intéresse à la concentration en sortie qui est la même que celle du réacteur). La figure 7 donne l'allure des courbes donnant la vitesse globale de transformation en fonction de la concentration en polluants qui peuvent servir de base à ces études cinétiques. Cette troisième étape s'accompagne de l'étude plus poussée des limitations physico-chimiques du transfert de matières que l'on réalise souvent à l'aide

de pilotes de laboratoires pour mieux appréhender l'influence de l'état de la biomasse (suspension, biofilms, biogranules..), de l'état physico-chimique des polluants et du déchet ainsi que des différents apports en substances correctrices et nutritives dans le système. Cette étude doit déboucher sur la conception d'un modèle général de fonctionnement d'une installation de traitement.

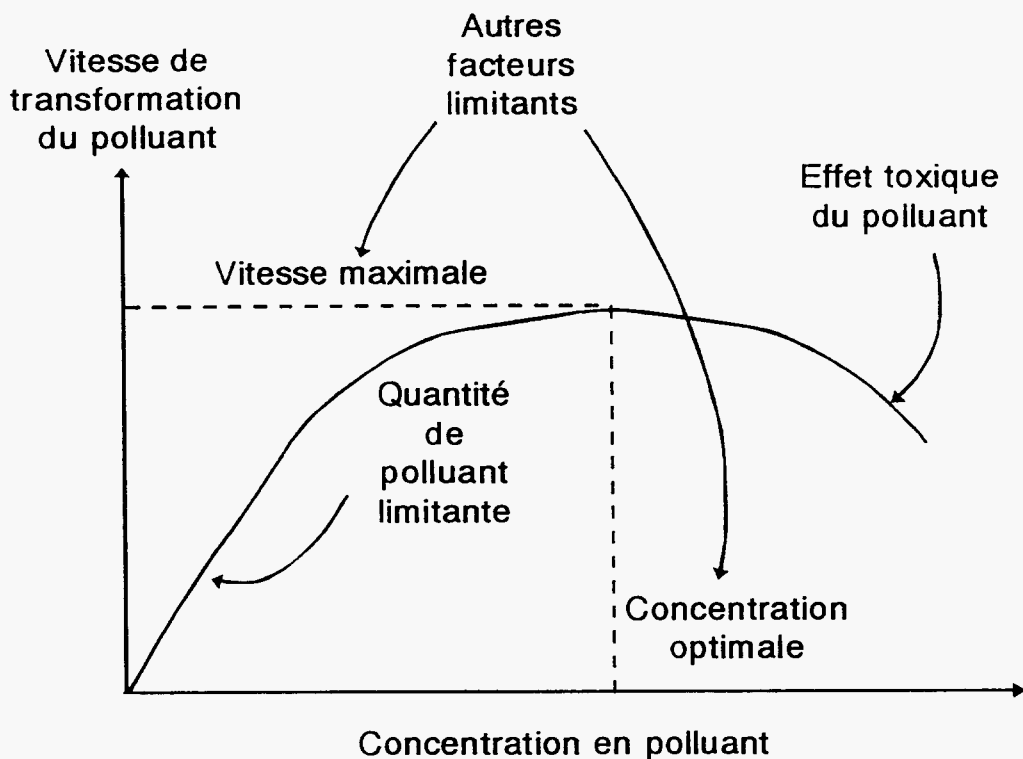


Figure 7 : Evolution schématique de la vitesse de transformation biologique d'un polluant en fonction de sa concentration

L'étape suivante doit, si possible, permettre de valider ce modèle sur une installation pilote qui permettra de résoudre des problèmes techniques inhérents à tout nouveau procédé et d'effectuer les corrections de conception et de modélisation associée. Une fois validée au stade du pilote industriel, la méthodologie peut être portée au stade de l'installation industrielle proprement dite sur la base d'un modèle de fonctionnement qui pourra contribuer à son pilotage. Le tableau 9 donne pour une série de substances dangereuses le stade de développement des procédés de traitement biologique [GERME S.A., 1990].

	Laboratoire	Pilote	Installation industrielle	écosystème
<b>Polluants organiques</b>				
Benzène	X	X	X	eaux/sols
Toluène	X	X	X	eaux/sols
Xylène	X	X	X	eaux/sols
Phénols	X	X	X	eaux/sols
Créosote	X	X	X	eaux/sols
Dioxine	X	X	X	eaux/sols
Pentachlorophénol	X	X	X	eaux/sols
Trichloréthylène			X	boues
Aromatiques polycycliques (PMAs)	X	X	X	eaux
Phénantrène			X	boues
Anthracène			X	boues
Benzo(a)-pyrène			X	boues/sols
Atrazine	X		X	eaux
Alachlor	X		X	eaux
PCB	X	X	X	eaux/sédiment
DDT	X	X	X	eaux
Lindane	X	X		eaux
Aldrine	X	X		eaux
Ac. chlorobenzoïque	X	X		eaux
Diméthyl formamine	X	X	X	eaux
Parathion	X	X	X	eaux
<b>Polluants métalliques</b>				
Mercure	X	X		boues
Uranium	X	X	X	boues/sols
Plomb	X			boues
Zinc	X			boues
Cadmium	X			boues
Nickel	X			boues
Argent	X		X	boues/sols
Cuivre	X		X	boues/sols
Chrome	X		X	boues

Tableau 9 : Essais industriels sur le traitement biologique de déchet contenant des substances dangereuses

Dans le cadre des biotechnologies appliquées au traitement de déchet, divers type d'installations et concepts peuvent être envisagées. Si l'étude des réalisations concrètes en donne une idée précise, nous rappellerons ici les grandes lignes des options techniques de traitement biologique depuis l'installation industrielle jusqu'aux procédés applicables directement dans l'environnement. En ramenant un déchet solide à l'état de boue liquide l'utilisation d'installations similaires à celles mises en oeuvre pour l'épuration des effluents liquides et gazeux est envisageable. Cependant, cette alternative entraîne une dilution de la pollution dans de l'eau et nécessite un procédé très efficace de dépollution. Le traitement des matières solides en réacteur, en tas, en silos, ou en lits évite une dilution de la contamination dans de l'eau excédentaire tout en permettant un contrôle des réactions biologiques au cours du traitement. Enfin dans le cas des sols contaminés que l'on ne peut pas excaver, les technologies de traitement in situ sont la seule alternative et doivent prendre en compte la complexité inhérente aux milieux naturels.

#### 4.1. les réacteurs biologiques traitant les déchets fluides ou à l'état de boues

En général, ces installations comportent les étapes de fonctionnement suivantes :

- constitution de la boue par désaggrégation du solide et mélange avec de l'eau (cette eau peut éventuellement être une eau usée ou contaminée associée au déchet),
- alimentation de l'installation de traitement,
- réaction biologique de dépollution au sein de la boue agitée,
- arrêt du mélange et décantation de la boue,
- séparation entre un effluent aqueux dépollué recyclable pour la constitution de la boue avant traitement et des boues concentrées dépolluées dont une partie est recyclée pour maintenir la biomasse active dans le système.

Il est possible de réaliser ces étapes de manière séquentielle dans un réacteur biologique discontinu unique ou de manière continue dans des installations spécialisées placées en série. Si les réacteurs séquentiels sont utiles et performants pour les études de laboratoires ou l'optimisation sur pilote, les systèmes continus sont en général préférés en conditions industrielles (les stations d'épuration biologique d'eaux usées en sont un exemple).

##### 4.1.1. Les réacteurs biologiques séquentiels de traitement des déchets liquides ou boueux

Ce type de réacteurs biologiques est très simple puisqu'il comprend une seule enceinte. Mais la séquence de fonctionnement est plus complexe et se modifie aisément en lui donnant une grande flexibilité d'utilisation permettant d'en optimiser l'efficacité. Suivant les étapes vues précédemment, cette séquence comporte (voir la figure 8) :



- le temps de remplissage du réacteur (simple, en mélange, aéré ou non) avec la boue constituée de déchets et d'eau en présence d'un inoculum qui peut être de la boue traitée recyclée,
- le temps de réaction biologique qui peut comporter une ou plusieurs étapes en mélange aérobie ou anaérobie,
- le temps de décantation,
- le temps de vidange de l'effluent aqueux,
- le temps de vidange de la boue traitée concentrée dont une partie est laissée dans l'enceinte pour le cycle suivant (en présence d'un support libre, celui-ci doit être séparable de la boue et il est recyclé avec la biomasse fixée résiduelle).

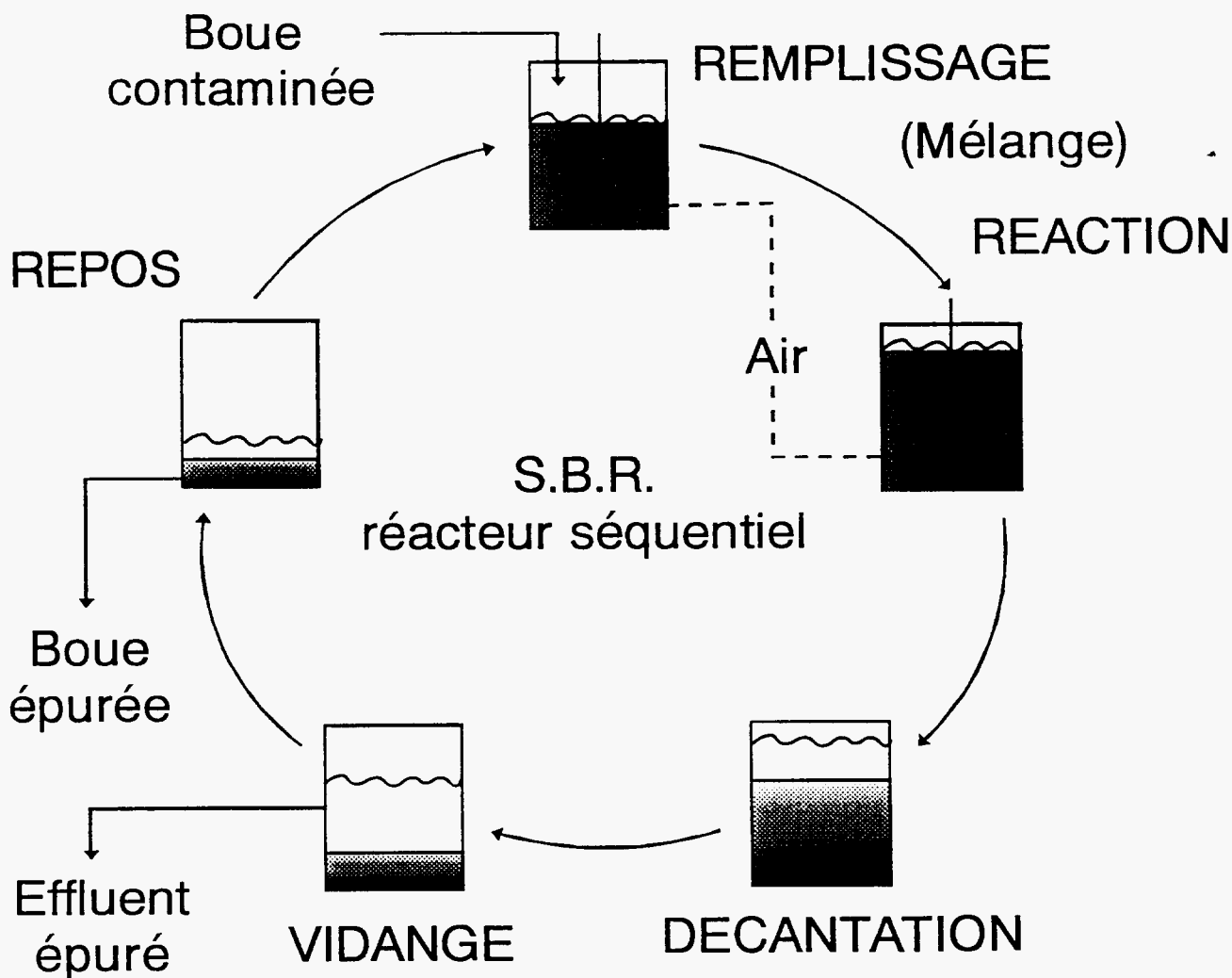


Figure 8 : schéma de fonctionnement d'un bioréacteur séquentiel

Les conditions physico-chimiques et biologiques de chaque étape ainsi que leur durée peuvent être optimisées pour un déchet donné et une biomasse active donnée (biomasse libre ou fixée sur un support libre). Ce type de dispositif, utilisé au laboratoire, permet d'une part de faire évoluer une communauté de microorganismes sous certaines pressions de sélection (adaptées à un type de déchet par exemple) et d'autre part d'optimiser les conditions opératoires du traitement. Pour la mise au point d'une installation continue, il est intéressant de noter que dans cette configuration, les temps respectifs de chaque étape seront reliés aux volumes de chaque installation spécialisée dans le procédé continu. Ainsi, le temps de réaction sera lié au volume du réacteur continu qui pour un débit donné impose un certain temps de transfert dans le réacteur, et le temps de décantation sera relié au volume du décanteur.

#### 4.1.2. Les installations continues de traitements des déchets fluides

Dans le cas des effluents gazeux, les traitements envisagés font appel à des cultures fixés éventuellement sur des supports facilitant la concentration des polluants contenus dans le gaz parallèlement à la biodégradation de ces polluants.

Dans le cas des eaux usées les polluants en solution peuvent faire l'objet d'une épuration par cultures libres ou fixées. Dans le cas des déchets solides on aura la même alternative avec simplement une contrainte liée à l'utilisation de lits fixes au travers duquel la boue doit pouvoir percoler (granulométries et quantité des matières en suspension influencent le choix du support évitant le colmatage). De plus, dans certaines configurations de réacteurs semi-continus, le déchet en suspension peut lui-même servir de support au développement de la biomasse.

Avec des cultures libres, le traitement s'apparente aux configurations de traitement des eaux usées sans décanteur primaire, avec un ou plusieurs bassins de réaction biologique suivis d'une installation de décantation avec en général recyclage de boue sur les bassins de réaction. Ces bassins de dépollution peuvent être des bassins d'activation aérobies, des bassins d'homogénéisation anoxiques ou des bassins de fermentation anaérobies (voir la figure 9).

En ce qui concerne les cultures fixes, un fonctionnement semi-continu est souvent rencontré. En effet, l'évolution progressive du lit fixe par colmatage (boue, biomasse excédentaire) nécessite de prévoir séquentiellement une régénération du lit par lavage puis décantation de la boue excédentaire extraite. Cette inconvénient est contrôlé parfois par une optimisation des débits de percolation et de la structure du support pour extraire en continu la boue excédentaire qui est décantée à l'aval. De même l'utilisation de réacteur à lit fluidisé dans lesquels particules de déchets et lit sont en suspension permet de s'affranchir du problème de colmatage mais nécessite de contrôler la séparation entre le lit et le déchet traité en suspension.

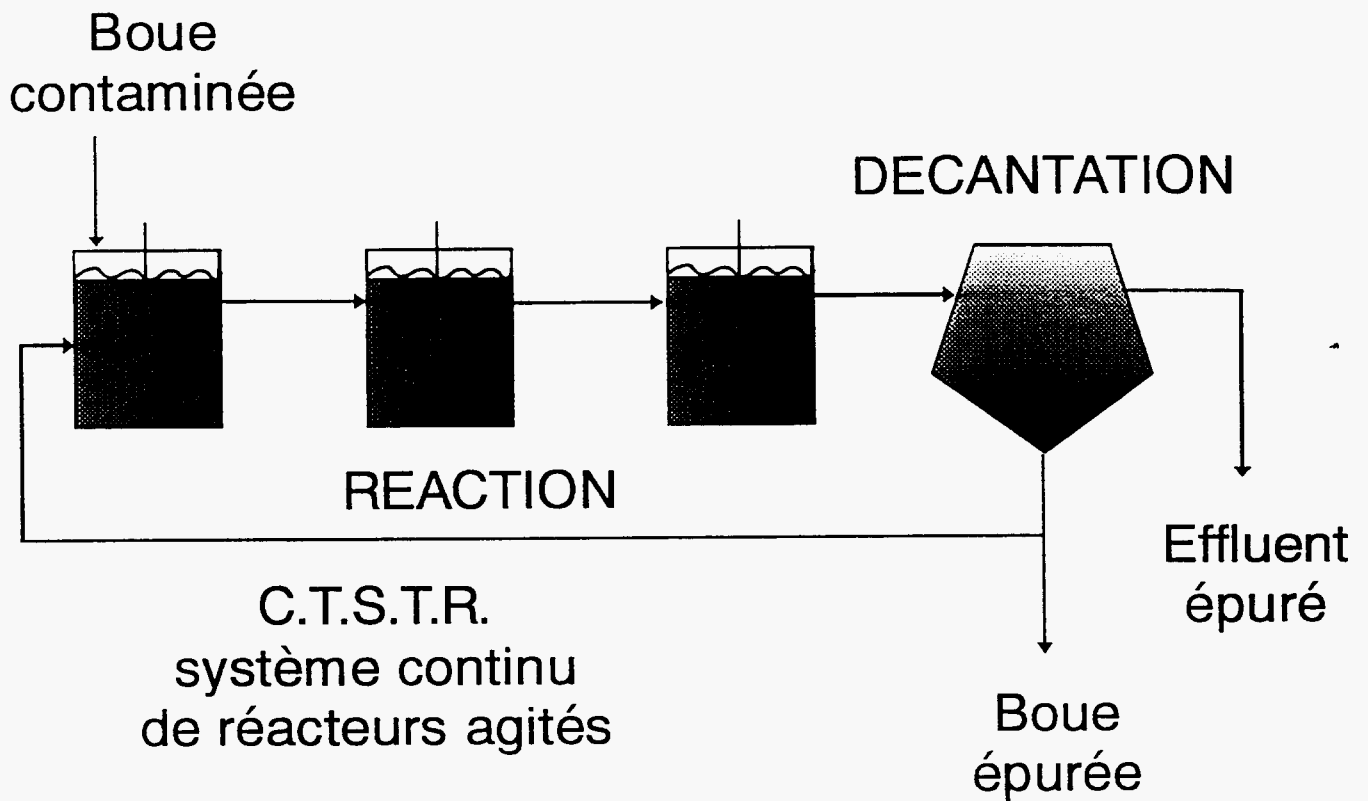


Figure 9 : Schéma de fonctionnement d'un bioréacteur continu à biomasse libre

#### 4.2. les réacteurs biologiques traitant les déchets solides

Comme dans le cas des boues, réacteurs séquentiels ou continus sont envisageables avec cependant des contraintes techniques liés à la mise en oeuvre de flux de solides. Ces réacteurs utilisent généralement le déchet solide comme support de la biomasse au moins en partie. Le contrôle des conditions d'évolution biologique s'effectue par le biais de l'aération par mélange ou percolation de gaz (air ou oxygène), de l'humidification par percolation d'eau recyclée, du chauffage éventuel du réacteur et de l'enrichissement du milieu par l'intermédiaire du milieu aqueux (inoculation, apport de nutriments, correction physico-chimique du milieu, eau oxygénée).

Le traitement des solides est généralement séquentiel. Cependant, deux configurations continues sont rencontrées :

- les réacteurs tour alimentés par le haut et où le déchet évolue lors de son transit vertical vers un exutoire situé en bas du réacteur,
- les réacteurs tournants où le déchet évolue progressivement dans un cylindre tournant incliné.

Des réacteurs de ce type existent pour le compostage des déchets organiques issus de l'agriculture, de l'agroalimentaire et des déchets ménagers (ordures ménagères et boues de station d'épuration).

#### 4.3. Le traitement "agricole" en silos, andains ou tas

Quand le traitement en réacteur n'est pas possible pour des raisons techniques ou économiques, l'utilisation de techniques biologiques se rapprochant de l'ensilage des fourrages ou du compostage des résidus de l'agriculture et de l'agro-alimentaire sont possibles.

La disposition du déchet solide en silos, andains ou tas permet de contrôler en partie les conditions d'évolution biologique. Le déchet peut être mélangé ou non à des matières structurantes pour une bonne aération du milieu et un transit de l'eau facilité. Le mélange par déplacement est utilisé dans les trois configurations pour homogénéiser le matériau et l'aérer. L'injection d'air à la base des tas est parfois employée. L'humidité du milieu est contrôlée par arrosage-drainage et l'enrichissement du milieu peut faire l'objet des mêmes apports qu'un réacteur biologique classique. Pour ce faire, les lixiviats recueillis à la base des tas sont généralement recyclés sur les tas après ajout de nutriments et éventuellement de microorganismes issus de l'adaptation et de la multiplication d'une communauté adaptée à partir de boue activée, de sol agricole sain ou contaminé.

L'ensemencement peut être réalisé au moment de la mise en place des tas, mais il est parfois inutile dans le cas des sols contaminés déjà pourvus en microorganismes adaptés et plus généralement en raison de l'ensemencement naturel à l'air libre.

Dans le cas où la température monte suffisamment grâce à une forte teneur initiale en matières organiques du déchet, on réalise un compostage pour lequel l'action des communautés aérobies thermophiles est fondamentale (voir la figure 10).

Ajouté au contrôle des lixiviats, un contrôle des émissions gazeuses, collectées et éventuellement filtrées sur charbon actif ou traitées par tout autre moyen approprié (par exemple traitement biologique par biofiltres ou biolaveur) doit souvent être mis en place pour satisfaire aux normes de rejet dans l'atmosphère. Une configuration sous serre permet de rallonger en même temps la période d'activité des microorganismes quand la température extérieure est limitante et de mieux contrôler les bilans hydriques et gazeux au niveau du déchet traité.

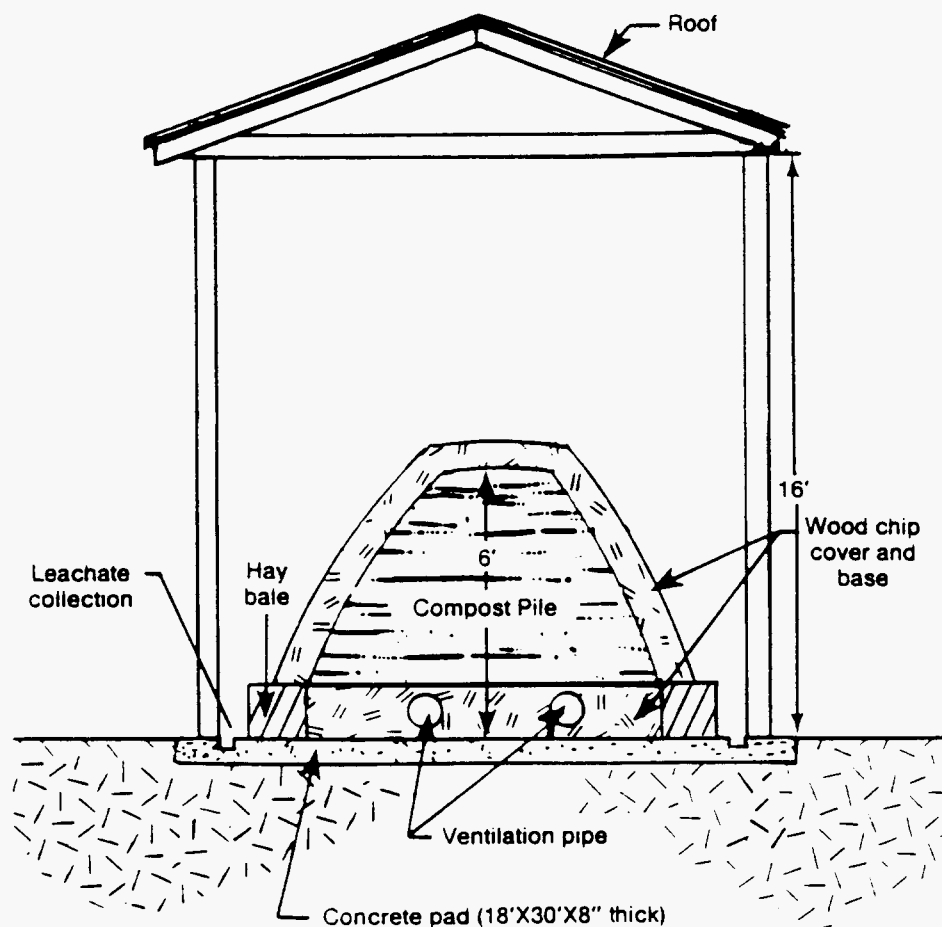


Figure 11 : Schéma d'une installation de compostage de déchets contenant des explosifs tels que TNT, RDX, HMX ou Tetryl (tiré de "Composting of explosives contaminated sediments", R.T. WILLIAMS et al. in G. LEWANDOVSKI, 1989)

4.4. le traitement "agricole" en lit cultural

Le traitement en lit cultural se rapproche plus de l'agriculture. Il nécessite parfois une surface importante mais permet d'utiliser du matériel agricole classique. Quand des précautions doivent être prises (infiltration, émission de gaz toxiques), les techniques de culture hors-sol peuvent être appliquées. La couche de déchet est alors placée sur une membrane, un système de drainage de l'eau permet d'en suivre la qualité, de la traiter dans une unité biologique associée et de la recycler avec l'eau d'arrosage après enrichissement en nutriments et si nécessaire en microorganismes. Comme les tas, les lits culturaux placés sous serre assurent un meilleur conditionnement en température, humidité, et qualité de l'air (voir la figure 11).

L'épaisseur des lits se situe en général entre 30 et 50 centimètres pour une utilisation optimale de matériel agricole pour le travail du sol. Jusqu'à 2 mètres des matériels particuliers issus de la modification de matériel de drainage permet un travail du sol en profondeur, mais la qualité du mélange est beaucoup moins sûre.

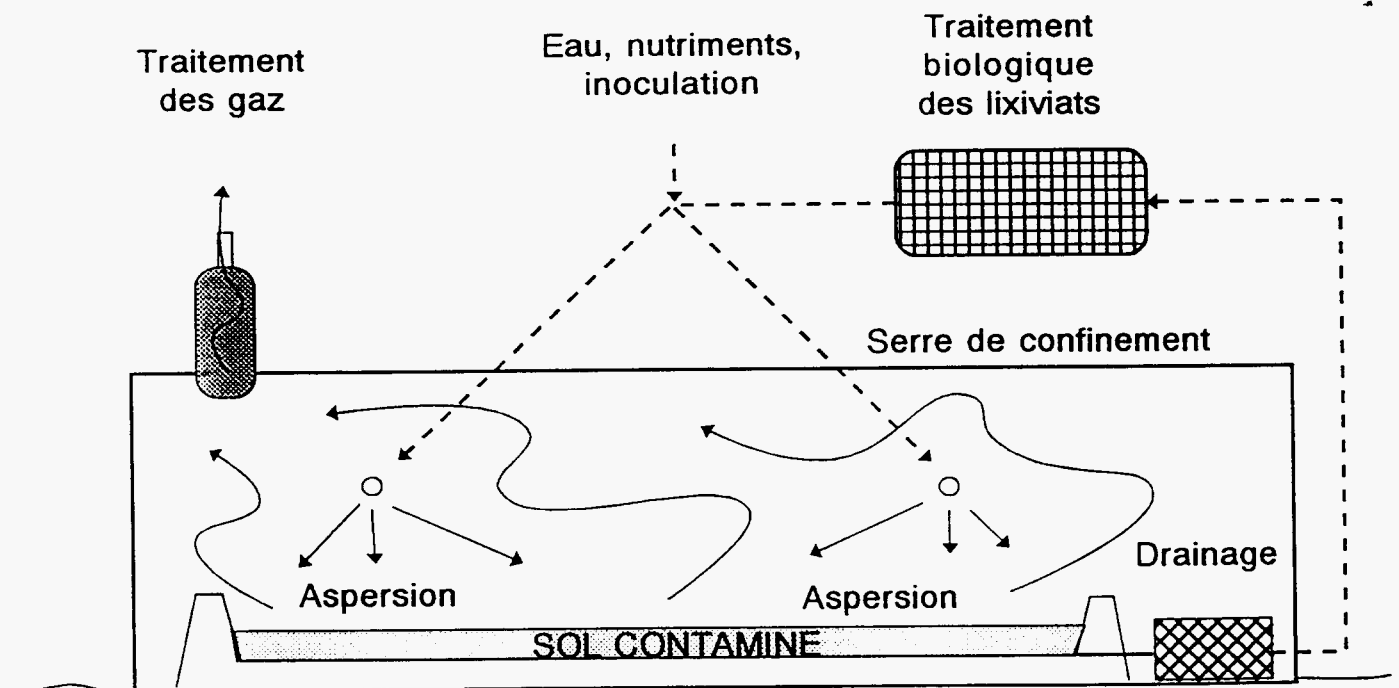


Figure 11 : schéma d'une installation de traitement en lit cultural d'après A.W. BOURQUIN, 1989

## 4.5. traitements biologiques in situ des zones naturelles contaminées

Si les techniques en réacteurs font surtout appel au génie des procédés et en particulier aux notions de génie de la réaction chimique (qu'il s'agisse de transformations biologiques ou purement chimiques), les techniques agricoles nécessitent de faire appel au génie agronomique et les techniques in situ au génie hydrogéologique et au génie civil. En effet, pour utiliser la réhabilitation biologique in situ, deux configurations principales sont proposées suivant que la contamination est uniquement en zone saturée ou que celle-ci concerne la zone non-saturée.

La décontamination d'un aquifère (figure 12) s'opère en créant une circulation forcée d'eau entre un système d'injection dans la nappe souterraine et un système de pompage dans la même nappe et si possible de manière à créer un circuit fermé. Sur le site, une station d'épuration biologique des eaux souterraines facilite le développement d'une communauté microbienne adaptée issue du sous-sol. L'eau injectée dans le milieu est enrichie en oxygène si nécessaire, en nutriments et autres substances solubles améliorant les conditions d'évolution biologique in situ de la zone saturée.

La décontamination d'une zone non saturée (figure 13) s'opère en créant une aire d'infiltration au travers de la zone contaminée par arrosage ou à l'aide d'un bassin d'infiltration. L'eau percolant verticalement atteint la nappe et un système de pompage permet de la recycler suivant le même schéma qu'au paragraphe précédent avec les mêmes possibilités de contrôle.

Dans ces conditions les possibilités d'implantation des systèmes d'alimentation-pompage en eau doivent tenir compte des contraintes hydrogéologiques liées à la structure et à la nature du sous-sol. La caractérisation du sous-sol et de sa contamination est donc la base de la conception du système de traitement et éventuellement de l'évaluation de son efficacité. Aujourd'hui, ces techniques sont testées sur des cas réels mais la prévision de leur résultat effectif et même leur contrôle pendant le traitement restent difficiles à aborder faute de connaissance.

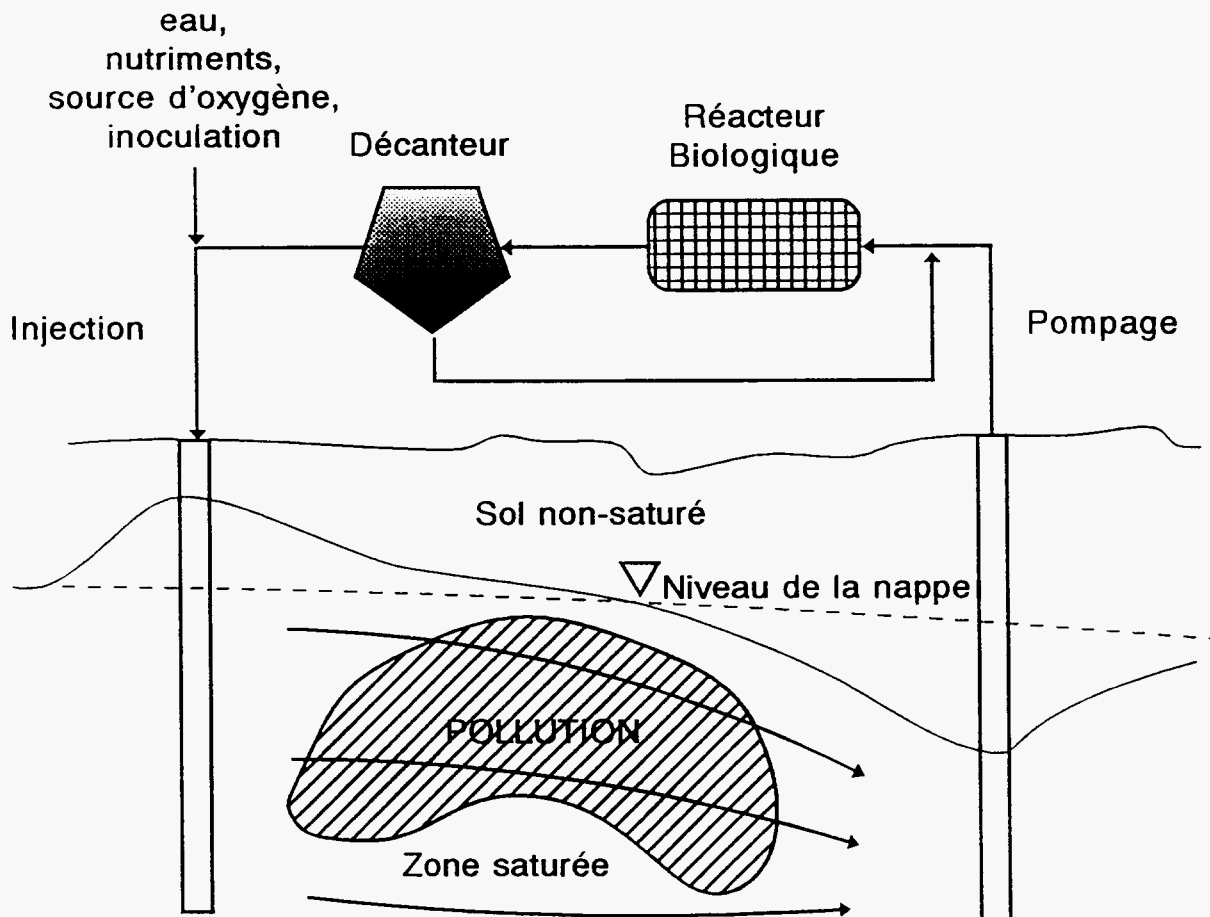


Figure 12 : schéma d'un traitement in situ en zone saturée d'après A.W. BOURQUIN, 1989



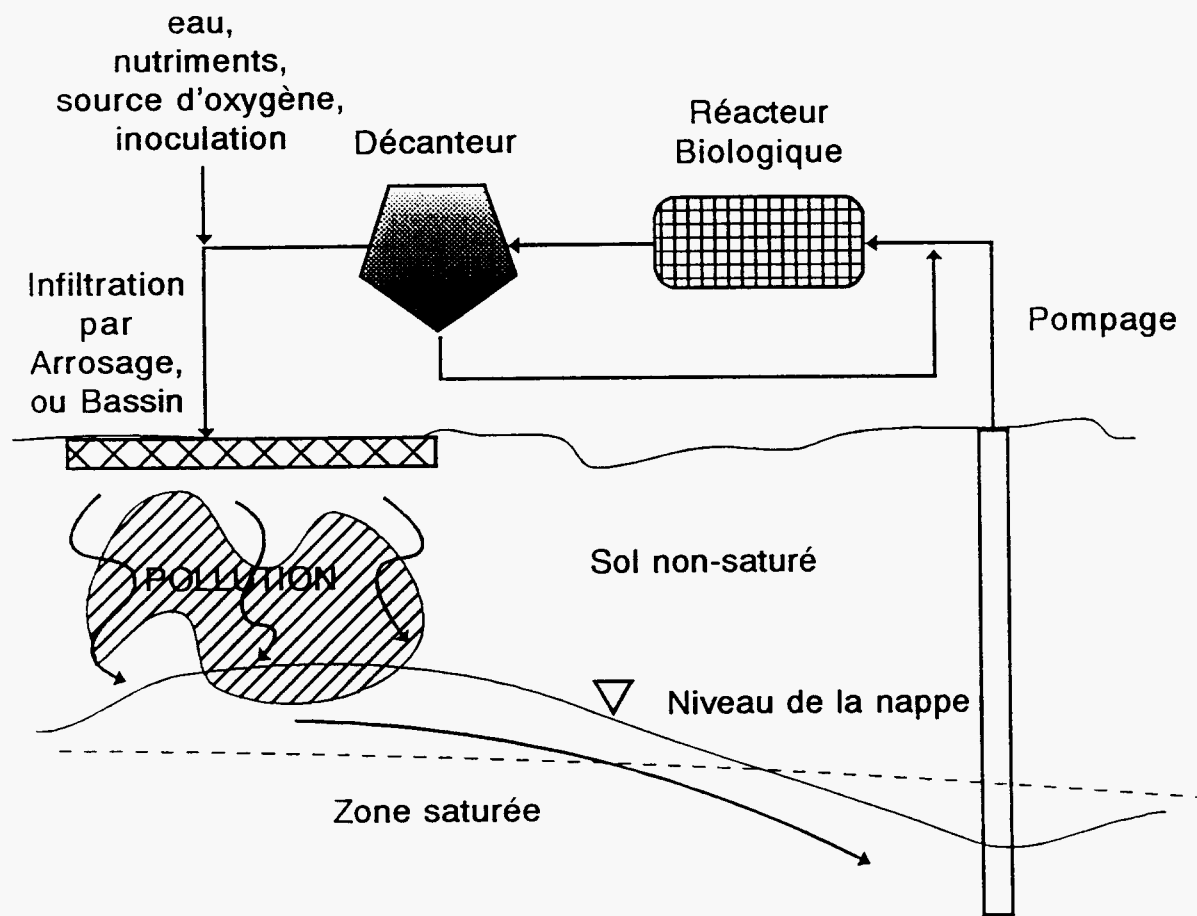


Figure 13 : schéma d'un traitement in situ en zone non saturée d'après A.W. BOURQUIN, 1989

## III DEFINITION D'AXES DE RECHERCHE PRIORITAIRES

Quelque soit l'option de traitement choisie en fonction de la faisabilité des transformations biologiques et des caractéristiques propres à chaque cas (type de déchet, état physique et chimique du déchet, contraintes techniques et économiques liés à la quantité de déchet ou à l'étendue de la zone contaminée), les données physiologiques et écologiques sont à la base de l'étude de faisabilité et d'optimisation des procédés. Ensuite, la connaissance des facteurs limitant la biodisponibilité des polluants vis à vis des mécanismes de transformation et la biocolonisation par les organismes est fondamentale pour une amélioration de l'efficacité des traitements. Enfin, les configurations technologiques de traitement peuvent varier fortement en fonction de chaque cas réel rencontré. Ainsi, l'étude de cas concrets et la validation en vraie grandeur de nouvelles configurations parfois couplées à des traitements non biologique (physico-chimique, thermique...) est indispensable à la bonne maîtrise de ces techniques en plein essor.

## III - 1. Inventaire des compétences d'organismes en tant qu'outils biotechnologiques

Les possibilités du génie génétique, si elles sont théoriquement intéressantes, nécessitent une meilleure maîtrise pour être appliquées sans incertitudes de risques vis à vis de l'homme et de son environnement. Parallèlement aux études de génie génétique, de nombreuses compétences ont pu être mises en évidence ces dernières années au sein de communautés naturelles (biodégradation des produits xénobiotiques tels que des organochlorés, des hydrocarbures polycycliques aromatiques, des polychlorobiphényles, des pesticides, ... biolixiviation de métaux précieux, bioaccumulation de métaux lourds et de radionucléides ...). L'information sur ces compétences reste encore très disséminée et nécessite d'être regroupée et complétée. Pour ce faire, la découverte de nouvelles compétences au sein des communautés d'organismes naturellement présents dans les écosystèmes doit être une source privilégiée d'outils biotechnologiques.

## III - 2. Etudes des niches écologiques et du fonctionnement des écosystèmes microbiens dans les déchets

La première limite rencontrée dans les procédés biotechnologiques est le maintien en continu de la culture compétente surtout dans des conditions relativement variables en raison de l'hétérogénéité des déchets traités. Seule une bonne connaissance des contraintes écologiques liées à chaque culture permettra un suivi et un contrôle effectif du fonctionnement optimal des procédés biotechnologiques. En particulier, si l'acidité, les conditions d'oxydo-réduction, la salinité et les nutriments majeurs sont étudiés précisément, les interactions entre les divers organismes vivants d'une communauté sont peu étudiées et devraient aider à l'optimisation des conditions d'application des biotechnologies, et ce dans un domaine plus large que le traitement des déchets.

## III - 3. Etude, modélisation et contrôle de la biodisponibilité des polluants et de la biocolonisation dans les déchets

La deuxième contrainte importante du traitement des déchets solides est l'ensemble des limitations aux transferts des polluants vers les zones où les transformations nécessaires à la dépollution s'opèrent. Ces limitations dont les origines sont les interactions physico-

chimiques entre le polluant et les substances présentes dans le milieu, ainsi que les étapes de transferts par diffusion, convection et dispersion dans le milieu, déterminent la biodisponibilité des polluants. Cette notion intégrant à la fois la mobilité du polluant vers les organismes actifs et celle des organismes ou des substances qu'ils génèrent vers le polluant, semble être une source potentielle d'amélioration des techniques actuelles de première importance. Ces améliorations passent par la mise en évidence, la compréhension, la modélisation, la validation puis le contrôle des mécanismes prépondérants de limitation.

#### III - 4. Validation et optimisation de procédés biologiques existants pour le traitement des déchets

Si dans les domaines pharmaceutiques et agro-alimentaires, les biotechnologies n'ont plus à faire leurs preuves, dans le cadre du traitement des déchets, la situation est différente face au traitement thermique par exemple. Certaines technologies biologiques sont encore appliquées de manière empirique et donc dans des conditions qui ne sont pas optimales. Il est sûr que l'amélioration constante des connaissances sur les mécanismes des transformations mises en oeuvre permettront d'améliorer des procédés déjà utilisés. De plus, beaucoup de techniques sont encore au stade de l'étude de faisabilité ou de l'optimisation sur installation pilote. En conséquence, un gros effort de validation des techniques proposées est nécessaire pour un développement industriel moins réticent.

#### III - 5. Méthodologie de prévision de l'efficacité des méthodes de réhabilitation biologique "agricole" ou in situ des zones naturelles contaminées

Les techniques biologiques de réhabilitation des sols contaminés sont proposées par des industriels et sont appliquées de manière plus ou moins empirique. Le principal problème, dans cette situation est d'afficher un résultat en terme d'efficacité et de durée du traitement. En conséquence, la mise en place de méthodologies de prévision de ces résultats et des études de démonstration sur sites réels sont aujourd'hui nécessaires pour une meilleure argumentation des choix technico-économiques de traitement des contaminations.

## DOCUMENTATION UTILISEE

DOCUMENTS GENERAUX ET SYNTHETIQUES :

ANRED ; 1984 ; "Analyse et caractérisation des déchets industriels" ; Cahier Techniques de la Direction de la Prévention des Pollutions du Ministère de l'Environnement, 137 p.

ANRED ; 1991 ; "Les déchets en France. Les chiffres clés" ; ADEME, centre d'Angers, Service de l'Information et de la Communication, 27 p.

GERME ; 1990 ; "Biotechnologies appliquées au traitement des matières toxiques (étude bibliographique)" ; GERME S.A., Marseille, 195 p.

GERME ; 1991 ; "Biotechnologies appliquées au traitement des matières toxiques (document de synthèse)" ; GERME S.A., Marseille, 59 p.

C. du GRANRUT et L. SAMANIEGO ; 1991 ; "Les stratégies de la chimie européenne. Les bouleversements dus aux biotechnologies" ; La Recherche n 235, volume 22, pp 1108-1119.

INNOVATION 128 ; 1990 ; "Le traitement des eaux et des déchets par procédés biotechnologiques" ; Innovation 128 S.A., Paris, 273 p.

INNOVATION 128 ; 1991 ; "Traitement et valorisation des déchets toxiques" ; Innovation 128 S.A., Paris, 166 p.

G. LEWANDOWSKI, P. ARMENANTE et B. BALTZIS éd. ; 1988 ; "Biotechnology applications in hazardous waste treatment" ; Engineering foundation, American Institute of Chemical Engineers, New York, 423 p.

M. MAES ; 1991 ; "La maîtrise des déchets industriels", édité par P. JOHANET S.A., 453 p.

SNIIM ; 1988 ; "Le monde des déchets", Print Industrie n 7, 91 p.

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE DES PUBLICATIONS CONSULTEES :

ANON. ; 1987 ; "Environmental biotechnology creeps out of the laboratory" ; ENDS Rep. ; n 146, pp 11-13

ANON. ; 1987 ; "Magic microbes eat the dirt" ; New Sci. ; Vol 113, n 1550, p 30

ANON. ; 1990 ; "A growth area for microbes..." ; Constr. News, pp 18-19

ANON. ; 1990 ; "Fungal fieldtrials clean-up PCBs ; Haznews ; n 25, p 14

ANON. ; 1990 ; "Bioremediation - a promising technology" ; Pollut. Eng. ; Vol. 22, n 6, pp 33-34

APRILL Wayne, SIMS Ronald C. ; 1990 ; "Evaluation of the use of prairie grasses for stimulating polycyclic aromatic hydrocarbon treatment in soil" ; Chemosphere ; Vol. 20, n 12, pp 253-265

BARTHA R. ; 1986 ; "Biotechnology of petroleum pollutant biodegradation" ; Microb. Ecol. ; Vol. 12, n 1, pp 155-172

BEWLEY R.J.F. ; 1987 ; "Microbial treatment of soil contaminants proves successful at Greenbank" ; NAWDC News, p 33

BEWLEY R., VINEY I., RESS J. ; 1990 ; "Microbial clean up of contaminated soil" ; Construction ; n 77, pp 22-32

BEWLEY R.J.F., ELLIS B., RESS J.F. ; 1990 ; "Development of a microbiological treatment for restoration of oil contaminated soil" ; Land Degradation Rehabil. ; Vol. 2, n 1, pp 1-11

BORDEN ROBERT C., KAO Chich-Ming ; 1992 ; "Evaluation of groundwater extraction for remediation of petroleum - contaminated aquifers" ; J. Air Water Manage. Assoc., Water Environment Research ; Vol. 64, n 1, p 28

BOROW H.S., KINSELLA J.V. ; 1989 ; "Bioremediation of pesticides and chlorinated phenolic herbicides - above ground and in situ - case studies" ; Superfund 89. Paper from Proc HMCRI 10th National Conf. and Exhibition, held Washington, DC, USA. Hazardous Materials Control Research Institute, pp 325-331

BOROW H.S. ; 1989 ; "Biological cleanup of extensive pesticide contamination in soil and groundwater" ; Biotreatment. The Use of Microorganisms in the Treatment of Hazardous Materials and Hazardous Wastes. Paper from Proc. HMCRI 2nd National Conf. on..., held concurrently with Superfund '89, Washington, DC, USA. Hazardous Control Research Institute, pp 51-56

BOURQUIN A.W. ; 1989 ; "Bioremediation of hazardous waste" ; Hazard. Mater. Control ; Vol. 2, n 5, pp 16-23 et 48-59

BOURNE L. ; 1990 ; "Culture vultures" ; Surveyor ; Vol. 174, n 5122, pp 12-14

COGHLAN A. ; 1985 ; "Bugs to turn wasteland into housing estates" ; Chem. Ind. ; n 20, p 671

COOVER Mirvin C., SIMS Ronald C., DOUCETTE William ; 1987 ; "Extraction of polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Spiked soil" ; Journal Assoc. off Chem. ; Vol. 70, n 6, pp 1018

DOUGLAS J. ; 1988 ; "Cleaning up with biotechnology" ; EPRI J. ; Vol. 13, n 6, pp 14-21

FRICK T.D., CRAWFORD R.L., MARTINSON M., CHRESAND T. BATESON G. ; 1988 ; "Microbiological cleanup of groundwater contaminated by pentachlorophenol" ; Pafer from Environmental Biotechnology. Reducing Risks from Environmental Chemicals through Biotechnology. Proc. conf. on...; held Seattle, USA, 19-23 Jul. Omenn, G.S. (ed). Plenum P., (1988). Basic Life Sciences ; Vol. 45, pp 173-191

HILL D.L., PHELPS T.J., PALUMBO A.V., WHITE D.C., STRANDBERG G.W., DONALDSON T.L. ; 1989 ; "Bioremediation of polychlorinated biphenyls. Degradation capabilities in field lysimeters. Scientific note" ; Appl. Biochem. Biotechnol. ; Vol. 20-21, pp 233-243

JAUZEIN M. ; 1988 ; "Méthodologie d'étude du transport transitoire de solutés dans les milieux poreux : outils théoriques, méthodes expérimentales, application à l'étude du transport transitoire du césium sous forme cationique dans un aquifère alluvial" ; INPL, Nancy

JAUZEIN M., ANDRE C., MARGRITA R., SARDIN M., SCHWEICH D. ; "A flexible computer code for modelling transport in porous media : IMPACT" ; Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, Geoderma, 44, pp. 95-113

JOHNSON E. ; 1989 ; "Answers surface for Europe's underground woes" ; Chem. Eng. ; Vol 96, n 6, pp 47-58

JURY W.A., SPENCER W.F., FARMER W.J. ; 1983 ; "Behavior Assessment Model for Trace organics in soil : I Model description" ; J. Environ. Qual. ; Vol. 12, pp 558

LOVLEY Derek R., PHILLIPS Elizabeth J.P. ; 1998 ; "Novel Mode of Microbial Energy Metabolism : organic Carbon Oxidation Coupled to Dissimilatory Reduction of Iron or Manganese" ; Applied and Environmental Microbiology ; Vol. 54, n 6, pp 1472-1480

LOVLEY Derek R., PHILLIPS Elizabeth J.P., LOMERGAN Debra J. ; 1989 ; "Hydrogen and Formate Oxidation Coupled to Dissimilatory Reduction of iron or Manganese by *Alteromonas putrefaciens*" ; Applied and Environmental ; Vol. 55, n 3, pp 700-706

McCARTY P.L. ; 1998 ; "Bioengineering issues related to in situ remediation of contaminated soils and groundwater" ; Paper from Environmental Biotechnology.

Reducing Risks from Environmental Chemicals through Biotechnology. Proc. Conf. on..., held Seattle, USA, 19-23 jul. 1987. Omenn G.S. (ed). Plenum p.,. Basic Life Sciences ; Vol. 45, pp 143-162

McLEAN Joan E., SIMS Ronald C., DOUCETTE William J., CAUPP Craig R., GRENNEY William J. ; 1988 ; "Evaluation of Mobility of Pesticides in soil using U.S. EPA Methodology" ; Journal of Environmental Engineering ; Vol. 114, n 3, p 689

MIHELIC James R., LUTHY Richard G. ; 1988 ; "Microbial Degradation of Acenaphthene and Naphthalene under Denitrification Conditions in soil-water Systems" ; Applied and Environmental Microbiology ; Vol. 54, n 5, pp 1188-1198

MONTAGUE S. ; 1986 ; "Microbes feast on toxic titbits" ; New civ. eng. ; n 680, pp 20-23

MORENO R.A. ; 1989 ; "Clean technologies : the Cuban experience" ; UNEP Ind. Environ. ; Vol. 12, n 1, pp 42-44

MORGAN Philip, WATKINSON Robert J. ; 1992 ; "Factors limiting the supply and Efficiency of nutrient and oxygen supplements for the in situ Biotreatment of Contaminated soil and groundwater" ; Water Research ; Vol. 26, n 1, pp 73-78

MUELLER James G., CHAPMAN Peter J., PRITCHARD P. Hap ; 1989 ; "Creosote contaminated sites : Their potential for bioremediation" ; Chemical Society ; Vol. 23, n 10, pp 1197

MUNNECKE D.M. ; 1984 ; "Biotechnological approaches to hazardous waste treatment" ; World Biotech Rep. Vol. 2, pp 525-532

PARK Kaps, SIMS Ronald C., DUPONT R. Ryan, DOUCETTE William J., MATTHEWS John E. ; 1990 ; "Fate of PAH compounds in two soil types : Influence of volatilization abiotic loss and biological activity" ; Environmental Toxicology and Chemistry ; Vol. 9, pp 187-195

PAYNE G.F., COPPELLA S.J., DELACRUZ N., SPEEDIE M.K., POGELL B.M. ; 1989 ; "Genetic engineering approach to treating organophosphate wastes" ; Biotreatment. The Use of Microorganisms in the treatment of Hazardous Materials and Hazardous Wastes. Hazardous Materials Control Research Institute, pp 129-133

PFLUG A.D., BURTON M.B. ; 1988 ; "Remediation of multimedia contamination from the wood-preserving industry" ; Paper from Environmental Biotechnology Proc. Conf. on..., held Seattle, USA, 19-23 Jul. 1987. Basic Life Sciences Vol. 45, pp 193-201

PORTER C. ; 1985 ; "Beneficial bugs put new life into bad land" ; Surveyor ; Vol. 165, n 4846, pp 24-26

RITTMANN B.E. ; 1986 ; "Detoxification of hazardous organic contaminants in low concentration in waters and wastewaters" ; BIO EXPO Proc. American Commercial et Industrial conf. et Exposition in Biotechnology. Butterworths Publishers, pp 497-506

SAMSON R., CSEH T., HAWARI J., GREER C.W., ZALOUM R. ; 1990 ; "Biotechnologies appliquees à la restauration de sites contaminés avec exemple d'application d'une technique physico-chimique et biologique pour les sols contaminés par des BPC. (Biotechnological approaches to the restoration of contaminated sites, illustrated by the use of a physico-chemical and biological for soils contaminated with PCB) (In French)" ; Sci. Tech. Eau ; Vol. 23, n 1, pp 15-23

SIMS Ronald C. ; 1990 ; "Soil remediation techniques at uncontrolled hazardous waste sites" ; Air et Waste Management Association ; Vol. 40, n 5, p 704

ST. JOHN W.D., SIKES D.J. ; 1988 ; "Complex industrial waste sites" ; Paper from Environmental Biotechnology Reducing Risks from Environmental Chemicals through Biotechnology. Basic Life Sciences ; Vol. 45, pp 237-252

THOMPSON D. ; 1988 ; "Biotechnology for energy conservation and a cleaner environment" ; Process Eng. Vol. 69, n 12, pp 39-41

TROTTER P.C. ; 1990 ; "Biotechnology in the pulp and paper industry : a review. Part 2 : upgarding pulp properties, papermaking, effluent treatment, and converting biomass to fuels and chemicals" ; Tappi J. ; Vol 73, n 5, pp 201-205

VALO Risto, KITUNEN Veikko, MIRJA Salkinoja-Salonen, RAISANEN Seppa ; 1984 ; "Chlorinated phenols as contaminants of soil and water in the vicinity of Two Finnish Sawmills"; Chemosphere ; Vol. 13, n 8, pp 835-844

WALTON Barbara T., ANDERSON Todd A. ; 1990 ; "Microbial Degradation of Trichloroethylene in the rhizosphere : potential application to biological remediation on of Wastes sites" ; Applied and Environmental Microbiology ; Vol. 56, n 4, pp 1012-1016

ZITRIDES T.G. ; 1989 ; "Bioremediation comes of age" ; Pollut. Eng. ; Vol. 22, n 5, pp 57-62



ANNEXE

Liste de références complémentaires

issues  
de la synthèse bibliographique  
réalisée par GERME S.A. en 1990.



AGARWAL, H.C., SAXENA, D.M. and LAL, L. (1982) *Water, Air, Soil Pol.*, 18, 441-447.

AHMED, M. and FOCHT, D.D. (1973) *Can. J. Microbiol.*, 19, 47-52.

AJMAL, M., AHMAD, A., NOMANI, A.A. and HASAN, M.Z. (1980) *Water, Air, Soil Pollut.*, 13, 447-452.

ALEXANDER, M. (1965) *Adv. Appl. Microbiol.*, 7, 35-80.

ALEXANDER, M. (1973) *Biotechnol. Bioeng.*, 16, 611-47.

ALEXANDER, M. (1975) *Microbial Ecol.*, 2, 17-27.

ALEXANDER, M., (1981) *Science*, 211, 132-138.

ALEXANDER, M., (1982) dans : "Soil biology", *Reviews of Research, National Resources Research, UNESCO.*

ALEXANDER, M., (1984) "Microbial degradation of organic compounds", D.T. GIBSON, Dekker, New-York, 1984.

ALLAHPICHAY, I., MISHIMA, M., and YOSHIDA, T. (1983) *Bull. Environ. Toxicol.*, 30, 3, 253-260.

ALVAREZ, L.M., MC CARTY, P.L. (1989) *Abstr. Annu. Meet. Am. Soc. Microbiol.*, 89(0), 335-355.

APAJALAHTI, J.H.A., KARPANOJA, P. and SALKINOJA-SALONEN, M.S. (1986a) *Int. J. Syst. Bact.*, 36, 246.

APAJALAHTI, J.H.A. and SALKINOJA-SALONEN, M.S. (1986b) *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 25, 62.

APAJALAHTI, J.H.A. and SALKINOJA-SALONEN, M.S. (1987a) *J. Bacteriol.*, 169, 675.



APAJALAHTI, J.H.A. and SALKINOJA-SALONEN, M.S. (1987a) *J. Bacteriol.*, 169, 5125.

ATLAS, R.M. (1981) *Microbiol. Rev.*, 45, 180-209.

AUSTIN, A., DENISEGER, J. and CLARK, M.J.R. (1985) *Water Res.*, 299-308.

AXCELL, B.C. and GEARY, P.J. (1975) *Biochem. J.*, 146, 173-183.

BAKER, P.B. and WOODS, D.R. (1977) *J. Appl. Bacteriol.*, 42, 187-196.

BARTHA, R. and PRAMER, D. (1967) *Science*, 156, 1617-1618.

BARTHA, R. (1969) *Science*, 166, 1299-1300.

BATTERMANN, G. and WERNER, P. (1984) *GWF-Wasser-Abwasser*, 125, 366-373.

BAUER, U. (1972) *Veröffentl. Inst. Wasser. Forsch. GmbH Dortmund und Hydrol. Abt. Dortm. Stadv. AG.*

BEADLE, T.A. and SMITH, A.R.W. (1973), *Eur. J. Biochem.*, 35, 386.

BEDARD, D.L. and BRENNAN, M.J. (1984) *Abstr. ASM Meetg., St-Louis, Missouri.*

BEDARD, D.L., WAGNER, R.E., BRENNAN, M.J., HABERL, M.L. and BROWN, J.F. (1987a) *Appl. Environ. Microbiol.*, 53, 1094.

BEDARD, D.L., HABERL, M.L., MAY, R.L. and BRENNAN, M.J. (1987b) *Appl. Environ. Microbiol.*, 53, 1103.

BENEZET, H.J. and MATSUMURA, F. (1974) *J. Agr. Food Chem.* 22, 427-430.



BENMOUSSA, M., MARTIN, G. and RICHARD, Y. (1986) *Water Res.*, 20, 11, 1333-1339.

BERTILSSON, S. and NEUJAHN, H.Y. (1971) *Biochem.*, 10, 2805.

BEUNINK, J. and REHM, H.J. (1988) *Appl. Environ. Biotechnol.*, 29, 72-80.

BIXBY, M.W., BOUSH, G.M. and MATSUMURA, F. (1971) *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 6, 6, 491.

BLOOMFIELD, C. and PRUDEN, G. (1975) *Environ. Pollut.*, 8, 217-232.

BOETHLING, R.S. and ALEXANDER, M. (1979) *Appl. Environ. Microbiol.*, 37, 1211-1216.

BOLLAG, J.M. and RUSSEL, S. (1976) *Microbial Ecol.*, 3, 65-73.

BOPP, L.H. (1986) *J. Ind. Microbiol.*, 1, 1.

BORDEN, R.C. and BEDIANT, P.B. (1987) *Water Resour. Bull.*, 23, 4, 629-636.

BOSMA, T.N.P., SCHNOOR, J.L. and SCHRAA, G. (1988) *J. Contamin. Hydrol.*, 2, 3, 225-236.

BOTT, T.L., PRESLAN, J., FINLAY, J. and BRUNKER, R. (1977) *Develop. Ind. Microbiol.*, 18, 171-184.

BOUSH, G.M. and MATSUMURA, F. (1967) *J. Can. Entomol.*, 60, 4, 918-920.

BOUWER, J.E., RITTMAN, B.E. and MC CARTY, P.L. (1981) *Environ. Sci. Technol.*, 15, 5, 596.



- BOUWER, E.J. and MC CARTY, P.L. (1983) *Appl. Environ. Microbiol.*, 45, 1286-1299.
- BOYD, S.A. and SHELTON, D.R. (1984) *Appl. Environ. Microbiol.*, 47, 272-277.
- BOYER, J.D., AHLERT, R.C. and KOSSON, D.S. (1988) *J.W.P.C.F.*, 60, 10, 1843-1849.
- BRAUCH, H.J., KUEHN, W. and WERNER, P. (1987) *Von Wasser*, 68, 23-32.
- BRAUN, K. and GIBSON, D.T. (1984) *Appl. Environ. Microbiol.*, 48, 102-107.
- BRILON, C., BECKMAN, W., HELLWIG, M. and KNACKMUSS, H.J. (1981) *Appl. Environ. Microbiol.*, 42, 39-43.
- BROWN, M.J. and LESTER, J.N. (1979) *Water Res.*, 13, 817-837.
- BRUNNER, W. (1980) *Appl. Environ. Microbiol.*, 50, 1058-1063.
- BRUNNER, W., STAUB, D. and LEISINGER, T. (1985) *Appl. Environ. Microbiol.*, 40, 950-958.
- BUMPUS, J.A. and AUST, S.D. (1987) in "Solving hazardous waste problems learning from dioxins", *American Chemical Society*, 28, 341.
- CAIN, R.B., WRIGHT, K.A., and HOUGHTON, C. (1970) *Mededelingen Faculteit Landbow Wetenschappen Gent.*, 35, 785-798.
- CALLAHAN, M., SLIMAK, M., GABEL, N., MAY, I., FOWLER, C. and FREED, R. (1979) EPA Report n° 440/4-79-029 a and b, 2 vols., NTIS (National Technical Information Service).
- CALLANDER, I.J. and BADFORD, J.P. (1983) *Biotechnol. Bioeng.*, 25, 1947-1954 and 1959-1972.



CAMPA CI, E.F., NEW, P.B. and TCHAN, Y.T. (1977) *Nature*, 266, 164-165.

CANTON, J.H., VAN ESCH, G.J., GREVE, P.A. and VAN HELEMOND, A.B.A.M. (1977) *Water Res.*, 11, 111-115.

CARPENTER, D.F., MC CORMICK, N.G., CORNELL, J.H., and KAPLAN, A.M. (1978) *Appl. Environ. Microbiol.*, 35, 949-954.

CASTRO, C.E. and BELSER, N.O. (1968) *Environ. Sci. Technol.*, 2, 779-783.

CERNIGLIA, C.E., GIBSON, D.T. and VAN BAALEN, C. (1979) *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 88, 50-58.

CERNIGLIA, C.E., GIBSON, D.T. and VAN BAALEN, C. (1980a) *J. Gen. Microbiol.*, 116, 485-494.

CERNIGLIA, C.E., GIBSON, D.T. and VAN BAALEN, C. (1980b) *J. Gen. Microbiol.*, 125, 203-207.

CERNIGLIA, C.E., VAN BAALEN, C. and FREEMAN, J.P.D.T. (1981) *Arch. Microbiol.*, 130, 272-275.

CERNIGLIA, C.E., FREEMAN, J.P., ALLHAUS, J.R. and VAN BAALEN, C. (1983) *Arch. Microbiol.*, 141, 132.

CHAKRABARTY, A.M., KARNS, J.S., KILBANE, J.J. and CHATTERJEE, D.K. (1984) "Genetic manipulation. Impact on man and society" (Eds. W. ARBER, K. ILMENSEE, W.J. PEACOCK, P. STARLINGER), Cambridge Univ. Press, Cambridge, 43.

CHANG, S.Y., HUANG, J.G. and LIU, Y.C. (1986) *J. Environ. Eng.*, 112, 1, 94-104.

CHANEY, R.L. (1973) in "Crop and food chain effect of toxic elements in sludges and effluents on land", National Association of State Univ. and Land Grant Colleges, Washington D.C., 129.



- CHAPMAN, P.J. (1972) "Degradation of synthetic organic molecules in the biosphere" 17, Proc. Conf. Natl. Acad. Sci. USA, Washington D.C..
- CHAPMAN, P.J., SANGODKAR, U.M.X. and CHAKRABARTY, A.M. (1987) Abstr. Ann. Mtg. Soc. Environ. Toxicol. Chem., 127.
- CHARLEY, R.B. and BULL, A.T. (1979) Arch. Microbiol., 123, 239-244.
- CHATTERJEE, D.K., KILBANE, J.J. and CHAKRABARTY, A.M. (1982a) Appl. Environ. Microbiol, 44, 514.
- CHATTERJEE, D.K. and CHAKRABARTY, A.M. (1982b) Mol. Gen. Genet., 188, 279-285.
- CHATTERJEE, D.K. and CHAKRABARTY, A.M. (1983) J. Bacteriol., 153, 532-534.
- CHAUDHRY, G.R. and HUANG, G.H. (1988) J. Bacteriol., 170, 3897.
- CHIESA, S.C., POSTIGLIONE, J.A. and LINNE, S.R. (1987) Environ. Technol. Lett., 8, 12, 609-618.
- CHU, J.I. and KIRSCH, E.J. (1972) Appl. Microbiol., 23, 1033.
- CHU, J.I. and KIRSCH, E.J. (1973) Dev. Ind. Microbiol., 14, 264.
- CLARK, R.R., CHIAN, E.S.K. and GRIFFIN, R.A. (1979) Appl. Environ. Microbiol., 37, 680-685.
- CLARKE, P.H. (1986) "The bacteria : the biology of Pseudomonas" (Ed. J.R. SOKATCH), Vol. 10, Academic Press, New-York, 71.



COKER, E.G. and MATTHEWS, P.J. (1983) *Wat. Sci. Technol.*, 15, 209-225.

COOK, A.M. and HÜTTER, R. (1981) in "Microbial degradation of xenobiotics and recalcitrant compounds" (T. LEISINGER, A.M. COOK, R. HÜTTER, J. NÜESCH, Eds.), 237-249, Academic Press, London.

COOK, A.M., GROSSENBACHER, H. and HÜTTER, R. (1983) *Experientia*, 39, 1191-1198.

CORNISH, A., NICHOLLS, K.M., SCOTT, D., HUNTER, B.K., ASTON, W.J., HIGGINS, I.J. and SANDERS, J.K.M. (1984) *J. Gen. Microbiol.*, 130, 2565-2575.

CORNWELL, D.A., WESTERMUFF, G.P. and CLINE, G.C. (1980) *Proc. Mid. Atlantic Waste Conf.*, 12 TM Bucknell Univ., Lewisburg, A.P., Jul. 13-15, 111-119.

CRIDDLE, C.S. (1986) *Contaminant Hydrology*, 133-142.

DAGLEY, S. (1975) *Essays Biochem.*, II, 81-138 (P.N. Campbell and W.N. Aldrige, Eds.), Academic Press, London.

DAGLEY, S. (1978) in "The bacteria" Vol. 6, (ORNSTON, L.N. et SOKATCH, J.R., Eds.), Academic Press, New-York, 305.

DAGLEY, S. (1984) *Dev. Ind. Microbiol.*, 25, 53-65.

DAUGHTON, C.G. and HSIEH, D.P.H. (1977) *Appl. Environ. Microbiol.*, 34, 175-184.

DAUGHTON, C.G. and HSIEH, D.P.H. (1977) *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 18, 48-56.

DAVIS, J.A. and JACKSON, J. (1975) *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, 47, 2292-2297.

DE BONT, J.A.M., VORAGE, M.J.A.W., HARTMANS, S. and VAN DEN





- TWED, W.J. (1986) *Appl. Environ. Microbiol.*, 54,4, 677-680.
- DE KONING, B.W. and MORTIMER, D.C. (1971) *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 6, 244.
- DON, R.H. and PEMBERTON, J.M. (1981) *J. Bacteriol.*, 145, 681-686.
- DON, R.H., WEIGHTMAN, A.J., KNACKMUSS, H.J. and TIMMIS, K.N. (1985) *J. Bacteriol.*, 161, 85.
- DORN, E., HELLWIG, M., REINEKE, W. and KNACKMUSS, H.J. (1974) *Arch. Microbiol.*, 99, 61-70.
- DORN, E. and KNACKMUSS, H.J. (1978) *Biochem. J.*, 174, 73.
- EDGEHILL, R.U. and FINN, R.K. (1983a) *Biotechnol. Bioeng.*, 25, 2165-2176.
- EDGEHILL, R.U. and FINN, R.K. (1983b) *Appl. Environ. Microbiol.*, 45, 1122-1125.
- EGLI, C., SCHOLTZ, R., COOK, A.M. and LEISINGER, T. (1987) *FEMS Microbiol. Lett.*, 43, 257-261.
- EGLI, C., TSCHAN, T., SCHOLTZ, R., COOK, A.M., LEISINGER, T. (1988) *Appl. Environ. Microbiol.*, 54, 11, 2819-2824.
- EGLI, C., THUER, M., SUTER, D., COOK, A.M., LEISINGER, T. (1989) *Arch. Microbiol.*, 152, 218-223.
- ENGELBERTS, K., SCHMIDT, E. and REINEKE, W. (1989) *FEMS Microbiol. Lett.*, 59, 35-38.
- ENGESSER, K.H., SCHMIDT, E. and KNACKMUSS, H.J. (1980) *Appl. Environ. Microbiol.*, 39, 68-73.
- EVANS, W.C., SMITH, B.S.W., FERNLEY, H.N. and DAVIES, J.I. (1971) *Biochem. J.*, 122 and 543.



- EVANS, W.C. (1977) *Nature*, 270, 17-22.
- FALCO, J.W., SAMPSON, K.T. and CARSEL, R.F. (1977) *Develop. Ind. Microbiol.*, 18, 193-202.
- FATHEPURE, B.Z. and BOYD, S.A. (1988) *FEMS Microbiol. Lett.*, 49, 149-156.
- FERRY, J.G. and WOLFE, R.S. (1976) *Arch. Microbiol.*, 107, 33-40.
- FEWSON, C.A. (1981) "Microbial degradation of xenobiotics and recalcitrant compounds" (T. LEISINGER, A.M. COOK, R. HÜTTER, and J. NÜESCH, Eds.), 141-179, Academic Press, London.
- FINA, L.R., BRIDGES, R.L., COBLENTZ, T.H. and ROBERTS, F.F. (1978) *Arch. Microbiol.*, 118, 169-179.
- FINN, R.K. (1983) *Experientia*, 39, 1231-1236.
- FISHER, P.R., APPLETON, J. and PEMBERTON, J.H. (1978) *J. Bacteriol.*, 135, 798-804.
- FOCHT, D.D. and ALEXANDER, M. (1970) *Science*, 170, 91-92.
- FOCHT, D.D. and BRUNNER, W. (1985) *Appl. Environ. Microbiol.*, 49, 99-104.
- FOGEL, M.M., TADDEO, A.R. and FOGEL, S. (1986) *Appl. Environ. Microbiol.*, 51, 720-724.
- FRANCIS, A.J., SPANGGARD, R.J. and QUECHI, G.I. (1975) *Appl. Microbiol.*, 29, 567.
- FRANKLIN, F.C.H., BAGDASARIAN, M., BAGDASARIAN, M.M. and TIMMIS, K.N. (1981) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 78, 7458.



FRANTZ, B. and CHAKRABARTY, A.M. (1986) "Degradative plasmids in Pseudomonas", in : "The bacteria", Vol. 10, The Biology of Pseudomonas, (J.R. SOKATCH, Ed.) Academic Press, NY, 295-323.

FRANTZ, B. and CHAKRABARTY, A.M. (1987a) Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 84, 4460.

FRANTZ, B., ALDRICH, T. and CHAKRABARTY, A.M. (1987b) Biotechnol. Adv., 5, 85.

FRANTZ, B., NGAI, K.L., CHATTERJEE, D.K., ORNSTON, L.N. and CHAKRABARTY, A.M. (1987c) J. Bacteriol., 169, 704.

FRIBERG, L. and VOSTAL, J. (1972) in "Mercury in the environment", CRC Press, Boca Raton, Fla, 2, 12.

FURUKAWA, K. and MATSUMURA, F. (1976) J. Agr. Food Chem., 24, 251.

FURUKAWA, K., TONOMURA, K. and KAMIBAYASHI, K. (1978) Appl. Environ. Microbiol., 35, 223.

FURUKAWA, K., TOMIZUKA, N. and KAMIBAYASHI, A. (1979) Appl. Environ. Microbiol., 38, 301-310.

FURUKAWA, K. (1982) "Biodegradation and detoxification of environmental pollutants" (Ed. A.M. CHAKRABARTY) CRC Press, BOCA RATON, Florida, 33.

FURUKAWA, K. and CHAKRABARTY, A.M. (1982) Appl. Environ. Microbiol., 44, 619.

FURUKAWA, K., TAMILUKA, N. and KAMIBAYASHI, A. (1983) Appl. Environ. Microbiol., 46, 140-145.

FURUKAWA, K. and MIYAZAKI, T. (1986) J. Bacteriol., 166, 392.



FURUKAWA, K., ARIMURA, N. and MIYAZAKI, T. (1987a) J. Bacteriol., 169, 427.

FURUKAWA, K. and ARIMURA, N. (1987b) J. Bacteriol., 169, 924.

FURUKAWA, K. and SUZUKI, H. (1988) Appl. Environ. Biotechnol., 29, 363-369.

GAFFNEY, T.D. and LESSIE, T.G. (1987) J. Bacteriol., 169, 224.

GALLI, R. and LEISINGER, T. (1985) Conserv. Recycl., 8, 91, 100.

GALLI, R. and LEISINGER, T. (1988) J. Gen. Microbiol., 134, 943-952.

GALLI, R. and MC CARTY, P.L. (1989) Appl. Environ. Microbiol., 55, 837-851.

GAMAR, Y. and GAUNT, J.K. (1971) Biochem. J., 122, 527.

GASSETT, J.M. (1985) "Anaerobic degradation of C1 and C2 chlorinated hydrocarbons" Final Report ESL-TR-85-88, Air Force Engineering and Services Center, Tyndall Air Force Base, Florida.

GHISALBA, O. and KÜENZI, M. (1983a and b) Experientia, 39, 1247 and 1273.

GHOSAL, D., YOU, I.S., CHATTERJEE, D.K. and CHAKRABARTY, A.M. (1985a) Science, 228, 135.

GHOSAL, D., YOU, I.S., CHATTERJEE, D.K., CHAKRABARTY, A.M. (1985b) Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 82, 1638.

GHOSAL, D., YOU, I.S., CHATTERJEE, D.K., CHAKRABARTY, A.M. (1985c) "Plasmids in bacteria" (Eds. D.R. HELINSKI, S.N. CO-



SEK, P.H. and SFERRA, P.R. (1987) "Land disposal, remedial action, incineration and treatment of hazardous waste" EPA/600/9-87-015, US Environmental Protection Agency, Washington D.C., 388.

HAYAISHI, O. (1974) in "Molecular mechanisms of oxygen activation" Academic Press, New-York.

HAYES, T.D. and THEIS, T.L. (1978) J. Water Pollut. Control Fed., 50, 1, 61-72.

HAYES, T.D., JEWELL, W.J. and KABRICK, R.M. (1980) Proc. 34th Ind. Waste Conf., Purdue Univ., West Lafayette, Indiana, 529-543.

HEITKAMP, M.A., FREEMAN, J.P., MILLER, D.W. and CERNIGLIA, C.E. (1988) Appl. Environ. Microbiol., 54, 10, 2556-2565.

HERITAGE, A.D. and MAC RAY, J.C. (1977) Appl. Environ. Microbiol., 34, 2, 222-224.

HILL, J.R. and WRIGHT, S.J.L. (1978) "Pesticide Microbiology", Academic Press, London.

HOROWITZ, A., SUFLITA, J.M. and TIEDJE, J.M. (1983) Appl. Environ. Microbiol., 45, 1459-1469.

HORVATH, R.S. (1971) J. Agr. Food Chem., 19, 291-293.

HORVATH, R.S. (1972) Bacteriological Reviews, 36, 146-155.

HSU, T.S. and BARTHA, R. (1979) Appl. Environ. Microbiol., 37, 36-41.

HUTZINGER, O., SAFE, S. and ZITKO, V. (1974) "The chemistry of PCB's", CRC Press, Cleveland, Ohio.

HUTZINGER and VEERKAMP, W. (1981) in "Microbial degradation of xenobiotics and recalcitrant compounds" (T. LEISINGER,



A.M. COOK, R. HÜTTER, J. NÜESCH Eds.) 3-45, Academic Press, London.

IWATA, Y., WESTLAKE, W.E. and GUNTHER, F.A. (1973) Bull. Environ. Contam. Toxicol., 9, 204-211.

JAGNOW, O., HAIDER, K. and ELLWARDT, P.C. (1977) Arch. Microbiol., 115, 285-292.

JANSSEN, D.B., SCHEPPER, A.D., KHUIZEN, L. and WITHOLT, B. (1985) Appl. Environ. Microbiol., 49,3, 673-677.

JEJUNA (1978) Pesticide, 12, 7, 34.

JENKINS, R.L., BENJAMIN, J.S., MARVIN, L.S., RODGER, B., LO, M.P. and HUANG, R.T. (1981) J. Water Pollut. Control Fed., 53, 1, 25-32.

JENSEN, H.L. (1957) Can. J. Microbiol., 3, 151-164.

JERINA, D.M., DALY, J.W., JEFFERY, A.M. and GIBSON, D.T. (1971) Arch. Biochem. Biophys., 142, 394-396.

JERNELOV, A. and MARTIN, A.L. (1975) Ann. Rev. Microbiol., 29, 61.

KABAYASHI, H. (1982) Environ. Sci. Technol., 16, 170-183.

KAISER, J.P. and HANSELMANN, K. (1982) Arch. Microbiol., 133, 185-194.

KARNS, J.S., KILBANE, J.J., DUTTAGUPTA, S. and CHAKRABARTY, A.M. (1983a) Appl. Environ. Microbiol., 46, 1176.

KARNS, J.S., DUTTAGUPTA, S. and CHAKRABARTY, A.M. (1983b) Appl. Environ. Microbiol., 46, 1182.

KARNS, J.S., KILBANE, J.J., CHATTERJEE, D.K. and CHAKRABARTY, A.M. (1984) "Genetic control of environmental pollu-



tants" (Ed. G.S. OMENN, A. HOLLAENDER) Plenum Press, New-York, 3.

KEARNEY, P.C. and KAUFMANN, D.D. (1976) "Herbicides : chemistry, degradation and mode of action" 2 vols., Marcel DEKKER, New-York.

KEITH, L.H. and TELLIARD, W.A. (1979) Environ. Sci. Technol., 13, 416-423.

KHAN, A., TEWARI, R., WALIA, S. (1988) Appl. Environ. Microbiol., 54, 11, 2664-2671.

KILBANE, J.J., CHATTERJEE, D.K., KARNS, J.S., KELLOGG, S.T. and CHAKRABARTY, A.M. (1982) Appl. Environ. Microbiol., 44, 72-78.

KILBANE, J.J., CHATTERJEE, D.K. and CHAKRABARTY, A.M. (1983) Environ. Microbiol., 45, 1697-1700.

KILBANE, J.J., CHAKRABARTY, A.M. (1984) in "Genetic control of environmental pollutants" (Eds. G.S. OMENN, A. HOLLAENDER), Plenum Press, New-York, 373.

KIRK, T.K., CONNORS, W.J. and ZEIKUS, J.G. (1987) Appl. Environ. Microbiol., 32, 192-194.

KLAGES, V. and LINGENS, F. (1979) FEMS Microbiol. Lett., 6, 201-203.

KLAGES, V. and LINGENS, F. (1980) Zentralbl. Bakteriologie. Parasitenkd. Infektionsk. Hyg. I. Abt. Orig. Reihe C1, 215-223.

KLECKA, G.M. and MAIER, W.J. (1985) Appl. Environ. Microbiol., 49, 46-53.

KLEOPFER, R.D., EASLEY, D.M., HAAS, B.B., DEIHL, T.G., JACKSON, D.E. and WURREY, C.J. (1985) Environ. Sci. Technol.,



19, 3, 277-280.

KNACKMUSS, H.J. (1981) "Microbial degradation of xenobiotics and recalcitrant compounds" (T. LEISINGER, A.M. COOK, R. HÜTTER and J. NÜESH, Eds) 189-212, Academic Press, London.

KNACKMUSS, H.J. (1983) *Biochem. Soc. Symp.*, 48, 173-190.

KOHLER-STAU, D. and LEISINGER, T. (1985) *J. Bacteriol.*, 162, 676-681.

KOHLER-STAU, D., HARTMANS, S., GÄLLI, R. and LEISINGER, T. (1986) *J. Gen. Microbiol.*, 132, 2837-2843.

KROCKEL, L. and FOCHT, D.D. (1987) *Appl. Environ. Microbiol.*, 53, 2470.

KUGELMAN, I.J. and CHIN, K.K. (1971) in "Anaerobic biological treatment processes" (Ed. POHLAND, F.F.) 50-90, *Am. Soc. Chem. Engrs., Adv. Chem.*, 105.

KWASNIEWSKA, K. (1981) in "Trace Substances in Environ. Health" XV, 392-398.

LACK, L. (1959) *Biochim. Biophys. Acta*, 34, 117-123.

LAL, R. and SAXENA, D.M. (1982) *Microbiol. Rev.*, 46, 95-127.

LAL, R. (1984) "Insecticide microbiology", Springer Verlag, Berlin.

LAPAT-POLASKO, L.T., MC CARTY, P.L. and ZEHNDER, A.J.B. (1984) *Appl. Environ. Microbiol.*, 47, 825-830.

LEEPER, G.W. (1972) Special report prepared for the US Army Corps of Engineers, Washington DC.

LEHRBACH, P.R., ZEYER, J., REINEKE, W., KNACKMUSS, H.J. and TIMMIS, K.N. (1984) *J. Bacteriol.*, 158, 1025.



- LEISINGER, T. (1983) *Experientia*, 39, 1183-1191.
- LEISINGER, T. and BRUNNER, W. (1986) "Poorly degradable substances" in "Biotechnology", Vol. 8, W. SCHONBORN, Ed., VCH Weinheim, FRG, 475-513.
- LEISINGER, T. (1988) *Biotech.*, Vol. 2, 125-133.
- LESSIE, T.G. and GAFFNEY, T. (1986) "The bacteria : the biology of Pseudomonas (Ed. J.R. SOKATCH), Vol. 10, Academic Press, New-York, 439.
- LESTER, J.N. (1983) *Sci. Total Envir.*, 30, 1-44.
- LESTER, J.N., STERRIT, R.M. and KIRK, P.W. (1983) *The Science of Total Environ.*, 30, 45-83.
- LEUENBERGER, C., GIGER, W., CONEY, R., GRAYDON, J.W. and MOLNAR-KUBICA, E. (1985) *Water Res.*, 19, 7, 885-894.
- LEWIS, D. and KIFF, R.J. (1988) *Environ. Technol. Lett.*, 9, 991-998.
- LI, W.H. (1984) *Mol. Biol. Evol.*, 1, 212.
- LIN YI XIONG and SUN BOZEN (1987) *Hydrobiologia*, 153, 249-252.
- LIU, T. and CHAPMAN, P.J. (1984) *FEBS Lett.*, 173, 314.
- LOGAN, T.J. and CHANEY, R.L. (1983) *Proc. Workshop on utilization of municipal wastewater and sludges on land*, Denver, CO, 235-326, 23-25 Feb.
- LOPER, J.C. (1988) *J. Hazard. Materials*, 19, 323-326.
- LURDES SIMOES GONCALVES, M., SIGG, L., and REUTLINGER, M. (1987) *Sci. Total Environ.*, 60, 105-119.



MADGWICK, J.C. and RALPH, B.J. (1977) Conf. Bact. Leaching 1977, Braunschweig-Stockheim (Ed. SCHWARTZ, W.), GBF Monograph Series n° 4.

MALTONI, C. and LEFEMINE, G. (1974) Environ. Res., 7, 387-396.

MARKS, T.S., SMITH, A.R.W. and QUIRK, A.V. (1984a) Appl. Environ. Microbiol., 48,5, 1020-1025.

MARKS, T.S., WAIT, R., SMITH, A.R.W. and QUIRK, A.V. (1984b) Biochem. Biophys. Res. Commun., 124, 669-674.

MARKUS, A., KLAGES, V., KRAUSS, S. and LINGENS, F. (1984) J. Bacteriol., 160, 618-621.

MASSE, R., MESSIER, F., PELOQUIN, L., AYOTTE, C. and SYLVESTRE, M. (1984) Appl. Environ. Microbiol., 47, 947.

MATSUMURA, F. and BENEZET, H.J. (1978) "Pesticide microbiology" (J.R. HILL and S.J.L. WRIGHT, Eds.), 623-660, Academic Press, London.

MATSUMURA, F. and KRISHNA MURTI, C.R. (1982) "Biodegradation of pesticides", Plenum Press, New-York.

MC NUTLY, K.J., MALARKEY, A.T., GOLDSMITH, R.L. and FREMONT, M.A. (1977) Development of a new process for sludge conditioning. Paper presented at the National Conference on Composting of Municipal Moser Residue and sludge, Rockville, MD, August, 23-25.

MELCER, H. and BEDFORD, W.K. (1988) J.W.P.C.F., 60, 5, 622-626.

MERIAN, E. and ZANDER, M. (1982) "The handbook of environmental chemistry" (O. HATZINGER, Ed.) Vol. 3, Part B, 117-160, Springer Verlag, Berlin.



MIKESELL, M.D. and BOYD, S.A. (1985) *J. Environ. Qual.*, 14, 3, 337-340.

MOORE, A.T., VIRA, A. and FOGEL, S. (1989) *Environ. Science Technol.*, 23, 4, 403-406.

MOOS, L.P., KIRSCH, E.J. and WUKASCH, R.F. (1983) *Water Res.*, 17, 11, 1575-1584.

MORTLOCK, R.P. (1982) *Ann. Rev. Microbiol.*, 36, 259-284.

MOTOSUGI, K. and SODA, K. (1983) *Experientia*, 39, 1214-1220.

MUELLER, R., THIELE, J., KLAYES, U. and ZINGENS, F. (1984) *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 124, 178-182.

MURTHY, N.B.K., KAUFMAN, D.D. and FRIES, G.F. (1979) *Environ. Sci. Health*, B14, 1.

MUTATKER, V.R. and PRITCHETT, W.L. (1967) *Soil Sci.*, 103, 39-46.

NADAMURA, K., SAKATA, T. and NAKAHARA, H. (1988) *Bull. Environ. Contam. Toxicology*, 41, 5, 651-656.

NEGORO, S., TANIGUCHI, T., KANAVKA, M., KIMURA, H. and OKADA, H. (1983) *J. Bacteriol.*, 155, 22.

NEGORO, S., NAKAMURA, S. and OKADA, H. (1984) *J. Bacteriol.*, 158, 419.

NELSON, M.J.K., MONTGOMERY, S.O., O'NEIL, E.J. and PRITCHARD, P.H. (1986) *Appl. Environ. Microbiol.*, 52, 2, 383-384.

NELSON, M.J.K., MONTGOMERY, S.O., MAHAFFEY, W.R. and PRITCHARD, P.H. (1987) *Appl. Environ. Microbiol.*, 53, 949-954.



- NELSON, M.J.K., MONTGOMERY, S.O. and PRITCHARD, P.H. (1988) *Appl. Environ. Microbiol.*, 54, 604-606.
- NEUDORF, S. and KHAN, M.A.Q. (1975) *Bull. Envir. Contam. Toxic.*, 13, 443-450.
- NEUFELD, R.D. and HERMANN, E.R. (1975) *J. Water Pollut. Control Fed.*, 47, 2, 310-329.
- NGAI, K.L., SCHLOMANN, M., KNACKMUSS, H.J., ORNSTON, L.N. (1987) *J. Bacteriol.*, 169, 699.
- NIELSEN, J.S. and HRUDEY, S.E. (1983) *Water Res.*, 17, 1041-1052.
- NORTEMANN, B., BAUMGARTEN, J., RAST, H.G. and KNACKMUSS, H.J. (1986) *Appl. Environ. Microbiol.*, 52, 1195-1202.
- OLDENHUIS, R., VINK, R.L.J.M., JANSSEN, D. and WITHOLT, B. (1989) *Appl. Environ. Microbiol.*, 55, 2819-2826.
- OLIVER, J.W. and COSGRAVE, G. (1974) *Water Res.*, 11, 74, 869-874.
- OLIVER, J.W., KREYE, W.C. and KING, P.H. (1975) "Heavy metal release by chlorine oxidation of sludge" *J. Water Pollut. Control Fed.*, 47, 2490.
- OMENN, G.S. and HOLLAENDER, A. (1984) "Genetic control of environmental pollutants", Plenum Press, New-York.
- ORNSTON, L.N. and YEH, W.K. (1979) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 76, 3996.
- PALMER, C.M. (1980) "Algae and water pollution", 69-71, 73-74, Castle House, London.
- PARIS, D.F., LEWIS, D.L. and WOLFE, N.L. (1975) *Environ. Science Technol.*, 9, 135-138.

PARSON, F., WOOD, P.R. and DE MARCO, J. (1984) J. Am. Water Works Assoc., 76,5, 56-59.

PARSON, F., BARRIO-LAGE, G. and RICE, R. (1985) Environ. Toxicol. Chem., 4, 739-742.

PATEL, R.N. (1982) Appl. Environ. Microbiol., 44, 1130-1137.

PATTERSON, J.W. and KODOKULA, P.S. (1984) JWPCF, 56, 5, 432-441.

PAWLOWSKY, U. and HOWELL, J.A. (1973) Biotechnol. Bioeng., 15, 897-903.

PEMBERTON, J.M. and FISHER, P.R. (1977) Nature, 268, 732.

PETRASEK, A.C. and KUGELMAN, I.J. (1983) J. Wat. Pollut. Control Fed., 55, 1183-1190.

PFENNIG, N., WIDDEL, F. and TRUEPER, H.G. (1981) in "The Prokaryotes" (M.P. STARR, H. STOLP, H.G. TRUEPPER, A. BALOWS and H.G. SCHLEGEL, Eds.), Vol. 1, 26-940, Springer-Verlag, Berlin.

PIEPER, D.M., REINEKE, W., ENGESSER, K.H. and KNACKMUSS, H.J. (1988) Arch. Microbiol., 150, 95.

PIGNATELLO, J.J., MARTINSON, M.M., STEIERT, J.G., CARLSON, R.E. and CRAWFORD, R.L. (1983) Appl. Environ. Microbiol., 46, 5, 1024-1031.

PIGNATELLO, J.J. (1986) Appl. Environ. Microbiol., 51, 588-592.

POLPRASERT, C. and CHARNPRATHEEP, K. (1989) Water Res., 23, 5, 625-631.

PREVOT, P. and SOYER, M.O. (1978) C.R. Hebd. Séanc. Acad.



Sci. Ser. D., 287, 833-836.

RAMAMOORTHY, S., CHENG, T.C. and KUSHNER, D.J. (1982) Bull. Environ. Contam., 29, 2, 167-173.

RAMOS, J.L., WASSERFALLEN, A., ROSE, K. and TIMMIS, K.N. (1987) Science, 235, 593.

RANGNEKAR, W. (1988) J. Bacteriol., 170, 1907.

RASKA, K., MATEJOVSKA, V., MATEJOVSKA, D., BERGDOLL, M.S. and PRETRAS (1981) Proc. 4th Int. Symp. Staphylococci and Staphylococcal Infection, 1, (Jeljaszewicz, J., Ed.) GUSTAV FISCHER, Stuttgart, 381, 198.

REHACLE, J. and HOUBA, C. (1983) Environ. Technol. Lett., 4, 2, 53-58.

REINEKE, W. and KNACKMUSS, H.J. (1979) Nature, 277, 385.

REINEKE, W. and KNACKMUSS, H.J. (1980) J. Bacteriol., 142, 467, 476.

REINEKE, W., WESSELS, S.W., RUBIO, M.A., LATORRE, J., SCHWIEN, J., SCHMIDT, E., SCHLOMANN, M. and KNACKMUSS, H.J. (1982) FEMS Microbiol. Lett., 14, 291-294.

REINEKE, W. and KNACKMUSS, H.J. (1984a) Appl. Environ. Microbiol., 47, 395-402.

REINEKE, W. (1984b) "Microbial degradation of organic compounds" (Ed., D.T. GIBSON), Marcel Dekker, New-York, 319-360.

REYNOLDS, L.M. (1969) Bull. Environ. Contam. Toxicol., 4, 128-143.

RITTMANN, B.E. and MC CARTY, P.L. (1980) Appl. Environ. Microbiol., 39, 1225-1226.

- RIVERA, A.L. (1983) J.W.P.C.F., 55, 12, 1450-1456.
- ROBERTS, A. HEGI, J.K. and WEBER, M. (1975) EAWAG News, 9, 75, 1-4.
- ROJO, F., PIEPER, D.H., ENGESSER, K.H., KNACKMUSS, H.J. and TIMMIS, K.N. (1987) Science, 238, 1395.
- ROSENBERG, A. and ALEXANDER, M. (1980) J. Agric. Food. Chem., 28, 705.
- ROUSTAN, M., GANNE, N., FAUCHER, G. and BRODARD, E. (1986) Environ. Technol. Lett., Vol. 7, 273-282.
- RUBIO, M.A., ENGESSER, K.H. and KNACKMUSS, H.J. (1986) Arch. Microbiol., 116.
- RUDEL, T., STERRIT, R.M. and LESTER, J.N. (1984) Water Res., 18, 3, 379-384.
- RUGGIERO, D.D. and FEIGE, W.A. (1984) EPA - 600/S2-84-029, 1-5.
- SANGODKAR, U.M.X., CHAPMAN, P.J., HAUGLAND, R.A. and CHAKRABARTY, A.M. (1987) "Environmental biotechnology : reducing risks from environmental chemicals through biotechnology" (Ed., G.S. OMENN), Vol. 45, Plenum Press, New-York, 461.
- SANGODKAR, U.M.X. and CHAKRABARTY, A.M. (1988a) Abstr. Ann. Mtg. Amer. Soc. Microbiol., Miami, 207.
- SANGODKAR, U.M.X., CHAPMAN, P.J. and CHAKRABARTY, A.M. (1988b) Gene, 71, 267.
- SAWHNEY, B.L., FRINK, C.R. and GLOWA, W. (1981) J. Environ. Qual., 10, 444-448.
- SAY, P.J. (1977) Freshwat. Biol., 7, 357-376.



SCHINK, B. and PFENNIG, N. (1982) Arch. Microbiol., 133, 195-201.

SCHLEGEL, H.G. (1965) "Anreicherungskultur and mutantenauslese", G. FISCHER VERLAG, STUTTGART.

SCHMIDT, E. and KNACKMUSS, H.J. (1980) Biochem. J., 192, 339.

SCHNEIDER, M.J. (1979) "Persistent poisons : chemical pollutants in the environment" (New-York Academy of Sciences, New-York, 1979) ; Firestone, Ecol. Bull., 22, 39.

SCHOETTLER, U. (1976) Z. Wass. Abwasser., 9, 88-93.

SCHOETTLER, U. (1977) Von Wasser, 49, 295-313.

SCHOLTZ, R., SCHMUCKLE, A., COOK, A.M. and LEISINGER, T. (1987a) J. Gen. Microbiol., 133, 207-274.

SCHOLTZ, R., LEISINGER, T., SUTER, F. and COOK, A.M. (1987b) J. Bacteriol., 169, 5016-5021.

SCHOLTZ, R., WACKETT, L.P., EGLI, C., COOK, A.M. and LEISINGER, T. (1988) J. Bacteriol., 170, 12, 5698-5704.

SCHRAA, G., BOONE, M.L., JETTERN, M.S.N., VAN NEERVEN, A.R.W., COLBERG, P.J. and ZEHNDER, A.J.B. (1986) Appl. Environ. Microbiol., 52, 1374-1381.

SCHULZE, G. and GUNKEL, G. (1988) Von Wasser, 70, 209-220.

SCHWIEN, U., SCHMIDT, E., KNACKMUSS, H.J. and REINEKE, W. (1982) Appl. Environ. Microbiol., 44, 33.

SCHWIEN, U., SCHMIDT, E., KNACKMUSS, H.J. and REINEKE, W. (1988) Arch. Microbiol., 150, 78.





germe

- SCORDILIS, G.E., REE, H. and LESSIE, T.G. (1987) *J. Bacteriol.*, 169, 8.
- SCOTT, D.S. and HORLINGS, H. (1979) *Environmental Sci. Technol.*, 9, 9, 849-855.
- SENIOR, E., BULL, A.T. and SLATER, H.J. (1976) *Nature*, 263, 476-479.
- SERDAR, C.M. and GIBSON, D.T. (1985) *Biotechnol.*, 3, 567.
- SHAILUBHAI, K., SAHASRABUDHE, S.R., VORA, K.A. and MODI, V.V. (1983) *FEMS Microbiol. Lett.*, 18, 279.
- SHARMA, S.K., SADASIVAM, K.W. and DAVE, J.M. (1987) *Environ. Int.*, 13, 183-190.
- SHARPEE, K.W., DUXBURY, J.M. and ALEXANDER, M. (1973) *Appl. Microbiol.*, 26, 445.
- SHELTON, D.R. and TIEDJE, J.M. (1984) *Appl. Environ. Microbiol.*, 47, 850-857 and 48,4, 840-848.
- SHINK, B. and PFENNIG, N. (1982) *Arch. Microbiol.*, 133, 195-201.
- SHUTTLEWORTH, K.L. and BOLLAG, J.M. (1986) *Enzyme Microbial. Technol.*, 8, 3, 171-177.
- SINGH, S., HIGSON, F.K., NADIM, L.M. and GIBSON, D.T. (1988) *Proc. Ann. Res. Symp. Treatment of hazardous waste, U.S. EPA, Cincinnati.*
- SLATER, J.H., LOVATT, D., WEIGHTMAN, A.J., SENIOR, E. and BULL, A.T. (1979) *J. Gen. Microbiol.*, 114, 125-136.
- SLATER, H.S. and SOMERVILLE, H.J. (1979) *Symp. Soc. Gen. Microbiol.*, 29, 221-261.

SLATER, J.H. and BULL, A.T. (1982) *Phil. Trans. Royal Soc., London, Ser. B* 297, 575-597.

SOEDERGRENN, A. (1968) *Oikos*, 19, 10, 126-138.

SOLDANO, B.A., BIEN, P. and KWAN, P. (1973) *Atmos. Environ.*, 9, 941-1975.

SPAIN, J.C. and NISHINO, S.F. (1987) *Appl. Environ. Microbiol.*, 53, 1010.

SPEECE, R.E. (1983) *Environ. Sci. Technol.*, 17, 416-426.

SPEITEL, G.E., CHIH-JEN, L. and XIAN, J.Z. (1989) *J.W.P.C.F.*, 61, 2, 221-229.

STANIER, R.Y. and ORNSTON, L.N. (1973) *Adv. Microbiol. Physiol.*, 9, 89-151.

STANLAKE, G.J. and FINN, R.K. (1982) *Appl. Environ. Microbiol.*, 44, 1421.

STEIERT, J.G. and CRAWFORD, R.L. (1986) *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 141, 825.

STEIERT, J.G., PIGNATELLO, J.J. and CRAWFORD, R.L. (1987) *Appl. Environ. Microbiol.*, 53, 907.

STIRLING, D.I. and DALTON, H. (1979) *FEMS Microbiol. Lett.*, 5, 315-318.

STIRLING, L.A., WATKINSON, R.J. and HIGGINS, I.J. (1976) *Proc. Soc. Gen. Microbiol.*, 4, 28.

STRAND, S.E. and SHIPPERT, L. (1986) *Appl. Environ. Microbiol.*, 52, 203-205.

STREBER, W.R., TIMMIS, K.N. and ZENK, M.H. (1987) *J. Bacteriol.*, 169, 2950.

- STRONG, J.R.P. (1982) *Biotechnol. Lett.*, 4, 239-242.
- STUCKI, G., GALLI, R., EBERSOLD, H.R. and LEISINGER, T. (1981) *Arch. Microbiol.*, 130, 366-371.
- STUCKI, G., KREBSER, U. and LEISINGER, T. (1983) *Experientia*, 39, 1271-1273.
- SUFLITA, J.M., HOROWITZ, A., SHELTON, D.R. and TIEDJE, J.M. (1982) *Science*, 218, 1115-1117.
- SUMMERS, A.O. and SILVER, S. (1978) *Ann. Rev. Microbiol.*, 32, 637, 1978.
- SUZUKI, T. (1977) *J. Environ. Sci. Health*, B12, 113.
- SYLVESTRE, M., MASSE, R., MESSIER, F., FAUTEUX, J., BISAILLON, J.G. and BEAUDET, R. (1982) *Appl. Environ. Microbiol.*, 44, 871-877.
- TEZUKA, T. and TONOMURA, K. (1978) *J. Bacteriol.*, 135, 138.
- THEIS, T.L. and HAYES, T.D. (1978) "Chem. of Wastewater Technol." (RUBIN, A.J., Ed.) Arbor Science Publishers, Ann Arbor, MI, 403-419.
- THOM, N.S. and AGG, A.R. (1975) *Proc. Royal Soc. London, Ser. B* 189, 347-357.
- TIEDJE, J.M., DUXBURY, J.M., ALEXANDER, M. and DAWSON, E. (1969) *J. Agr. Food Chem.*, 17, 1021.
- TIEDJE, J.M. and ALEXANDER, M. (1969) *J. Agr. Food Chem.*, 17, 1080.
- TOMASEK, P., FRANTZ, B., CHATTERJEE, D.K. and CHAKRABARTY, A.M. (1986) "Biotechnology for solving agricultural problems" (Eds. P.C. AUGUSTINE, H.D. DANFORTH, M.R. BAKST),



Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, Netherlands, 355.

TOMASEK, P.H., FRANTZ, B., SANGODKAR, U.M.X., HAUGLAND, R.A. and CHAKRABARTY, A.M. (1989) *Gene*, 76, 227.

TOPPING, B. (1987) *Water Res.*, 21, 3, 295-300.

TREVORS, J.T. (1982) *Chemosphere*, II, 4, 471-475.

TUCKER, E.S., SAEGER, V.W. and HICKS, O. (1975) *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 14, 705.

VALLEE, B.L. and ULMER, D.D. (1972) *Ann. Rev. Biochem.*, 41, 91-128.

VEBER, K. (1980) *Bull. Envir. Contam. Toxic.*, 25, 841-845.

VELDKAMP, H. (1970) in "Methods in microbiology" (J.R. NORRIS, D.W. RIBBONS, Eds.), Vol. 3A, 305-361, Academic Press, London.

VOGEL, T.M. and MC CARTY, P. (1985) *Appl. Environ. Microbiol.*, 49, 1080-1083.

VOGEL, T.M. and MC CARTY, P.L. (1987) *Environ. Sci. Technol.*, 21, 12, 1208-1213.

WACKETT, L.P., KWART, L.D. and GIBSON, D.T. (1988) *Biochemistry*, 27, 1360-1367.

WATANABE, I. (1973) *Soil Sci. Plant Nutr.*, 19, 109.

WATANABE, I. (1977) *Soil Sci. Biochem.*, 9, 99.

WEDEMEYER, G. (1967) *Appl. Microbiol.*, 15, 569-574.

WEIGHTMAN, A.J., DON, R.H. and LEHRBACH, P.R. (1984) "Genetic control of environmental pollutants" (Eds. G.S. OMENN et A. HOLLAENDER), Plenum Press, New-York, 47-80.



WEISSHAAR, M.P., FRANKLIN, F.C.H. and REINEKE, W. (1987) J. Bacteriol., 169,1, 394-402.

WERNER, D. and MOERSCHEL, E. (1978) Bull. Envir. Contam. Toxic., 20, 313-319.

WILLIAMS, P.P. (1977) Residual Rev., 66, 63- 136

WILSON, J.T. and WILSON, B.H. (1985a) Appl. Environ. Microbiol., 49, 242-243.

WILSON, J.T. and WILSON, B.H. (1985b) Appl. Environ. Microbiol., 49, 1080-1083.

WIJBENGA, A. (1984) wissenschaften Natur, 71, 239-246.

WONG, L. and HENRY, J.G. (1984) Proc. 39th Ind. Waste Conf. Purdue Univ., West Lafayette, Indiana, 515-520.

WOOD, J.M. (1982) Environ. Sci. Technol., 16, 291A-297A.

WOZNIAK, D.J. and HUANG, J.Y.C. (1982) J. Water Poll. Control Fed., 54, 1574-1580.

YEH, W.K., GIBSON, D.T. and LIV, T.N. (1977) Biochem. Biophys. Res. Commun., 78, 401-410.

YEN, K.M. and GUNSALUS, I.C. (1982) Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 79, 874.

YOUNG, L.Y. (1984) in "Microbial degradation of aromatic compounds" (D.T. GIBSON, Ed.) 87-528, Marcel DEKKER, New-York.

ZULLEI, N. (1976) Von Wasser, 47, 331-345.

**CONTRAT N° 91-401/EUR**  
**ASSOCIATION RE.C.O.R.D./ANRED**

**Les biotechnologies appliquées au traitement des déchets :  
Etat de l'art  
Etat des connaissances**

**Compléments au rapport final**

Université de Technologie de Compiègne  
Département de Génie Chimique  
Division Procédés Biotechnologiques  
BP 649 - 60206 COMPIEGNE Cédex  
Tél : (33) 44 23 44 56 Fax : (33) 44 20 48 13

Institut de Recherches Hydrologiques  
11bis rue Gabriel Péri  
54500 VANDOEUVRE LES NANCY  
Tél : (33) 83 50 36 00 Fax : (33) 83 50 36 99

Quelle que soit l'option de traitement choisie en fonction de la faisabilité des transformations biologiques et des caractéristiques propres à chaque cas (type de déchet, état physique et chimique du déchet, contraintes techniques et économiques liés à la quantité de déchet ou à l'étendue de la zone contaminée), les données physiologiques et écologiques sont à la base de l'étude de faisabilité et d'optimisation des procédés. Ensuite, la connaissance des facteurs limitant la biodisponibilité des polluants vis à vis des mécanismes de transformation et la biocolonisation par les organismes est fondamentale pour une amélioration de l'efficacité des traitements. Enfin, les configurations technologiques de traitement peuvent varier fortement en fonction de chaque cas réel rencontré. Ainsi, l'étude de cas concrets et la validation en vraie grandeur de nouvelles configurations parfois couplées à des traitements non biologique (physico-chimique, thermique...) est indispensable à la bonne maîtrise de ces techniques en plein essor.

#### Inventaire des compétences d'organismes en tant qu'outils biotechnologiques

Les possibilités du génie génétique, si elles sont théoriquement intéressantes, nécessitent une meilleure maîtrise pour être appliquées sans incertitudes de risques vis à vis de l'homme et de son environnement. Parallèlement aux études de génie génétique, de nombreuses compétences ont pu être mises en évidence ces dernières années au sein de communautés naturelles (biodégradation des produits xénobiotiques tels que des organochlores, des hydrocarbures polycycliques aromatiques, des polychlorobiphényles, des pesticides, ... biolixiviation de métaux précieux, bioaccumulation de métaux lourds et de radionucléides ...). L'information sur ces compétences reste encore très disséminée et nécessite d'être regroupée et complétée. Pour ce faire, la découverte de nouvelles compétences au sein des communautés d'organismes naturellement présents dans les écosystèmes doit être une source privilégiée d'outils biotechnologiques.

#### Etudes des niches écologiques et du fonctionnement des écosystèmes microbiens dans les déchets

La première limite rencontrée dans les procédés biotechnologiques est le maintien en continu de la culture compétente surtout dans des conditions relativement variables en raison de l'hétérogénéité des déchets traités. Seule une bonne connaissance des contraintes écologiques liées à chaque culture permettra un suivi et un contrôle effectif du fonctionnement optimal des procédés biotechnologiques. En particulier, si l'acidité, les conditions d'oxydo-réduction, la salinité et les nutriments majeurs sont étudiés précisément, les interactions entre les divers organismes vivants d'une communauté sont peu étudiées et devraient aider à l'optimisation des conditions d'application des biotechnologies, et ce dans un domaine plus large que le traitement des déchets.

#### Etude, modélisation et contrôle de la biodisponibilité des polluants et de la biocolonisation dans les déchets

La deuxième contrainte importante du traitement des déchets solides est l'ensemble des limitations aux transferts des polluants vers les zones où les transformations nécessaires à la dépollution s'opèrent. Ces limitations dont les origines sont les interactions physico-

chimiques entre le polluant et les substances présentes dans le milieu, ainsi que les étapes de transferts par diffusion, convection et dispersion dans le milieu, déterminent la biodisponibilité des polluants. Cette notion intégrant à la fois la mobilité du polluant vers les organismes actifs et celle des organismes ou des substances qu'ils génèrent vers le polluant, semble être une source potentielle d'amélioration des techniques actuelles de première importance. Ces améliorations passent par la mise en évidence, la compréhension, la modélisation, la validation puis le contrôle des mécanismes prépondérants de limitation.

#### Validation et optimisation de procédés biologiques existants pour le traitement des déchets

Si dans les domaines pharmaceutiques et agro-alimentaires, les biotechnologies n'ont plus à faire leurs preuves, dans le cadre du traitement des déchets, la situation est différente face au traitement thermique par exemple. Certaines technologies biologiques sont encore appliquées de manière empirique et donc dans des conditions qui ne sont pas optimales. Il est sûr que l'amélioration constante des connaissances sur les mécanismes des transformations mises en oeuvre permettront d'améliorer des procédés déjà utilisés. De plus, beaucoup de techniques sont encore au stade de l'étude de faisabilité ou de l'optimisation sur installation pilote. En conséquence, un gros effort de validation des techniques proposées est nécessaire pour un développement industriel moins réticent.

#### Méthodologie de prévision de l'efficacité des méthodes de réhabilitation biologique "agricole" ou in situ des zones naturelles contaminées

Les techniques biologiques de réhabilitation des sols contaminés sont proposées par des industriels et sont appliquées de manière plus ou moins empirique. Le principal problème, dans cette situation est d'afficher un résultat en terme d'efficacité et de durée du traitement. En conséquence, la mise en place de méthodologies de prévision de ces résultats et des études de démonstration sur sites réels sont aujourd'hui nécessaires pour une meilleure argumentation des choix technico-économiques de traitement des contaminations.



## PROPOSITIONS D'ETUDES

### Fiche n° 1

#### Aspect génétique et construction de phénotypes hybrides

La démarche classique est de construire des hybrides en introduisant un certain nombre d'activités enzymatiques provenant de différentes souches qui dans des circonstances naturelles, auraient eu peu de change d'échanger du matériel génétique.

Il existe deux groupes de techniques pour étendre le potentiel génétique des souches : L'approche du génétique liée à une construction "in vitro". L'approche physiologique liée à une construction "in vivo".

Sans vouloir entrer dans le détail de la méthode "in vitro", disons que cette méthode permet d'augmenter le taux d'une enzyme dont l'activité catabolique spécifique est d'un grand intérêt. Le clonage du gène correspondant dans un vecteur d'expression amplifiera son nombre de copies par cellules ainsi que son expression. L'intérêt d'une telle manipulation est évidente lorsqu'il s'agit d'une enzyme limitante car on pourra alors obtenir une amélioration globale de la biodégradation.

Cependant, et sans parler des problèmes législatifs, l'exploitation des microorganismes manipulés s'avère plus délicate que l'exploitation de souches sauvages réputées plus résistantes et plus compétitives. De plus :

- la minéralisation totale des molécules récalcitrantes est réalisée par de complexes imbrications d'étapes métaboliques, ce qui limite le clonage de leurs gènes "en bloc" ;

- les gènes ne sont pas regroupés en "cluster" ce qui rend encore plus difficile le clonage ;

- ces techniques ne permettent pas de mettre en évidence les caractéristiques physiologiques telles : l'incompatibilité plasmidique, l'étendue du spectre d'hôte, les problèmes biochimiques des métabolites "suicides".

#### L'approche physiologique "in vivo"

Au sein d'une culture mixte, les échanges génétiques entre les différentes souches sont fondamentaux dans le processus d'évolution et de consolidation de l'information génétique.

Quelques études commencent à apparaître sur le transfert de plasmides au sein d'une culture mixte en batch ou en continu (Yao et al., 1990 ; Toda et al., 1990 ; Simonsen et al., 1990).

La construction "in vivo" présente des avantages importants. En effet, les plasmides dégradatifs sont généralement conjugatifs et par là même grands ; ceci rend leur extraction difficile, voire impossible par les techniques classiques.

L'approche physiologique de construction "in vivo" s'impose donc. De plus, les plasmides portent souvent des voies cataboliques intégrées et déjà régulées sous forme transmissible, soit par conjugaison, soit par mobilisation s'il s'agit de plasmides non conjugatifs.

Généralement, les plasmides de biodégradation montrent une forte homologie entre eux ainsi qu'avec certains plasmides de résistance aux antibiotiques. Ils évolueraient donc en "intégrants" des gènes d'autres plasmides pour étendre leurs capacités cataboliques vis-à-vis de nouveaux xénobiotiques. Ainsi, il devient possible "d'aider" l'évolution en favorisant au laboratoire, l'établissement de nouveaux plasmides grâce à une forte pression de sélection imposée par l'introduction du xénobiotique comme unique source de carbone. Ces constructions "in vivo" sont d'un grand intérêt par rapport aux constructions du génie génétique : elles sont plus stables, moins problématiques quant à la régulation des gènes et demandent moins de travail.

Il existe plusieurs techniques pour réaliser ces constructions :

- l'enrichissement à long terme par culture continue employée par l'équipe de Knackmuss (Hartman et al., 1979) ;

- la technique du "molecular breeding" qui est une adaptation de la précédente avec un but légèrement différent (Kellog et al., 1982) ;

- la méthode de conjugaison sur filtre (Knackmuss, 1979) ;

- la technique C.A.C pour "Continuous Amalgamated Culture" (Kröckel et Focht, 1987) ;

- la technique en milieu biphasique développée par l'UTC qui consiste, à partir d'une culture mixte initiale de lever les inhibitions des xénobiotiques et des produits dérivés, et de favoriser la conjugaison en concentrant les cellules dans un microenvironnement. Une thèse, dirigée par le Professeur J.M. LEBEAULT, est en préparation (Melle Nathalie FORTIN) en collaboration avec le Professeur N. TRUFFAUT.

La conjugaison en fermenteur avec pression de sélection, requiert 6 mois minimum de culture. La technique d'échange génétique naturel entre souches plutiples et en fermenteur, nécessite 8 à 10 mois de travail.

La conjugaison sur filtre n'est applicable qu'à des souches pures.

La technique en fermenteurs étagers est performante mais très lourde d'exécution.

La technique en milieu biphasique devrait être très rapide et applicable directement sur des mélanges de cultures mixtes.

### **En conclusion**

L'obtention des transconjugants "in vivo" représente à notre avis un sujet fondamental pour améliorer la potentialité des souches. Comme nous l'avons signalé dans notre rapport, tout se passe aujourd'hui comme si l'on se contentait des performances biologiques observées, performances que l'on essaie d'améliorer par les techniques classiques du génie chimique., d'où la prolifération d'études ou plus exactement, d'essais de biodégradation sur des réacteurs différents avec des cellules immobilisées ou non. Ces études ne sont pas satisfaisantes intellectuellement car trop particulières et surtout elles ne peuvent donner de réponses quant aux performances potentielles.

## REFERENCES

- HARTMAN, J., W. REINEKE and H.J. KNACKMUSS (1979)  
Metabolism of Chloro, 4-Chloro and 3,5-Dichlorobenzoate by *Pseudomonads*.  
*Appl. Environ. Microbiol.*, **37** : 421-428
- KELLOGG, S.T., D.K. CHATTERJEE and A.M. CHAKRABARTY (1982)  
Plasmid-Assisted Molecular Breeding : New Technique for Enhanced Biodegradation  
of Persistent Toxic Chemicals.  
*Science*, **214** : 1133-1135
- KRÖCKEL L. and D.D. FOCHT (1987)  
Construction of Chlorobenzene-Utilising Recombinants by Progenitive Manifestation  
of a rare Event.  
*Appl. Environ. Microbiol.*, **53** : 2470-2475
- SIMONSEN, L. (1990)  
Dynamics of Plasmid Transfert on Surfaces.  
*J. Gen. Microbiol.*, **136** : 1001-1007
- TODA, K., P. X. YAO and H. OHTKE (1990)  
Application of a Multi Stage Continuous Culture for Estimating net Rate Plasmid  
Transfert. *J. Gen. Microbiol.*, **36** : 279-282
- YAO , P.X., H. OHTAK and K. TODA (1990)  
Factor Effecting Conjugal Transfert Rates of Plasmids in Batch and Continuous  
Culture. *J. Ferm. Bioeng.*, **69** : 215-219

## Fiche n° 2

### Evaluation rapide des performances biodégradatives des populations mixtes

Pour des raisons pratiques "le criblage" des populations mixtes capables de se développer sur des xénobiotiques donnés est souvent très limité, or très souvent, "des performances" des cultures mixtes initiales dépendent les performances de la culture mixte finale. Comment évaluer les performances de ces cultures mixtes prélevées à partir d'une centaine ou plus, de sites différents ?

La question d'évaluation de ces cultures comme matériel de départ se pose donc rapidement. D'où l'approche suivante. L'activité métabolique globale peut être mesurée de différentes façons : le schéma suivant permet de visualiser les échanges qui existent entre une culture et l'environnement. D'où les techniques nouvelles de détection microbiennepar calorimétrie, microrespirométrie, impédancemétrie, head-space. Le principe de ces techniques est donné en annexe.

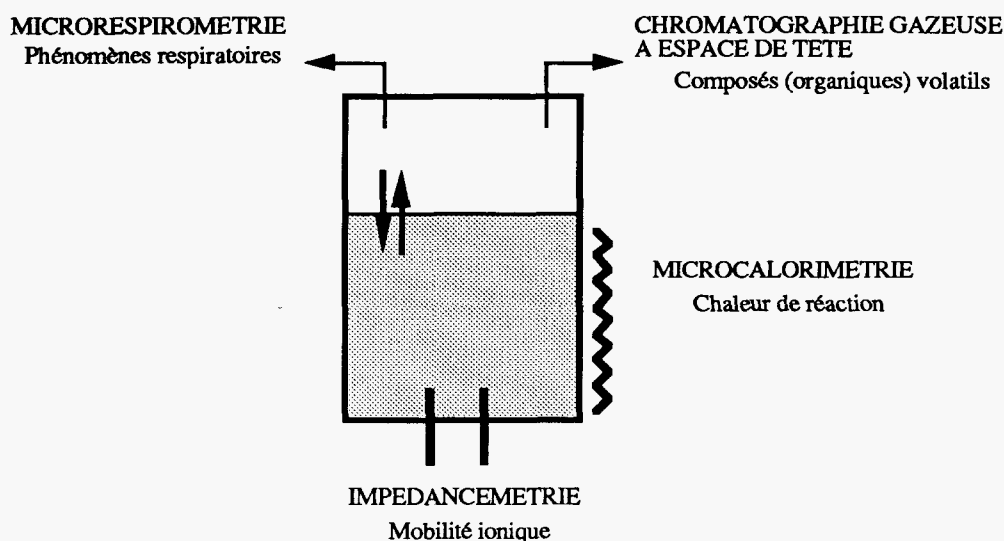
En chimie, des bancs d'essais pour des catalyseurs existent ; il s'agit souvent d'en déterminer la spécificité, la sensibilité aux poisons, les performances cinétiques.

En microbiologie et en particulier en amélioration des souches "in vivo" ou "in vitro", le choix des souches initiales est fondamental. Et s'il est compréhensible que pour développer les techniques du génie génétique, des souches modèles aient été choisies, que pour la production de métabolites, des vecteurs aient été développés spécifiquement pour telle ou telle souche d'intérêt industriel, il en va autrement des sélections et des améliorations des souches destinées aux traitements des déchets. La diversité des problèmes à traiter dans l'environnement implique des méthodes de construction "in vivo" à partir des populations mixtes isolées d'un criblage systématique et important et dont les activités biodégradatives auront été testées systématiquement.

Pour évaluer ces souches, des bancs d'essais sont nécessaires pour que d'autres laboratoires puissent, à partir de ce criblage, construire d'autres souches.

Convaincue de cette approche, la Division Procédés Biotechnologiques a regroupé ces deux approches (construction de souches "in vivo" et mesures d'activité) afin de mieux comprendre ces problèmes de biodégradation sous-jacents dans les axes de recherches prioritaires proposés.

## TECHNIQUES DE MESURE



Techniques utilisées pour l'étude du développement des microorganismes

### Microrespirométrie

L'activité des microorganismes aérobies peut être quantifiée par leur consommation d'oxygène et leur production de dioxyde de carbone. L'appareil le plus performant, à l'heure actuelle, est produit par la compagnie Columbus Inst. (Ohio, USA). Il s'agit d'un microrespiromètre. Dans ce système, l'air de la chambre de mesure est périodiquement circulé au travers d'analyseurs d'oxygène et de dioxyde de carbone extrêmement sensibles, et réintroduit dans la chambre de mesure. Connaissant en outre l'intervalle de temps entre deux mesures ainsi que la pression gazeuse régnant dans le circuit gazeux, on peut en déduire les vitesses de consommation d'oxygène et de production de dioxyde de carbone. L'analyseur d'oxygène est une pile électrochimique, l'analyseur de dioxyde de carbone est de type infrarouge. Par une combinaison de vannes, ce microrespiromètre permet de quantifier séquentiellement la respiration occurring dans un maximum de 20 chambres de mesure. Périodiquement, le volume gazeux d'une chambre de mesure peut être renouvelé par de l'air extérieur, avant que la respiration des microorganismes ne devienne affectée par la diminution d'oxygène dans la phase gazeuse.

La sensibilité de l'appareil est fonction de la période d'échantillonnage et du volume de la chambre de mesure, jusque 0,01 microlitres d'oxygène consommés par minute peuvent être détectés.

Finalement, dans la mesure où seule la phase gazeuse est échantillonnée, tout système fermentaire liquide, solide ou semi-solide peut être analysé, quelque soit son volume ou sa forme (carotte de terre contaminée, erlenmeyer de laboratoire, boîte de conserve, brique de lait ou de potage, etc.)

### Chromatographie gazeuse à espace de tête

La chromatographie gazeuse à espace de tête permet d'analyser la composition de la phase gazeuse (gaz de fermentation et produits volatils) d'un milieu clos, et donc suivre facilement une cinétique microbienne. L'analyse des chromatogrammes permet de suivre l'évolution d'un ou de plusieurs pics caractéristiques de la croissance.

La haute sensibilité de cette technique permet de quantifier très finement les cinétiques de substances volatiles

produites pendant les fermentations. Ces substances (acétaldéhyde, acétoïne, etc.) sont difficilement dosables dans la phase liquide, à cause de leur volatilité et de leur faible concentration (jusque 1 ppm). De plus les cinétiques et leur proportions relatives de ces métabolites volatiles sont indicatives du (des) microorganisme(s) fermentaire(s).

### **Impédancemétrie**

L'évolution de la phase liquide en fonction de l'activité des microorganismes peut être appréhendée par la mesure de l'impédance du milieu. On sait depuis de nombreuses années que l'impédance d'un milieu varie lors de la croissance ou de l'activité de microorganismes. Si la mesure est effectuée à fréquence élevée afin de minimiser les effets de polarisation et de capacité des cellules de mesure, d'excellents résultats peuvent être obtenus. Les appareils permettant de quantifier ces variations d'impédance, conductance et capacitance, (Malthus, Bactomatic, Rabbit) sont essentiellement utilisés pour le contrôle bactériologique, après établissement d'une relation linéaire entre le logarithme du nombre de microorganismes initiaux et viables formant des unités (CFU par ml) et le temps de détection d'une variation de la conductance et/ou de la capacitance. Ce temps étant défini suivant les constructeurs à partir d'une variation minimale du signal électrique qui, lui, mesure en fait les modifications du milieu. Dans de nombreux tests de routine, de contrôle de qualité ayant pour but de dénombrer la flore totale en microorganismes, connaître le temps de détection est suffisant.

Ce dernier dépend de facteurs tels que :

1. l'espèce des microorganismes présents
2. leur nombre et leur activité
3. l'absence ou la présence d'inhibiteurs (ou de conservateurs)
4. le milieu
5. la température du milieu.

L'appareil utilisé au laboratoire est le Rabbit, développé par Don Whitleys Sc. (UK). Il permet d'étudier simultanément la variation de conductance de 32 échantillons par bloc d'analyses, 16 blocs d'analyse étant connectables à l'unité centrale de contrôle. Chaque bloc peut être régulé thermiquement de 25 à 55 °C à 0,002°C près. Cet appareil équipe d'ores et déjà quelques industries agro-alimentaires en France. Dans le cas d'échantillons solides, une méthode spécifique a été développée (impédancemétrie indirecte).

### **Microcalorimétrie**

Toute fermentation microbienne s'accompagne d'un dégagement d'énergie calorifique. Il est donc loisible de suivre ou de détecter une fermentation par une analyse des échanges thermiques entre le milieu de fermentation et le milieu extérieur. Les microcalorimètres permettent aujourd'hui de mesurer de tels échanges; la sensibilité de ces appareils les rend susceptibles de détecter de 1 à 10  $\mu$ W.

Si cette technique a été intensivement utilisée à des fins de recherches fondamentales depuis quelques décennies, le contrôle des réacteurs, la compréhension des phénomènes de transfert de masse, mais aussi la détection rapide de la croissance de microorganismes peuvent être appréhendés par cette technique.

Colonisation des milieux hétérogènes

La réhabilitation des sols contaminés, la colonisation du garnissage des réacteurs pour le traitement des effluents gazeux, doit prendre en considération la capacité de biodégradation des microorganismes présents, la structure de la matrice sol ou celle du garnissage.

L'analyse des capacités biodégradatives implique trop souvent la destruction et la dispersion des structures organisées et des communautés microbiennes. Il est donc important de pouvoir disposer de techniques permettant de mesurer des activités microbiennes d'un milieu colonisé sans pour autant modifier la structure de ce dernier.

A l'aide des techniques de chromatographie à espace de tête, de microcalorimétrie, de microrespirométrie, on peut étudier la colonisation de garnissage par des populations mixtes en fonction :

- de l'hétérogénéité de la matrice,
- de la texture de la matrice,
- de la composition chimique de la matrice (support et molécules organiques),
- de la teneur en gaz de la matrice,
- de l'humidité et de la température.

Une meilleure compréhension de la colonisation d'un milieu par une population mixte permettrait de mieux comprendre et d'optimiser le traitement des sols et des gaz pollués.

Ce type d'étude nous paraît être un préalable à toute étude sur les bioréacteurs à garnissage.



## Fiche n° 4

Effet des accepteurs d'électrons sur la colonisation d'un milieu
---

Un sol, ou un réacteur à garnissage étant colonisé par une population aérobie sur un substrat donné, il serait intéressant d'étudier les effets de nouveaux accepteurs d'électrons sur :

- l'évolution de la population,
- les performances cinétiques du réacteur.

Une telle étude permettrait de mieux comprendre et contrôler la biodégradation de xénobiotiques dans les techniques de réhabilitation des sols ou de compostage.

## En conclusion

Les axes de recherche proposés peuvent sembler trop liés à la physiologie microbienne et à l'amélioration des souches.

Pourtant, cette approche devrait permettre :

- de mieux comprendre le développement des cultures mixtes en réacteur,
- d'évaluer le potentiel biodégradatif des souches afin de mieux optimiser le couple souches/réacteur.

La démarche suivie aujourd'hui semble souvent aller en sens contraire car elle consiste à choisir un réacteur, à étudier sa colonisation à partir d'une boue activée et à évaluer les performances du système.

La démarche proposée consiste à évaluer le potentiel des souches, à choisir les réacteurs en fonction de la demande des microorganismes pour satisfaire une vitesse de biodégradation donnée.

L'approche réacteur n'est donc pas oubliée mais elle ne nous semble pas prioritaire. La biodégradation des xénobiotiques n'implique pas de demandes particulières, les réacteurs devront être calculés pour satisfaire des demandes classiques en transfert de masse et de chaleur.

L'approche analytique non développée nous semble fondamentale. D'une façon générale. Il est difficile de demander à des microbiologistes ou à des spécialistes du génie des procédés d'être de bons analystes. Les laboratoires de chimie analytique devraient développer des techniques spécifiques pour les laboratoires de microbiologie ou de génie des procédés. Dans tous les cas, des laboratoires d'analyse devraient être associés aux laboratoires travaillant sur des problèmes de biodégradation.

Il est difficile de donner une liste de laboratoires travaillant sur les axes de recherche proposés, car il faut intégrer la physiologie microbienne et le génie des procédés. Des équipes à Nancy, Toulouse, Rennes et Compiègne pourraient rapidement monter des projets dans ce domaine.

## Classement par réalisations

Alko Ltd.	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
ARGUS (Arbeitsgruppe Umweltstatistik)	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Base Tech	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Bayer AG	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Beugin Industrie	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Biocatalysts	<input type="radio"/> R & D <input type="radio"/> Industrielles
Biodetox Gesellschaft zur biologischen Schadstoffentsorgung GmbH	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
BioFiltration Inc.	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Biototal Ltd	<input type="radio"/> R & D <input type="radio"/> Industrielles
Clairtech b.v.	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Codabio (société associé au groupe TBA)	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
COHU (Compagnie des huiles usagées)	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
De Ruitter Environmental Technology b.v.	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Detox Industries, Inc.	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Ebiox AG	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Eimco	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
ERI (Environmental Remediation, Inc.)	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Gamlen Industries s.a.	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Haecon (Harbour and Engineering Consultants)	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
HP-biotechnologie GmbH	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Imbach Biological Services	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Imhausen-Chemie GmbH	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
IT (International Technology Corporation)	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
K.K. Miljøteknik A/S	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Keramchemie GmbH	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Kessler + Luch GmbH	<input type="radio"/> R & D <input type="radio"/> Industrielles
Linde AG	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Mourik Groot-Ammers b.v.	<input checked="" type="radio"/> R & D <input type="radio"/> Industrielles
Multibac Ltd	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Orgatech	<input checked="" type="radio"/> R & D <input type="radio"/> Industrielles
OWS n.v. (Organic Waste Systems)	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Schott Engineering	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
Solmar Corp.	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles
TAUW Infra Consult b.v.	<input checked="" type="radio"/> R & D <input type="radio"/> Industrielles
TBA (Techniques et Biochimie Appliquées)	<input type="radio"/> R & D <input type="radio"/> Industrielles
Valorga Process	<input type="radio"/> R & D <input checked="" type="radio"/> Industrielles

## Classement par activité

Alko Ltd.	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
ARGUS (Arbeitsgruppe Umweltstatistik)	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Base Tech	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Bayer AG	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Beugin Industrie	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Biocatalysts	<input type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input checked="" type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Biodetox Gesellschaft zur biologischen Schadstoffentsorgung GmbH	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
BioFiltration Inc.	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Biotial Ltd	<input type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input checked="" type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Clairtech b.v.	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Codabio (société associé au groupe TBA)	<input type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input checked="" type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
COHU (Compagnie des huiles usagées)	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
De Ruiter Environmental Technology b.v.	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Detox Industries, Inc.	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Ebiox AG	<input type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input checked="" type="radio"/> Multiples
Eimco	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
ERI (Environmental Remediation, Inc.)	<input type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input checked="" type="radio"/> Multiples
Gamlen Industries s.a.	<input type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input checked="" type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Haecon (Harbour and Engineering Consultants)	<input type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input checked="" type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
HP-biotechnologie GmbH	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Imbach Biological Services	<input type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input checked="" type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Imhausen-Chemie GmbH	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
IT (International Technology Corporation)	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
K.K. Miljøteknik A/S	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Keramchemie GmbH	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Kessler + Luch GmbH	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples

## Classement par activité

Linde AG	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Mourik Groot-Ammers b.v.	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Multibac Ltd	<input type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input checked="" type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Orgatech	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
OWS n.v. (Organic Waste Systems)	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Schott Engineering	<input type="radio"/> Réalisations, constructions	<input checked="" type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Solmar Corp.	<input type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input checked="" type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
TAUW Infra Consult b.v.	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
TBA (Techniques et Biochimie Appliquées)	<input type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input checked="" type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples
Valorga Process	<input checked="" type="radio"/> Réalisations, constructions	<input type="radio"/> Fourniture de consommable	<input type="radio"/> Fourniture d' agents réactionnels	<input type="radio"/> Multiples

## Classement par finalité

Linde AG	<input checked="" type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Mourik Groot-Ammers b.v.	<input checked="" type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Multibac Ltd	<input checked="" type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Orgatech	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input checked="" type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
OWS n.v. (Organic Waste Systems)	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input checked="" type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Schott Engineering	<input checked="" type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Solmar Corp.	<input checked="" type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
TAUW Infra Consult b.v.	<input checked="" type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
TBA (Techniques et Biochimie Appliquées)	<input checked="" type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Valorga Process	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input checked="" type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets

## Classement par finalité

Alko Ltd.	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
ARGUS (Arbeitsgruppe Umweltstatistik)	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Base Tech	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Bayer AG	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Beugin Industrie	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Biocatalysts	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Biodetox Gesellschaft zur biologischen Schadstoffentsorgung GmbH	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
BioFiltration Inc.	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Biotial Ltd	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Clairtech b.v.	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Codabio (société associé au groupe TBA)	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
COHU (Compagnie des huiles usagées)	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
De Ruiter Environmental Technology b.v.	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Detox Industries, Inc.	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Ebiox AG	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Eimco	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
ERI (Environmental Remediation, Inc.)	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Gamlen Industries s.a.	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Haecon (Harbour and Engineering Consultants)	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
HP-biotechnologie GmbH	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Imbach Biological Services	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Imhausen-Chemie GmbH	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
IT (International Technology Corporation)	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
K.K. Miljøteknik A/S	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Keramchemie GmbH	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets
Kessler + Luch GmbH	<input type="radio"/> Traitement des déchets	<input type="radio"/> Valorisation / traitement des déchets

## Classement par type de déchets

Alko Ltd.	<input type="radio"/> Gaz	<input checked="" type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
ARGUS (Arbeitsgruppe Umweltstatistik)	<input type="radio"/> Gaz	<input checked="" type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Base Tech	<input type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input checked="" type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Bayer AG	<input checked="" type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input checked="" type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Beugin Industrie	<input checked="" type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input checked="" type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Biocatalysts	<input type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input checked="" type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Biodetox Gesellschaft zur biologischen Schadstoffentsorgung GmbH	<input type="radio"/> Gaz	<input checked="" type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input checked="" type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
BioFiltration Inc.	<input checked="" type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Biotial Ltd	<input type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Clairtech b.v.	<input checked="" type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Codabio (société associé au groupe TBA)	<input type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input checked="" type="radio"/> Tous déchets
COHU (Compagnie des huiles usagées)	<input type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input checked="" type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
De Ruitter Environmental Technology b.v.	<input type="radio"/> Gaz	<input checked="" type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Detox Industries, Inc.	<input type="radio"/> Gaz	<input checked="" type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Ebiox AG	<input type="radio"/> Gaz	<input checked="" type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Eimco	<input type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input checked="" type="radio"/> Tous déchets
ERI (Environmental Remediation, Inc.)	<input type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input checked="" type="radio"/> Tous déchets
Gamlen Industries s.a.	<input type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input checked="" type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Haecon (Harbour and Engineering Consultants)	<input type="radio"/> Gaz	<input checked="" type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input checked="" type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
HP-biotechnologie GmbH	<input type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input checked="" type="radio"/> Tous déchets
Imbach Biological Services	<input type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input checked="" type="radio"/> Tous déchets
Imhausen-Chemie GmbH	<input checked="" type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
IT (International Technology Corporation)	<input type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input checked="" type="radio"/> Tous déchets



## Classement par type de déchets

K.K. Miljøteknik A/S	<input type="radio"/> Gaz	<input checked="" type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Keramchemie GmbH	<input checked="" type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Kessler + Luch GmbH	<input type="radio"/> Gaz	<input checked="" type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Linde AG	<input checked="" type="radio"/> Gaz	<input checked="" type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input checked="" type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Mourik Groot-Ammers b.v.	<input type="radio"/> Gaz	<input checked="" type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Multibac Ltd	<input type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input checked="" type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Orgatech	<input type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input checked="" type="radio"/> Tous déchets
OWS n.v. (Organic Waste Systems)	<input type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input checked="" type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
Schott Engineering	<input type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input checked="" type="radio"/> Tous déchets
Solimar Corp.	<input type="radio"/> Gaz	<input checked="" type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
TAUW Infra Consult b.v.	<input type="radio"/> Gaz	<input checked="" type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets
TBA (Techniques et Biochimie Appliquées)	<input type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input checked="" type="radio"/> Tous déchets
Valorga Process	<input type="radio"/> Gaz	<input type="radio"/> Sols, sédiments	<input checked="" type="radio"/> De type ordure ménagère	<input type="radio"/> Liquides	<input type="radio"/> Tous déchets

**Alko Ltd.**  
05200 Rajamäki  
Finland

Tél. : (358 0) 290 21

Fax : (358 0) 290 2236

### Finalité

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

### Activités

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

### Réalisations

- R & D
- Industrielles

### *Nature des déchets*

Sols contaminés par des composés chloroaromatiques.

### *Techniques*

Deux techniques de traitement : compostage en andain, et composteur à tambour (flux continu).

### *Agents réactionnels*

Microorganismes sélectionnés dans des sols contaminés.

### *Réalisations*

Les résultats disponibles concernent un traitement en andain, 3 réalisations en Finlande.

### *Performances*

Minéralisation des chlorophénols: de 215 à 0,3 mg / kg matières sèches, de 9000 à 900, et de 450 à 50, en respectivement 3 ans et deux mois, 4 ans, 2 ans et six mois. Les volumes traités étaient de 50, 300, et 200 m<sup>3</sup>.

### *Economie*

### *Remarques*

Documentation disponible sans données économiques.

**ARGUS (Arbeitsgruppe Umweltstatistik)**

Technische Universität Berlin,  
Einsteinufer 25, 1000 Berlin 10  
Germany

Tél. :

Fax :

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Sols contaminés

***Techniques***

Traitements "In-situ" et "On-site".

***Agents réactionnels******Réalisations******Performances******Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques et de performances.

**Base Tech**

Lilienthalstraße 7-25,  
3500 Kassel  
Germany

Tél. : (49 5 61) 5 44 10 Fax : (49 5 61) 5 48 98

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Eaux industrielles contaminées

***Techniques***

Traitement par passage dans des bassins plantés de roseaux.

***Agents réactionnels******Réalisations***

Industries alimentaires, textiles, chimiques, papetières, minérales.

***Performances***

Elimination d'une pollution jusqu'à 20 000 mg/l de DCO et 4 000 mg/l d'azote.

***Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques.

**Bayer AG**

5090 Leverkusen 1  
Germany

Tél. : (49 2 14) 30-1

Fax : (49 2 14) 30 8 12 03

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

- 1) Eaux usées industrielles et domestiques.
- 2) Air pollué.

***Techniques***

- 1) Lit ascendant / 2) Biofiltre. Traitement par des bactéries aérobies.
- L' injecteur Bayer combiné à une pression élevée, conduit à une utilisation efficace de l'oxygène de l'air (60 à 75%).

***Agents réactionnels***

Bactéries

***Réalisations***

- 1) eaux industrielles et domestiques.
- 2) gaz traités jusque 60 000 m<sup>3</sup>/h.

***Performances***

Pas de chiffres, installations réputées économiques compte tenu des performances d'oxygénation.

***Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques.

**Beugin Industrie**

B.P. 35, La Comté,  
62150 Houdain  
France

Tél. : (33) 21 47 47 00 Fax : (33) 21 41 59 00

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

**Nature des déchets**

- 1) Gaz contenant des solvants issus de processus de fabrication d'emballage (éthanol, acétate d'éthyle, isopropanol, et 2-méthoxypropanol, environ 1200 mg/m<sup>3</sup>, 150kg/h)
- 2) Eaux issues de sols contaminés par des solvants organiques

**Techniques**

- 1) Procédé Keramchemie (voir au nom de cette société). Biolaveur : absorption des polluants gazeux dans une suspension aqueuse de boues activées, et épuration biologique dans des bassins d'aération.
- 2) Procédé Keramchemie (voir au nom de cette société). Traitement des eaux dans des colonnes à garnissage: le liquide passe à contre-courant de l'air de "strapping".

**Agents réactionnels**

- 1) Boues activées / 2) Bactéries fixées.

**Réalisations**

- 1) Détails d'une installation (Tétrapak).
- 2) Détails d'une installation.

**Performances**

- 1) Epuration de 97 à 99 %, jusque 150 000 m<sup>3</sup>/h de gaz à traiter, teneur moyenne à l'entrée : 1200 mg/m<sup>3</sup> (maxi 2800 mg/m<sup>3</sup>), teneur moyenne en sortie : 33 mg/m<sup>3</sup> (maxi 65 mg/m<sup>3</sup>).
- 2) Epuration de 97 à 99 % des solvants chlorés, à raison de 30-40 litre par jour. La sortie contient moins que 50 µg/l de solvant.

**Economie**

- 1) et 2) Pas de données précises disponibles.

**Remarques**

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques.

**Biocatalysts**

Main Avenue, Treforest Industrial Estate,  
Pontypridd, CF37 5UT Wales  
United Kingdom

Tél. : (44 443) 843 712 Fax : (44 443) 841 214

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Eaux résiduaires et industrielles.

***Techniques******Agents réactionnels***

Bactéries non-pathogènes adaptées aux traitements aérobies.  
Enzymes hydrolytiques adaptés aux traitements aérobies.

***Réalisations***

Pas de références d'application disponibles.

***Performances******Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques et de performances.

**Biodetox Gesellschaft zur biologischen Schadstoffentsorgung**

Feldstraße 2,  
3061 Ahnsen / Bückebug  
Germany

Tél. : (49 5722) 8 82-0 Fax : (49 5722) 8 82-82

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Sols et eaux contaminés.

***Techniques***

Traitement "In-situ".

***Agents réactionnels******Réalisations******Performances******Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques et de performances.



**BioFiltration Inc.**

P.O. Box 15268,  
Gainesville, Florida 32604  
USA

Tél. : (1 904) 375-8000 Fax :

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Tous gaz contaminés, composés aliphatiques ou organo-sulfurés, solvants chlorés, terpènes, etc.

***Techniques***

Procédé BIKOVENT, biofiltre. Filtre de large section et de faible profondeur. Le gaz à traiter est humidifié puis introduit dans le filtre; il passe d'abord dans une couche de gravier puis au travers des bactéries fixées.

***Agents réactionnels***

Bactéries.

***Réalisations***

Pas de références disponibles.

***Performances***

Performances annoncées : épuration supérieure à 90 % voire 98 % pour les composés énoncés ci-dessus.  
Temps de résidence des gaz : 15 à 60 secondes; durée de vie du filtre : 5 ans.

***Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques.

**Biotal Ltd**

5 Chiltern Cl.,  
CF4 5DL Cardiff  
United Kingdom

Tél. : (44 222) 766 716 Fax : (44 222) 766 945

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Pas de données disponibles

***Techniques******Agents réactionnels***

Bactéries sélectionnées.

***Réalisations******Performances******Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques, d'applications et de performances.

**Clairtech b.v.**

Postbus 8022,  
3503 RA Utrecht  
The Netherlands

Tél. : (31 3406) 21200 Fax : (31 3406) 21615

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Tous composés gazeux.

***Techniques***

Procédé BIOTON, biofiltre. Epuration des gaz par passage au travers d'une série de couches filtrantes dans lesquelles sont fixés les microorganismes.

***Agents réactionnels***

Bactéries.

***Réalisations***

36 réalisations référencées, essentiellement en Europe. Volumes de 5 à 1350 m<sup>3</sup>, débit d'air de 200 à 150 000 m<sup>3</sup>/h.

***Performances***

Selon les installations, performances de 90 à 100 % d'épuration.

***Economie***

Un calcul, publié par Clairtech, indique un coût global de 1,5 à 30 FF par 1000 m<sup>3</sup> de gaz traité (à titre de comparaison, l' épuration par charbon actif reviendrait à 60-225 FF/100m<sup>3</sup>, par incinération thermique à 15-60 FF/1000m<sup>3</sup>, par incinération catalytique 15-58 FF/1000m<sup>3</sup>). Calculs basés sur la parité 1 DFL=3,02 FF.

***Remarques***

Leader dans l'épuration des gaz.

**Codabio (société associée au groupe TBA)**

CD 4, Zone Industrielle d'Estressin,  
38200 Vienne  
France

Tél. : (33) 74 31 61 22 Fax : (33) 74 85 69 85

### Finalité

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

### Activités

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d'agents réactionnels
- Multiples

### Réalisations

- R & D
- Industrielles

### *Nature des déchets*

Stations d'épurations, réseaux de canalisations, lisiers animaliers, rejets industriels, bacs à graisse, etc.

### *Techniques*

### *Agents réactionnels*

Bactéries lyophilisées ou fixées aptes à épurer.  
Dérivés enzymatiques.

### *Réalisations*

18 utilisations référencées, depuis 1987.

### *Performances*

### *Economie*

### *Remarques*

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques et de performances.

**COHU (Compagnie des huiles usagées)**

10 Avenue Ampère,  
78180 Montigny-le-Bretonneux  
France

Tél. : (33 1) 30 58 09 09 Fax : (33 1) 34 60 55 25

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Mélanges eau/hydrocarbures/sédiments.  
Huiles solubles usagées.

***Techniques***

Traitement des effluents aqueux par passage dans un lit bactérien de type Cloisonyl.

***Agents réactionnels***

Bactéries fixées.

***Réalisations******Performances******Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques, de réalisations, et de performances.

**De Ruiter Environmental Technology b.v.**

Postbus 14,  
1160 AA, Zwanenburg  
The Netherlands

Tél. : (31 2907) 8011

Fax : (31 2907) 2142

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Sols contaminés.

***Techniques***

Traitement "In-situ".

***Agents réactionnels***

***Réalisations***

***Performances***

***Economie***

***Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques, de réalisations, et de performances.

**Detox Industries, Inc.**

12919 Dairy Ashford,  
Sugar Land, Texas 77478  
USA

Tél. : (1 713) 240-0892 Fax :

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Sols ou sédiments contaminés par des PCB, du pentachlorophénol, des huiles, des composés phénoliques, des PAH, du DDT, etc.

***Techniques***

Traitement par excavation du sol ou du sédiment, mélange avec des microorganismes sélectionnés, addition de nutriments; procédé batch.

***Agents réactionnels***

Bactéries sélectionnées.

***Réalisations***

Quelques références aux USA.

***Performances***

Minéralisation complète des polluants.

***Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques.

**Ebiox AG**  
6210 Sursee  
Switzerland

Tél. : (41 45) 21 84 84 Fax :

### Finalité

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

### Activités

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

### Réalisations

- R & D
- Industrielles

### *Nature des déchets*

Sols sédiments contaminés ou lixiviats contaminés par : solvants aromatiques, PAHs, Huiles minérales, hydrocarbures aliphatiques, déchets alimentaires, cyanures, etc.

### *Techniques*

Selon les déchets, traitement "Off-site", "In-situ", ou par passage sur filtre bactérien.

### *Agents réactionnels*

Bactéries sélectionnées.

### *Réalisations*

Pas de données précises disponibles.

### *Performances*

Selon les cas, minéralisation complète des composés polluants en 50 heures (pentachlorophénol, fioul, ...), 25 jours (toluène, octane, ...).

### *Economie*

Coût de traitement annoncé entre 380 et 1920 FF/ tonne en fonction du déchet. Calcul basé sur la parité 1 SFR=3,84 FF.

### *Remarques*

Réalisation complète d'installation de traitement et fourniture de microorganismes sélectionnés.



**Eimco**

P.O. Box 300,  
Salt Lake City, Utah 84110  
USA

Tél. : (1 801) 526-2000 Fax : (1 801) 526-2014

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Déchets concentrés contaminés

***Techniques***

Procédé BIOLIFT, réacteur spécifiquement conçu pour traiter des substrats concentrés.

***Agents réactionnels***

??

***Réalisations******Performances******Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques, de réalisations, et de performances.

**ERI (Environmental Remediation, Inc.)**

P.O. Box 45212-210,  
Baton-Rouge, LA 70895  
USA

Tél. : (1 504) 665-1903 Fax :

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Sols contaminés, eaux résiduaires, sédiments.

***Techniques***

Bioréacteurs, traitements "In-situ", lagunage.

***Agents réactionnels***

Bactéries sélectionnées.

***Réalisations***

Plus de 35 projet ou réalisations référencées.

***Performances***

***Economie***

***Remarques***

Réalisation complète d'installation de traitement et fourniture de microorganismes sélectionnés. Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques et de performances.

**Gamlen Industries s.a.**

62-70 Rue Yvan Tourgueneff,  
78380 Bougival  
France

Tél. : (33 1) 39 18 92 34 Fax : (33 1) 39 18 22 05

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Eaux résiduaires (épuration aérobie, nitrification/dénitrification), eaux contaminées par des composés organiques (hydrocarbures, phénols, cyanures, mercaptans, graisses, etc.)

***Techniques******Agents réactionnels***

21 consortia microbiens adaptés au traitement d'un effluent.

***Réalisations***

Pas de références d'application disponibles.

***Performances******Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques, d'applications, et de performances.

**Haecon (Harbour and Engineering Consultants)**

Deinsesteenweg 110,  
9031 Gent - Drongen  
Belgium

Tél. : (32 91) 26 50 94 Fax : (32 91) 27 61 05

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Sols, sédiments, systèmes aquatiques contaminés par des huiles ou des hydrocarbures.

***Techniques***

Procédé CIS (Conditioning In-Situ) : ajout dans les sols ou les sédiments de produits minéraux sélectionnés afin d'accélérer la biodégradation des polluants. Peut être combiné à l'introduction de microorganismes sélectionnés -collaboration avec Ebiox AG- --> procédé ABR/CIS (Augmented BioRemediation/Conditioning In-Situ).

***Agents réactionnels******Réalisations***

Depuis 1982, une dizaine de sites référencés (marais, lacs, rivières, etc.), en Belgique et aux Pays-Bas.  
Depuis 1989, ajout de minéraux et de microorganismes.

***Performances***

Epuraton de 75 à 98 % d'huiles minérales (4 mois), de 30 % de PAH en un mois (projet en cours).

***Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques.

**HP-biotechnologie GmbH**

Brauckstraße 51,  
5810 Witten  
Germany

Tél. : (49 23 02) 668 311 Fax : (49 23 02) 668 365

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Eaux, sols et boues contaminés par des hydrocarbures, lixiviat de décharges d'ordures ménagères.

***Techniques***

Réacteur "HP-bioStack", réacteur transportable sur les lieux pollués, volume :15 m3. Traitement de type batch, avec aération et mélange.

***Agents réactionnels***

Bactéries sélectionnées.

***Réalisations******Performances***

Performances annoncées : réduction de 90-95 % des hydrocarbures, en 4 à 6 semaines; contamination résiduelle : environ 500 mg d'hydrocarbures par kilogramme de sol.

***Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques et de réalisations.

**Imbach Biological Services**

20 Rue Traversière,  
92230 Gennevilliers  
France

Tél. : (33 1) 47 33 61 69 Fax : (33 1) 47 33 09 04

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Tout déchet chronique ou accidentel: hydrocarbures, composés organiques divers, eaux résiduaires, déchets animaliers, pesticides et insecticides, etc.

***Techniques******Agents réactionnels***

Bactéries sélectionnées pour la destruction de polluants particuliers.

***Réalisations******Performances******Economie******Remarques***

Pas de réponse précise aux demandes d'obtention de données économiques et de performances.

**Imhausen-Chemie GmbH**

Kaiserstraße 95,  
7630 Lahr  
Germany

Tél. : (49 78 21) 27 86-0 Fax : (49 78 21) 27 15 09

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Désulfuration du biogaz, du gaz naturel et des gaz industriels.

***Techniques***

Procédé "BiopurIC" . Oxydation des composés soufrés en sulfate et soufre par des thiobacilles fixés sur un lit bactérien. Procédé en continu.

***Agents réactionnels***

Thiobacilles.

***Réalisations******Performances***

Performances annoncées : réduction de 7000 ppm d'H<sub>2</sub>S à moins de 40 ppm.

***Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques et de réalisations.

**IT (International Technology Corporation)**

23456 Hawthorne Boulevard,  
Torrance, California 90505  
USA

Tél. : (1 213) 378-9933 Fax :

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Sols, nappes aquifères, contaminés par des pollutions chroniques ou accidentelles : hydrocarbures, explosifs, etc.

***Techniques***

Selon les cas, bioréacteurs, ou traitements "In-situ".

***Agents réactionnels***

Microorganismes sélectionnés.

***Réalisations******Performances******Economie******Remarques***

Pas de réponse précise aux demandes d'obtention de données économiques et de performances.  
Plus de 300 employés, 40 sites aux USA, vaste expérience et champs d'activité. Épuration biologique et/ou thermique des pollutions.



**K.K. Miljøteknik A/S**  
Kypergarden, Kohavevej 5  
2950 Vedbæk  
Denmark

Tél. : (45) 66 11 77

Fax : (45) 66 02 03

### Finalité

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

### Activités

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

### Réalisations

- R & D
- Industrielles

### *Nature des déchets*

Sols pollués par des hydrocarbures et des composés chimiques divers

### *Techniques*

Traitement "Off-site" : excavation du sol contaminé; enlèvement des métaux, plastiques, etc.; mises en andains, dégradation des polluants par les microorganismes présents dans les sols; posttraitement chimique et thermique.

### *Agents réactionnels*

Microorganismes naturellement présents dans les sols.

### *Réalisations*

Depuis 1988 (fondation de la société), 3 sites sont opérationnels au Danemark.

### *Performances*

200 000 tonnes par an, en 6 mois de traitement, les polluants résiduels sont inférieurs à 100 ppm.

### *Economie*

Environ 290 FF par m<sup>3</sup> (70 FF de coût opérationnel -coût variable-, et 220 FF d'amortissement des installations). Calculs basés sur la parité 1 DKR=0,88 FF.

### *Remarques*

**Keramchemie GmbH**

Postfach 11 63,  
5433 Siershahn/Westerwald  
Germany

Tél. : (49 26 23) 600-616 Fax : (49 26 23) 600-795

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

H<sub>2</sub>S, composés soufrés divers, phénols, alcools, cétones, aldéhydes, etc.

***Techniques***

Absorption des polluants gazeux dans une phase aqueuse par passage dans un réacteur de type biolaveur, et épuration des eaux en bassins d'aération.

***Agents réactionnels***

Microorganismes sélectionnés.

***Réalisations***

15 installations industrielles référencées, dont 10 en Allemagne. débit d'air de 1000 à 147 000 m<sup>3</sup> par heure (moyenne de 45 000 m<sup>3</sup>/h).

***Performances***

Pas de données précises disponibles, globalement une épuration supérieure à 90 % est annoncée.

***Economie******Remarques***

Pour la France, voir à Beugin Industries.

**Kessler + Luch GmbH**

Rathenaustraße 8, Postfach 5810  
6300 Gießen  
Germany

Tél. : (49 6 41) 7 07-00 Fax : (49 6 41) 7 07-316

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Sols contaminés.

***Techniques***

Procédé "Biovar", traitement "Off-site", excavation des sols pollués, placement dans des réacteurs de type "conteneur" avec aération par la base du tas.

***Agents réactionnels***

Microorganismes présents naturellement dans les sols.

***Réalisations******Performances******Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques, de réalisations, et de performances.

**Linde AG**

Dr.-Carl-von-Linde-Straße 6-14,  
8023 Höllriegelskreuth bei München,  
Germany

Tél. : (49 89) 72 73-1

Fax : (49 89) 72 73-29 46

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

- 1) Eaux usées domestiques et industrielles.
- 2) Air.
- 3) Sols, boues de stations d'épuration.

***Techniques***

- 1) Epuration classique aérobie et anaérobie (adsorption sur boues anaérobies).
- 2) Adsorption dans un réacteur, biodégradation dans un second réacteur.
- 3) Compostage aérobie (DYWIDAG) pour les sols contaminés par des hydrocarbures aliphatiques, aromatiques polycycliques. etc.): minéralisation des boues en réacteur aérobie (avec oxygène ou air).

***Agents réactionnels***

Bactéries.

***Réalisations***

Nombreuses références.

***Performances***

Pour l'air: 160 000 m<sup>3</sup>/h, épuration de 89 à 100 % de, par exemple, formaldéhyde (5-42 mg/m<sup>3</sup>), méthanol (32-147 mg/m<sup>3</sup>), éthylèneglycol (0-40 mg/m<sup>3</sup>).

Autres procédés : normes allemandes.

***Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques.

**Mourik Groot-Ammers b.v.**

Postbus 2,  
2964 AA, Groot-Ammers  
The Netherlands

Tél. : (31 1842) 1230

Fax : (31 1842) 2316

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Sols contaminés.

***Techniques***

Traitements "In-situ" et "Off-site".

***Agents réactionnels***

Bactéries.

***Réalisations******Performances******Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques, de réalisations, et de performances.

**Multibac Ltd**

37 Idbury Close, Weavers Meadow,  
Witney, Oxon, OX8 5FE  
United Kingdom

Tél. : (44 993) 778 056 Fax : (44 993) 778 058

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d'agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Eaux résiduaires, eaux industrielles contaminées par des composés organiques, aliphatiques et aromatiques.

***Techniques******Agents réactionnels***

Bactéries sélectionnées, 19 consortia disponibles.  
Enzymes sélectionnées.

***Réalisations***

Peu de données disponibles.

***Performances***

Performances annoncées comme totales (100% d'élimination).

***Economie******Remarques***

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques.

**Orgatech**

Z.I. des Iscles, Avenue des Confignes - B.P. 24,  
13834 Chateaurenard cedex  
France

Tél. : (33) 90 94 69 00 Fax : (33) 90 94 25 92

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d'agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Boues d'épuration tant industrielle que résiduaire, déjections animales concentrées, déchets agricoles.

***Techniques***

Procédé "BIOSEC", présenté comme un procédé de déshydratation-stabilisation par voie biologique, forme de compostage amélioré.

***Agents réactionnels***

Microorganismes naturellement présents dans les déchets, ou ajoutés.

***Réalisations***

Création de la société en 1983, études et pilotes de 1983 à 1987. Pilote industriel installé à Châteaurenard depuis 1989 ( 5 réacteurs de 125 m<sup>3</sup> chacun, capacité de 2000 tonnes/an).

***Performances***

5 à 6 semaines de traitement, 50 à 800 litres d'eau évaporée par tonnes de substrat (humidité résiduelle 20-50 %), 300 à 500 kg de produit fini par tonne de substrat (fraction fine), 2000-2500 tonnes/an de capacité de traitement par module.

***Economie***

Investissements : 800-1500 kF par 1000 tonnes/an, fonctionnement : 100-200 F/tonne traitée.

***Remarques***

Traitement et valorisation des déchets.

**OWS n.v. (Organic Waste Systems)**

Dok Noord 7 b,  
9000 Gent  
Belgium

Tél. : (32 91) 33 02 04 Fax : (32 91) 23 32 47

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

**Nature des déchets**

Fraction organique des ordures ménagères, extensible à tout déchet organique concentré.

**Techniques**

Procédé "DRANCO (DRy ANaerobic CONversion process): traitement des déchets, préalablement broyé et mélangé avec une fraction liquide sortant du réacteur, en un réacteur continu, anaérobie, de type piston. Procédé entièrement breveté. L'effluent semi-solide est séché et peut être utilisé comme amendement organique.

**Agents réactionnels**

Microorganismes naturellement présents dans les déchets.

**Réalisations**

Une installation pilote à Gand (Belgique) depuis 1983 (60 m<sup>3</sup>), une installation industrielle à Brecht depuis 1992 (808 m<sup>3</sup>).

**Performances**

5 années de tests en pilote donnent, à la température de fonctionnement de 50-55°C et avec 18-21 jours de temps de séjour : 90 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> par tonne d'ordures, c.à.d. 150-250 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> / tonne de matière organique. L'"Humotex", amendement organique final, possède 50-55% MS. et un rapport C/N de 12.

**Economie**

Coût annuel net calculé pour une installation hypothétique de 2600 m<sup>3</sup> (25000 tonnes /an) : 4,43 MF/an, soit 177 FF/tonne.

**Remarques**

Traitement et valorisation des déchets. 19 publications scientifiques (articles, livres, conférences) décrivant le procédé et ses performances.



**Schott Engineering**

8 Rue Fournier, B.P. 203  
92112 Clichy cedex  
France

Tél. : (33 1) 40873960 Fax :

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Tous déchets susceptibles d'être traités dans un réacteur biologique à biomasse fixée.

***Techniques******Agents réactionnels******Réalisations***

4 installations industrielles utilisent ce support, de nombreux essais ont été réalisés à l'échelle pilote ou de laboratoire.

***Performances***

Surface de fixation jusqu'à 0,4 m<sup>2</sup>/g de support, 90000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> de lit; 160 kg de Demande Chimique en Oxygène par m<sup>3</sup> de réacteur ont pu être traités en lit fluidisé utilisant ce support.

***Economie***

425 FF par litre de support sous forme d'anneau de Raschig.

***Remarques***

Procédé "SIRAN", verre compacté spécialement étudié pour supporter une forte croissance des microorganismes, entre autres les microorganismes anaérobies impliqués dans le traitement des déchets. Le support est disponible en forme d'anneau de Raschig, d'éponge ou de bille.

**Solmar Corp.**

625 West Katella Avenue, Suite 5  
Orange, California 92667  
USA

Tél. : (1 714) 538-0881 Fax :

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d'agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

***Nature des déchets***

Sols contaminés par des hydrocarbures, aliphatiques et/ou aromatiques.

***Techniques******Agents réactionnels***

Consortia bactériens sélectionnés.

***Réalisations***

Une dizaine de sites américains décontaminés sont référencés.

***Performances***

Selon les cas, minéralisation pratiquement complète des polluants en 60 jours (3000 à 30 ppm d'hydrocarbures) à un an (de 30000 à  $\pm$  100 ppm d'hydrocarbures).

***Economie***

De 75 à 350 FF/ tonne de sol contaminé (à comparer à 600-700 FF/tonne pour la mise en décharge, 750-2000 F/tonne pour une incinération "On-site", 500-1000 FF/tonne pour une stabilisation/fixation physico-chimique). Calculs basés sur la parité 1 US\$= 5 FF.

***Remarques***

Développement de la notion de "Bioaugmentation", c'est-à-dire de l'ajout de microorganismes sélectionnés pour accélérer le processus de dégradation des contaminants.

**TAUW Infra Consult b.v.**

Postbus 479,  
7400 AL Deventer  
The Netherlands

Tél. : (31 5700) 99911 Fax : (31 5700) 99270

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

*Nature des déchets*

Sols contaminés.

*Techniques*

Traitement "In-situ".

*Agents réactionnels*

*Réalisations*

*Performances*

*Economie*

*Remarques*

Pas de réponse aux demandes d'obtention de données économiques, de réalisations, et de performances.

**TBA (Techniques et Biochimie Appliquées)**

116/118 avenue Beaurepaire

94100 Saint-Maur

France

Tél. : (33 1) 48 83 46 00 Fax : (33 1) 48 83 73 12

**Finalité**

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

**Activités**

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

**Réalisations**

- R & D
- Industrielles

*Nature des déchets**Techniques**Agents réactionnels**Réalisations**Performances**Economie**Remarques***Voir Codabio**

## Valorga Process

Z.I. de Vendargues, 5 Rue de Massacan,  
34740 Vendargues  
France

Tél. : (33) 67 87 80 00 Fax : (33) 67 70 46 94

### Finalité

- Traitement des déchets
- Valorisation / traitement des déchets

### Activités

- Réalisations, constructions
- Fourniture de consommable
- Fourniture d' agents réactionnels
- Multiples

### Réalisations

- R & D
- Industrielles

### Nature des déchets

Fraction organique des ordures ménagères, extensible à tout déchet organique concentré.

### Techniques

Procédé "Valorga": traitement complet des déchets (tri, méthanisation, affinage, valorisation). La fraction organique est traitée dans un réacteur continu, anaérobie, de type piston. L'effluent semi-solide est séché et peut être utilisé comme amendement organique.

### Agents réactionnels

Microorganismes naturellement présents dans les déchets.

### Réalisations

Une installation industrielle Amiens depuis 1988 (5550 m<sup>3</sup> de volume utile), environ 55000 tonnes de la fraction organique d'ordures ménagères sont traitées annuellement. Une installation est en construction à Tahiti.

### Performances

Les performances, à la température de fonctionnement de 37-40°C et avec 18-21 jours de temps de séjour : 210-240 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> / tonne de matière organique, 15000 de gaz par jour. A 55-60 °c, les rend. prévus sont 220-260 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ T M.O. et 20000 m<sup>3</sup> gaz/j. Le digestat semi-solide, amendement organique final, possède 50-55% MS.

### Economie

### Remarques

Traitement et valorisation des déchets. Le gaz et le digestat sont valorisables. Pas de réponse précise aux demandes d'obtention de données économiques.