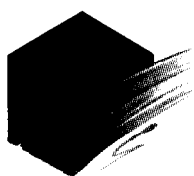




18972-I RM

Agence de l'eau  
Rhône-Méditerranée-Corse

TUDE  
NCES  
N°36



*Agences de l'Eau*

MINISTÈRE DE  
L'ENVIRONNEMENT

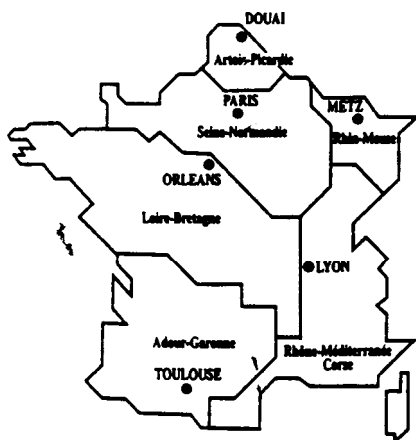
# DECONTAMINATION DES NAPPES ETAT DE L'ART .

## Tomme 1 : Synthèse

# DECONTAMINATION DES NAPPES ETAT DE L'ART



## Tome 1 : Synthèse



Document réalisé sous la direction des Agences de l'Eau et  
du Ministère de **l'Environnement**

Chargé d'étude : BURGEAP

156, Route de Tarascon  
84000 Avignon

150 francs

Mai 1994

550 exemplaires

@Agences de l'eau, 1994

Tous droits réservés

## SOMMAIRE

PREMIERE PARTIE : OBJET DE L'ETUDE	1
1. <b>OBJET DE</b> L'ETUDE	2
2. METHODOLOGIE DE L'ETUDE	2
2.1. Organisation <b>générale</b>	2
2.2. Acquisition des informations de base	3
SECONDE PARTIE : LE MILIEU SOUTERRAIN, LES POLLUANTS, LEUR COMPORTEMENT DANS LE MILIEU SOUTERRAIN	4
1. LE MILIEU SOUTERRAIN	5
1.1. zone <b>saturée</b> et <b>non-saturée</b>	5
1.2. Nappes libres, nappes captives, nappes alluviales	6
1.3. Surface <b>piézométrique</b> - carte <b>piézométrique</b>	6
1.4. <b>Caractéristiques</b> dynamiques d'un <b>aquifère</b>	7
1.5. <b>L'inhérogénéité, caractéristique</b> de base du milieu souterrain	8
1.6. Le milieu souterrain, <b>siège</b> d'une <b>activité</b> biologique	8
2. POLLUANTS LES PLUS COURAMMENT RENCONTRES	9
2.1. Polluants <b>minéraux</b>	9
2.2. <b>Polluants</b> organiques	10
2.2.1. Hydrocarbures couramment commercialisés	10
2.2.2. Autres hydrocarbures	10
2.2.3. Organo-halogénés aliphatiques	11
2.2.4. Autres substances organiques	12
2.3. Contaminations complexes	12
2.4. <b>Propriétés</b> importantes des polluants <b>vis-à-vis</b> du transfert et de la <b>décontamination</b>	13

3.	TRANSPORT DES POLLUANTS DANS LE MILIEU SOUTERRAIN	17
3.1.	Dans la <del>zone non-saturée</del>	17
3.2.	Dans la zone saturée	19
3.2.1.	Généralités	19
3.2.2.	Transport <del>convectif</del>	19
3.2.3.	Dispersion	20
3.2.4.	Facteurs retard	20
3.2.5.	Simulation des phénomènes	21
3.3.	Exemples	21
3.3.1.	Produit moins dense que l'eau (hydrocarbure courant)	21
3.3.2.	Produit plus lourd que l'eau (solvant halogéné)	25
4.	PRINCIPAUX MECANISMES BIOLOGIQUES <b>UTILISABLES</b> DANS LA <b>DECONTAMINATION</b> DES NAPPES	28
4.1.	<del>Généralités</del>	28
4.2.	Mécanismes de la transformation biologique des produits organiques	28
4.3.	Mécanismes de la transformation biologique des contaminants <b>minéraux</b>	28
4.4.	Principaux facteurs limitants	29
4.4.1.	Non-disponibilité des contaminants	29
4.4.2.	Autres facteurs limitants	30
4.5.	Principaux contaminants accessibles au traitement biologique	31
TROISIEME PARTIE : LES PROCEDES DE DECONTAMINATION DES NAPPES		32
1.	INVENTAIRE DES PROCEDES	33
2.	ANALYSE DES PRINCIPAUX PROCEDES IN <b>SITU</b>	34
2.1.	Le pompage-traitement	34
2.1.1.	Principes	34
2.1.2.	<del>Conditions d'application</del>	35
2.1.3.	Mise en oeuvre	35
2.1.4.	Avant de lancer un pompage-traitement...	36
2.2.	<del>L'écoulement</del>	38
2.2.1.	Principes	38
2.2.2.	Condiitions d'application	39
2.2.3.	Mise en oeuvre	39
2.2.4.	Commentaires	39

2.3.	La <del>bio-activation</del> <b>bio-activation</b>	40
2.3.1.	Principes	40
2.3.2.	Conditions d'application	42
2.3.3.	Mise en oeuvre	42
2.3.4.	Commentaires	43
2.4.	Le sparging ou stripping in <b>situ</b>	45
2.4.1.	Principes	45
2.4.2.	Conditions d'application	46
2.4.3.	Mise en oeuvre	46
2.4.4.	Commentaires	47
2.5.	Le <del>procédé</del> <b>procédé</b> UVB	46
2.5.1.	Principes	48
2.5.2.	Condiions d'application	49
2.5.3.	Mise en oeuvre	49
2.5.4.	Commentaires	49
2.6.	L'extraction double	50
2.6.1.	Principes	50
2.6.2.	Conditions d'application	51
2.6.3.	Mise en oeuvre	51
2.6.4.	Commentaires	52
2.7.	Les <del>procédés</del> <b>procédés</b> d'oxydo-réduction in <b>situ</b>	52
2.7.1.	Principes	52
2.7.2.	Conditions d'application	53
2.7.3.	Mise en oeuvre	53
2.7.4.	Commentaires	53
2.8.	Les <del>procédés</del> <b>procédés</b> biologiques	53
2.8.1.	Modifications physiques dans l'environnement souterrain	53
2.8.2.	Modifications chimiques dans l'environnement souterrain	54
2.8.3.	Problèmes de mise en oeuvre	54
2.8.4.	<del>Multiplication</del> <b>Multiplication</b> de micro-organismes endogènes	55
2.8.5.	Apport de flore exogène	55
3.	ANALYSE DES PRINCIPAUX PROCEDES EX <b>SITU</b>	56
3.1.	Le stripping	66
3.1.1.	Principes	56
3.1.2.	Conditions d'application	57
3.1.3.	Mise en oeuvre	57
3.1.4.	Commentaires	57

32.	<b>Adsorption</b> sur charbon actif	58
3.2.1.	Principe	58
3.2.2.	Conditions d'application	58
3.2.3.	Mise en oeuvre	58
3.2.4.	Commentaires	59
3.3.	Les <b>facteurs biologiques</b>	59
3.3.1.	Principe	59
3.3.2.	Conditions d'application	59
3.3.3.	Mise en oeuvre	59
3.3.4.	Commentaires	60
4.	ANALYSE DES PRINCIPAUX PROCEDES EN DEVELOPPEMENT	61
4.1.	La recherche-développement sur la bio-dégradation des produits halogènes	81
4.2.	Les procédés passifs : Parois traitantes	62
4.3.	Les <b>procédés électriques</b>	63
	QUATRIEME PARTIE - SYNTHESE ADEQUATIONS SITUATIONS - PROCEDES	84
1.	TYPOLOGIE HYDROGEOLOGIQUE	65
1.1.	<b>Critères</b> de classification	65
1.1.1.	Epaisseur et nature de la zone non-saturée	65
1.1.2.	Vitesse de déplacement de l'aquifère	65
1.1.3.	Chimie des eaux	66
1.1.4.	Hétérogénéité du milieu souterrain	66
1.1.5.	Autres facteurs	67
1.2.	Proposition de typologie des situations <b>hydrogéologiques</b>	67
1.2.1.	Critères de base	67
1.2.2.	Association de ces critères en fonction des conditions hydrogéologiques françaises et des contaminations connues	68
1.3.	Synthèse	71
2.	TYPOLOGIE DES CONTAMINATIONS	71
2.1.	<b>Cas</b> particulier des contaminations minérales	71
2.2.	Contaminants organiques	71
2.3.	Contaminations complexes	73

3. ADEQUATIONS PROCEDES • SITUATIONS HYDROGEOLOGIQUES	74
4. ADEQUATIONS PROCEDES • CONTAMINANTS	75
5. SYNTHESE	76
5.1. Situations "faciles" ›	76
5.2. Situations "difficiles"	76
5.3. Contaminations <del>minérales</del>	77
CINQUIEME PARTIE : STRATEGIES DE DECONTAMINATION QUELQUES PRINCIPES GENERAUX	70
SIXIEME PARTIE : DEVELOPPEMENTS A ENVISAGER EN FRANCE	82

## 1. OBJET DE L'ETUDE

La **présente** étude, menée dans le cadre du **thème** Interagences "Déchets et transferts de pollution", concerne la réalisation d'un état de l'art des techniques de décontamination des nappes souterraines par des dépôts de déchets ou des sols **imprégnés**.

Elle a pour objet de répondre aux besoins suivants, exprimés par les Agences de l'Eau et d'autres **prescripteurs** français :

- \* disposer d'un ensemble de techniques de décontamination **éprouvées**, évaluées en efficacité et en coût ;
- \* **être** en mesure de choisir dans chaque cas les solutions techniques et les critères de dépollution adaptés.

Elle est complémentaire d'études analogues, menées en 1993 et 1994 sous l'égide de l'**ADEME**, consacrées aux méthodes de traitement des sols, lesquelles sont en **conséquence** exclues du champ de la présente étude.

Confiée par l'agence **d'exécution** (Agence de l'**Eau** Rhin-Meuse) à Burgéap SA, l'étude a **été exécutée** au second semestre 1993 et **débuté** 1994. **Burgéap** s'est attaché en **sous-traitance** la coopération du GIE Anjou Recherche, de l'Institut français du **Pétrole**, de l'Institut **d'Hydromécanique** de l'Université de Karlsruhe (RFA), et de la **société** néerlandaise IWACO BV.

De nombreuses institutions et sociétés ont en **outre** apporté leur contribution à l'étude, notamment en acceptant de collaborer à l'enquête mentionnée plus loin. La liste des **sociétés** et personnes **contactées** figure en Annexe 1 au **présent** document.

## 2. METHODOLOGIE DE L'ETUDE

### 2.1. Organisation **générale**

L'**étude** a été organisée à partir de trois principaux volets :

- ① Inventaire des **procédés** de décontamination ;
- ② Etablissement d'une typologie, visant à mettre en relation les types de contamination recensés avec des techniques adaptées ;
- ③ Synthèse critique de l'information obtenue, visant notamment à définir quelques axes de travail pour la mise au point ou l'amélioration des procédés existants et la recherche de nouveaux procédés.



## 2.2 Acquisition des informations de base

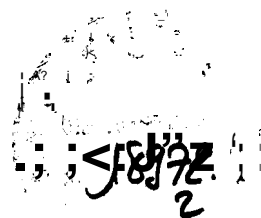
Les informations de base ont **été** acquises **à** travers :

- \* un examen approfondi de la littérature internationale de ces dernières **années** : publications **spécialisées**, actes de congrès notamment (la liste - non exhaustive - des documents **utilisés** est **reportée** en Annexe 2) ;
- \* l'analyse détaillée de l'abondante **littérature** produite par l'Agence **Fédérale** américaine de Protection de **l'Environnement** (EPA), **facilitée** par l'accès par **télécommunication** à des banques de données spécialisées (**ATTIC** et **VISITT** notamment) ;
- \* un questionnaire de **complément** adresse **à** certaines entreprises de **dépollution**, notamment américaines, grâce **à** un **réseau** de correspondants aux Etats Unis ;
- \* une large enquête menée en France, en Allemagne et aux Pays-Bas pour inventorier des opérations "en vraie grandeur" intéressantes dans la perspective de l'étude :
  - en France, il a **été** possible, par le canal de **IUPDS** (Union Professionnelle des Entreprises de Dépollution de Sites), de rentrer en contact avec les sociétés actives en matière de décontamination de nappes ; celles qui ont souhaité participer **à** l'enquête ont **été** sollicitées pour **présenter** des opérations dans ce domaine, qui ont été intégrées à l'inventaire qui fait l'objet du Tome III du présent rapport ;
  - en Allemagne, l'inventaire a été **mené** par l'Université de Karlsruhe ; de la même façon, les **opérations** les plus significatives ont été **intégrées** à l'inventaire ;
  - aux Pays-Bas, **il a été** facilité par l'aide **apportée** par la Sté IWACO, qui a **sélectionné** **à** notre demande quelques **réalisations** parmi un nombre important d'opérations auxquelles elle a **été** associée, et nous a laissé **accéder** à des documents internes **d'évaluation** de ces **opérations**.

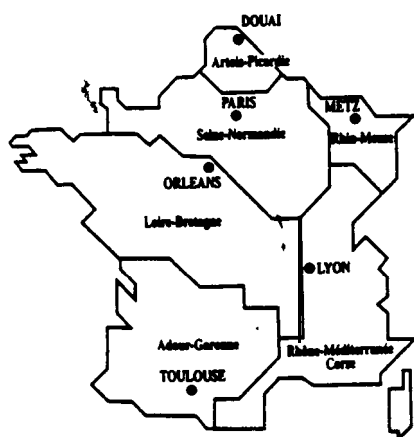
On est ainsi parvenu **à** identifier et **à** décrire de façon **détaillée** :

- \* d'une part des **procédés** de décontamination, dont la **présentation** fait l'objet du Tome II du **présent** document ;
- \* d'autre part des opérations, autant que possible achevées, qui sont **présentées** au Tome III; celles-ci ont **été** choisies sur la base de critères hydrogéologiques, de critères relatifs **à** la nature de la contamination, et en fonction des procédés mis en oeuvre, pour constituer une sélection représentative et correspondant aux préoccupations des Agences.

# DECONTAMINATION DES NAPPES ETAT DE L'ART



## Tome 2 : **Recueil** de fiches- procédés



*Document réalisé sous la direction des Agences de l'Eau et  
du Ministère de l'Environnement  
Chargé d'étude : BURGEAP  
156, Route de Tarascon  
84000 Avignon  
150 francs  
Mai 1994  
250 exemplaires  
@Agences de l'eau, 1994  
Tous droits réservés*

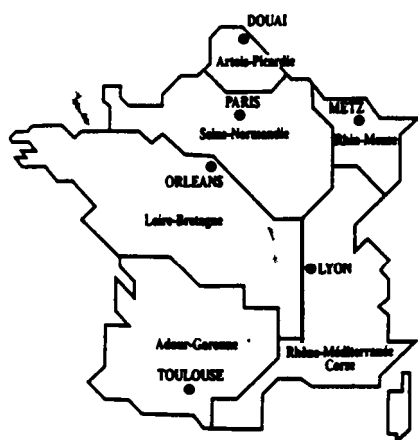
## SOMMAIRE

PREMIERE PARTIE : PROCEDES IN <b>SITU</b>	1
POMPAGE-TRAITEMENT	2
ECREMAGE	8
<b>BIO-LIXIVATION</b>	11
AIR-SPARGING OU STRIPPING IN <b>SITU</b>	15
UVB	20
EXTRACTION DOUBLE	24
"SPARGING" A L'AZOTE	28
VYREDOX	31
TECHNIQUES DE BASE EN <b>DECONTAMINATION</b> BIOLOGIQUE DES NAPPES	34
SECONDE PARTIE : PROCEDES EX <b>SITU</b>	38
STRIPPING	39
ADSORPTION SUR CHARBON <b>ACTIF</b>	42
BIOREACTEUR AEROBIE	48
TROISIEME <b>PARTIE</b> : PROCEDES EN DEVELOPPEMENT	<b>50</b>
BIOREACTEUR METHANOTROPHE	51
<b>DEHALOGENATION IN SITU</b> PAR <b>COMETABOLISME</b> DE BACTERIES METHANOTROPES	52
<b>DEHALOGENATION</b> REDUCTRICE	54
PAROIS <b>TRAITANTES</b> BIOLOGIQUES	<b>55</b>
ELECTROPHORESE IN <b>SITU</b>	<b>57</b>

# DECONTAMINATION DES NAPPES ETAT DE L'ART

*1994*  
3

## Tom e 3 : Recueil de fiches-opérations



Document réalisé sous la direction des Agences de l'Eau et  
du Ministère de l'Environnement  
Chargé d'étude : **BURG** EA P  
156, Route de Tarascon  
84000 Avignon  
150 francs  
Mai 1994  
250 exemplaires  
©Agences de l'eau, 1994  
Tous droits réservés

## SOMMAIRE

### PREMIERE PARTIE : FICHES DETAILLEES D'OPERATIONS

- I France, région Rhône-Alpes 1  
Fuite de gazole sur une station-service - Produit flottant + dissous  
Hydrogéologie locale complexe - nappes perchées dans colluvions et remblai de faible perméabilité.  
Influence importante d'un ouvrage souterrain  
Drainage / Biodegradation active + Ecrémage  
Informations fournies par l'Institut français du Pétrole et Burgéap
- II Uiterboren (Pays-Bas) 7  
Contamination issue d'un établissement de pompage et de purification de gaz naturel - BTEX.  
Formations sablo-argileuses.  
Pompage - traitement par stripping + Charbon actif + bioréacteur.  
Informations fournies par la Sté IWACO, Rotterdam.
- III Sud des Pays-Bas 18  
Contamination par mélange de solvants chlorés, issue d'une blanchisserie.  
Niveau peu perméable en surface, puis 35 m de terrain sableux aquifère sur marnes imperméables.  
Mise en évidence d'une poche de produit dense en phase (perchloréthylène) au contact entre aquifère et substratum.  
Excavation des sources, puis pompage-traitement.  
Opération en cours. Coûts et durées estimés mais données non définitives.  
Informations fournies par la Sté IWACO, Rotterdam.
- IV Région de Den Bosch (Pays-Bas) 23  
Contamination issue d'un atelier de mécanique. Mélange de produits chlorés.  
Terrain sableux aquifère entre 6 et 24 m de profondeur, sous niveau tourbeux et argileux.  
Combinaison pompage-traitement et extraction sous-vide sous faible depression et faible débit.  
Informations fournies par la Sté IWACO, Rotterdam.
- V Battle Creek (Etats Unis - Michigan) 31  
Contamination issue d'un atelier de régénération de solvants. Mélange de produits chlorés et d'hydrocarbures volatils.  
Pompage-traitement, puis ventilation de la zone non-saturée, puis finition par sparging à l'Azote.  
Informations fournies par les Stés Géovac et CH2M-Hill.

VI	<b>Berlin (RFA)</b> Contamination par solvants chlorés (111 TCA, DCM, <b>PCE</b> ). Aquifère confiné superficiel, épais de 6m (sables fins), sur substratum marneux imperméable. Procédé UVB (un puits). Informations fournies par l'Université de Karlsruhe.	4 2
VII	France, <b>Vallée</b> du Rhône Contamination massive par produits halogénés (111 TCA, trichlorofluorométhane) et par tensb-actifs. Pompage de confinement, puis traitement par <b>bio-réacteur</b> avec adjctbn de <b>bactéries</b> sélectionnées, puis réinjectbn. Informations fournies par la Sté SERPOL.	51
VIII	Zone urbaine en France Contamination par carburants issue d'une station-service. Ecoulements <b>préférentiels</b> à la faveur douvrages souterrains (galeries de <b>métro</b> , paroi <b>moulée</b> ). Captage de l'eau contaminée, traitement en surface, <b>décontamination</b> du non sature par ventilation forcée. Informations fournies par la Ste Pollution Service.	6 0
IX	Traverse City (US-Michigan) - Opération <b>pilote</b> Contamination par <b>carburant</b> d'aviation (JP 4) et produits chlorés (PCE, TCE, <b>DCE</b> ) : hydrocarbures flottants formant une galette sur la nappe, et panache de produits chlorés dissous. Stimulatiin de la <b>biodégradation</b> : - aérobie par injection de <b>péroxyde</b> d'hydrogène, pour activer la <b>biodégradation</b> aérobie des BTEX et des produits les moins chlores ; - <b>anaérobie</b> par injection d'acides gras. <b>Informations</b> fournies par <b>l'EPA</b> .	6 7

## SECONDE PARTIE : FICHES D'OPERATION RESUMEES

i	France, <b>région</b> Lorraine Fuite de carburant sur une station-service - Produit fbtant t diius. Alluvions de la Moselle. <b>Biocatalisation</b> . <b>Informations</b> fournies par la Sté Burgéap et l'Institut français du <b>Pétrole</b> .	70
ii	France, <b>vallée</b> du Rhône Fuite <b>de carburant</b> sur une station-service - Produit diius. Alluvions du <b>Rhône</b> . <b>Pompage + stripping</b> . <b>Informations</b> fournies par la <b>Sté Burgéap</b> .	<b>76</b>

iii	France, vallée du Rhône Très importante fuite de carburant sur une station-service • Produit dissous. Alluvions du Rhône. Pompage de protection et rejet au Rhône. Informations fournies par la BtÉ Burgéap.	85
iv	Pays-Bas Contamination par mélange de solvants chlorés issue d'un établissement de fabrication d'outillage métallique. Aquifère <b>semi-captif</b> dans niveau perméable de 20 m d'épaisseur sous niveau de 2 m d'argile et tourbe. Pompage - traitement pendant 4 ans sans baisse des concentrations. Reprise des investigations mettant en évidence une autre source passée initialement inaperçue. Informations fournies par la StÉ IWACO, Rotterdam.	91
v	France, plaine d'Alsace Contamination par <b>chlore-nitrobenzène</b> . Alluvions <b>sable-graveleuses</b> , nappe libre à 5 à 8 m de profondeur. Pompages de protection et de confinement, puis traitement sur charbon actif avec régénération. Informations fournies par l'Agence de <b>l'Eau</b> Rhin-Meuse.	94
vi	France, région P.A.C.A. Contamination par carburants issue d'une station service, problème de <b>sécurité</b> sur des travaux souterrains voisins. Alluvions et <b>colluvions</b> hétérogènes. Ecrémage et extraction des vapeurs. Informations fournies par la StÉ <b>ATE</b> .	99
vii	Troutman ( <b>US Caroline</b> du Nord) Contamination par hydrocarbures issue d'une station-service. Aquifère à 15 m de profondeur. Decontamination de la zone non-saturée par extraction des vapeurs du sd, puis mise en oeuvre d'un puits UVB. Informations fournies par l'Université de Karlsruhe.	105
viii	<b>Botrop-Oberhausen</b> (RFA, vallée du Rhin) Contamination par hydrocarbures aromatiques <b>mutiplex</b> (BTX et Polycycliques). Pompage-traitement. Traitement sur charbon actif, en vue d'obtenir des teneurs résiduelles très basses. Informations fournies par l'Université de Karlsruhe.	108
ix	Ruhr (RFA) Contamination par mélange complexe d'hydrocarbures aliphatiques et aromatiques ( <b>BTX</b> et <b>Polycycliques</b> ). Confinement par pompage et injection (doublet hydraulique). Traitement <b>in situ</b> par biolixiviation. Informations fournies par l'Université de Karlsruhe.	113