

# Caractérisation des lagunes à hydrocarbures

*Caractérisation des volumes et des masses hétérogènes stockées*





**ETUDE N° 05-0133/1A**

**CARACTERISATION DES LAGUNES A HYDROCARBURES**

**CARACTERISATION DES VOLUMES ET  
DES MASSES HETEROGENES STOCKEES**

**RAPPORT FINAL**

**juillet 2007**

**R. AVOCAT - SAUNIER & ASSOCIES  
C. BOULANGER - CGG VERITAS**

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 collégalement 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**, Caractérisation des lagunes à hydrocarbures - Caractérisation des volumes et des masses hétérogènes stockées, 2007, 110 p, n°05-0133/1A.
- ✓ 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, 2007

## RESUME DE L'ETUDE

L'étude proposée par RE.CO.R.D. est composée de deux parties distinctes : tout d'abord, une typologie des lagunes à hydrocarbures (Partie 1), ensuite, un inventaire des techniques géophysiques applicables en vue de la caractérisation des volumes et des masses hétérogènes déposées (Partie 2).

### **Définition**

Les lagunes à hydrocarbures sont définies, au sens de l'étude, comme étant des cavités naturelles ou artificielles creusées dans le sol, non équipées d'un fond étanche, d'une paroi latérale, d'une membrane ou de toute autre forme d'étanchéité.

### **Origines des lagunes à hydrocarbures**

Les origines des lagunes ont été regroupées en cinq catégories distinctes : 1) l'exploration et la production pétrolière ; 2) le raffinage des produits pétroliers ; 3) la pyrolyse de la houille ; 4) les accidents impliquant des hydrocarbures ; et, 5) les origines autres.

L'exploration et la production pétrolière ont pu être à l'origine de deux types de sites de lagunes chez les pays producteurs : les bourbiers (ou dépôt de boues de forage), et, les fosses de brûlage (« burn pits »). Aucun site de ces types n'est référencé par BASOL.

Le raffinage des produits pétroliers (raffinage sulfurique) a été à l'origine de nombreux sites référencés par BASOL. Ce mode de raffinage était destiné au traitement des coupes légères, des bases à essences, des huiles vierges lubrifiantes, des paraffines, ainsi qu'à la préparation des huiles blanches médicinales. Le procédé conventionnel de raffinage des huiles usées est aussi générateur de goudrons acides. Les goudrons acides générés par ces procédés ont pu être stockés dans le passé au sein de lagunes. BASOL référence dix sites de lagunes liés au raffinage sulfurique intéressant quatre raffineries ayant cessé leur activité, quatre raffineries en exploitation, ainsi que deux sites associés au raffinage des huiles usées.

La pyrolyse de la houille a pu générer des sites de lagunes à hydrocarbures (sont exclues du champ de cette étude, les anciennes usines à gaz car les goudrons y étaient stockés à l'intérieur de fosses bétonnées). BASOL référence six sites de lagunes issus de la pyrolyse de la houille, dont quatre sont liés à d'anciennes cokeries minières, un correspond à une cokerie sidérurgique aujourd'hui démantelée, et le dernier, a une ancienne usine de distillation de goudrons de houille.

Les accidents impliquant des hydrocarbures peuvent être à l'origine de lagunes à hydrocarbures. Concernant les accidents majeurs, ce sont les stockages intermédiaires effectués le long des côtes avant rapatriement des déchets (Amoco Cadiz, 1978 ; Tanio,

1980) qui auraient pu être à l'origine de lagunes au sens du sujet de l'étude. Aucun site de ce type n'est référencé par BASOL. Dans le cas des accidents mineurs intervenant sur les établissements en exploitation, deux sites appartenant à une raffinerie en exploitation sont référencés au sein de BASOL.

Les origines autres regroupent les sites de lagunes issus de fonctions diverses (lagune de déballastage des navires, lagune liée à des rejets d'hydrocarbures au sein du milieu naturel) ne pouvant être rattachées aux quatre origines précédentes. Au moins deux sites référencés par BASOL peuvent être incorporés au sein de cette catégorie.

### ***Caractéristiques des produits stockés et des phases présentes***

Les caractéristiques physico-chimiques des produits stockés au sein des lagunes dépendent des procédés sources, des paramètres d'exploitation, et des évolutions subies par les produits postérieurement à la mise en dépôt.

Les goudrons acides issus du raffinage sulfurique ont une viscosité élevée, une densité plus faible que celle des sols, et une couleur noire à marron. Ils dégagent une odeur « huileuse » typique des produits pétroliers, accompagnée d'une odeur acre générée par les émissions de dioxyde de soufre. Des vapeurs acides les accompagnent. Le pH des goudrons est très acide (< 2 en l'absence de neutralisation). On distingue plusieurs phases (organique, acide, eau, impuretés) dont l'importance de chacune varie de manière significative selon les contextes rencontrés d'une lagune à une autre, ainsi que selon les lentilles ou couches internes. Il a été distingué au niveau de la lagune de Lviv (Ukraine), une couche de base concentrant la fraction organique, une couche intermédiaire (aqueuse et acide) et une couche supérieure incorporant les hydrocarbures légers.

Les études de caractérisation des lagunes du Derbyshire au Royaume Uni mettent en évidence la présence de goudrons composés par des asphaltènes de poids moléculaires élevés mélangés à des hydrocarbures polaires et des coupes moyennes de distillation, des hydrocarbures saturés libres, ainsi que par une phase aqueuse riche en sulfates et très acide.

D'une manière plus générale, les principaux constituants à l'intérieur des dépôts sont les hydrocarbures aliphatiques, les hydrocarbures aromatiques, les phénols, les métaux, les acides, les hydrocarbures sulfonés et les gaz.

### ***Typologie des lagunes à hydrocarbures***

La typologie des sites de lagunes inventoriées est basée sur cinq critères appliqués au terme source : l'origine, le tonnage, la répartition, la nature et l'accessibilité. En fonction des caractéristiques propres de chaque lagune inventoriée, il est appliqué une note à chacun des critères selon une grille de lecture. Les critères correspondent à des informations communément disponibles au sein de la littérature et à des caractéristiques importantes des

sites de lagunes. Ils ont aussi de fortes implications en matière de diagnostic, et / ou, de réhabilitation. Enfin, les critères ont été choisis pour être suffisamment discriminants afin de pouvoir constituer la base de la typologie.

La typologie incorpore dix neuf sites de lagunes inventoriés pour lesquels les informations rassemblées sont suffisantes pour positionner chacun des sites en fonction des cinq critères. Parmi ces dix neuf sites, on recense dix sites localisés en France métropolitaine, un site en outremer, deux sites en Belgique, trois sites au Royaume Uni, un site en République Tchèque, un site en Ukraine, et un site au Canada. Une majorité des dix neuf sites (douze) est associée au raffinage des produits pétroliers, trois à la pyrolyse de la houille, et quatre, aux origines autres. Certains des sites de la typologie ont fait l'objet d'une réhabilitation ancienne (par stabilisation à la chaux par exemple) ou récente (selon des procédés impliquant une stabilisation par malaxage in-situ de la fraction non pompable) suivant les cas. La configuration incorporée à la typologie est celle du site réhabilité lorsque celle-ci est ancienne, ou antérieure à la réhabilitation, lorsque cette dernière est récente.

### ***Inventaire des techniques géophysiques applicables à la caractérisation des lagunes***

La partie géophysique de cette étude consiste en un inventaire des techniques géophysiques applicables à la caractérisation des volumes et des masses hétérogènes déposées. Ces travaux comportent :

- l'établissement d'un inventaire des méthodes géophysiques répondant aux problèmes posés et applicables dans l'environnement particulier des lagunes à hydrocarbures. Cet inventaire concerne aussi bien les méthodes mises en œuvre depuis la surface que celles appliquées à l'intérieur de forages. Il est concrétisé sous la forme de fiches (une fiche par méthode), où figurent : le principe de la méthode, les résultats obtenus, des informations techniques (paramètres étudiés, dispositif mis en œuvre, profondeur d'investigation), les contraintes de mise en œuvre (en général et dans le contexte particulier des lagunes à hydrocarbures), les applications de la méthode, et enfin des données pratiques (par exemple relatives aux coûts de mise en œuvre).
- Un tableau de synthèse de toutes les méthodes présentées, donnant une vue d'ensemble du potentiel, des avantages et des limitations de chaque méthode.
- La présentation de deux exemples concrets d'études de site, mettant en avant l'intérêt de conjuguer les méthodes pour améliorer la caractérisation.
- Un tableau synoptique d'adéquation des méthodes géophysiques, fondé sur le questionnaire établi en début de projet et basé sur la typologie, avec pour objectif d'accompagner la prise de décision le choix des méthodes à appliquer dans un contexte donné.

## **EXECUTIVE SUMMARY**

This study proposed by RE.CO.R.D. is organized in 2 distinct parts : first, a typology of hydrocarbons lagunas (Part 1), followed by an inventory of the geophysical techniques that can be applied to the characterization of the volumes and deposited heterogeneous masses (Part 2).

Hydrocarbons lagunas are defined, in this study, as natural or artificial superficial cavities, deprived of watertight bottom, and of any lateral watertight wall or membrane.

The laguna's origins have been regrouped in five distinct categories: 1) oil exploration and production; 2) oil refining; 3) coal pyrolysis; 4) accidents implying hydrocarbons; and 5) other origins.

Oil exploration and production could have been the origin of two types of lagunas sites in producing countries: bogs (or drilling mud deposits) and burn pits. There is no site of this type referenced by BASOL.

Oil refining (sulfuric refining) has been the origin of many sites referenced by BASOL. Sulfuric refining was destined to the processing of light cuts, petrol bases, lubricating pure oils, of paraffins and for the preparation of white medicinal oils. It has generated acid tars that have been stocked inside the lagunas. Acid tars can also be generated by the conventional re-refining process of used oils. BASOL references 10 sites which lagunas are tied to oil refining, concerning 4 closed and 4 operating refineries, as well as 2 sites associated to used oils refining.

Coal pyrolysis might have generated hydrocarbons lagunas sites (old gas factories are excluded from this study, since tars were stocked inside cemented pits). BASOL references six lagunas sites deriving from coal pyrolysis, for being linked to old mining cokeworks, one to a dismantled steel industry cokework, and one to a former coal tars distillation factory.

Accidents implying hydrocarbons can be the origin of hydrocarbons lagunas. Concerning major accidents, it is the temporary stocks of waste deployed along the coast before their repatriation in the case of the Amoco Cadiz (1978) and of the Tanio (1980), that could have been the origin of lagunas in the sense of this study's subject. No site of this type is referenced by BASOL. In the case of minor accidents taking place on exploitation locations, two sites related to a refinery are referenced inside BASOL.

The other origins regroup sites concerning various functions (ships' tank purges, hydrocarbons accumulations in the environment) that cannot be related to the four precedent categories. At least two sites among the BASOL reference are concerned by this 5<sup>th</sup> category.

The physical chemistry of products stocked inside lagunas depends on the source processes, of the exploitation parameters and on the evolutions of the products after their deposit.

Acid tars coming from oil refining present a high viscosity, a lower density compared to the mean soil density, and a brown to black range of coloration. They emit an “oily” smell, typical of oil products, accompanied by an acrid smell linked to sulfur dioxide. They are also accompanied by acid vapors. The pH of these tars is very acid (<2 in absence of neutralization). Several phases (organic, acid, water, impurities), which preponderance varies significantly with the context, and with the organization of the lenses or layers inside a given laguna, can be distinguished. The Lviv laguna (Ukraine) shows a basal layer which concentrates the organic fraction, an intermediary layer (acid and aqueous), and an upper layer incorporating the lighter hydrocarbons.

The characterization studies on the Derbyshire’s lagunas, in the United Kingdom, show the presence of tars composed by asphalt derivatives of high molecular weights, mixed with polar hydrocarbons and middle distillation cuts, free saturated hydrocarbons, as well as a very acid, sulphates-rich aqueous phase.

In a more general approach, the main represented families are aliphatic hydrocarbons, organic hydrocarbons, phenols, metals, acids, sulfonated hydrocarbons and gases.

The inventoried lagunas sites’ typology is based on five criteria applied to the source term: the origin, tonnage, repartition, nature and accessibility. Depending on the characteristics specific to each inventoried laguna, a mark is applied to each criterion according to a lecture grid. The criteria correspond to information commonly available in the literature, to important characteristics having a strong implication in the diagnostic and rehabilitation phases. Finally, the criteria have been chosen sufficiently discriminating for the constitution of the typology’s bases.

The typology incorporates nineteen inventoried lagunas sites, for which the gathered information is generally sufficient to position them according to the five criteria of the lecture grid. Among these nineteen sites, ten are localized in metropolitan France, one in overseas France, two sites in Belgium, three in the United Kingdom, one in the Czech Republic, one in Ukraine, and one in Canada. A majority of these nineteen sites (twelve) are associated with oil refining, three with coal pyrolysis, and four to other origins. Some of the typology’s sites have been rehabilitated anciently (by lime stabilization) or recently (stabilization by in-situ working up of the fraction than cannot be pumped). The configuration, taken into account in the typology, is the one from the rehabilitated site when it is ancient, or anterior to the rehabilitation, when recent.

The geophysical section of this study consists in an evaluation of the geophysical techniques applicable to the characterization of the volumes and of the deposited heterogeneous masses. The content of this work is presented as follows:

- An inventory of the geophysical methods able to respond to the posed problems, and applicable in the particular environment of the hydrocarbons lagunas. This inventory concerns as much methods deployed from the ground surface than borehole methods. It is presented in the form of cards (one card by method) containing the following information: the method's main principles, the expected results, technical details (studied parameters, equipment, investigation depth), impositions on the application (in general and in the specific context of hydrocarbons lagunas), the different applications, and finally practical information related to the method's cost.
- A chart synthesizing all the presented methods, providing a quick overview of the potentials, strengths and limitations of each method.
- The presentation of two concrete studies examples, highlighting the multi-methods approach to enhance the characterization's quality.
- A synoptic adequacy table of the geophysical methods applied in the context of hydrocarbons lagunas, based on a questionnaire established at the beginning of the project, and based on its typology. The goal of this chart is to provide decision help in the selection of the geophysical methods to apply in a given context.

## Sommaire

<b>1 - INTRODUCTION.....</b>	<b>11</b>
1.1 – NATURE DU PROJET D’ETUDE.....	11
1.2 – OBJECTIFS.....	11
1.3 – DEFINITION DES LAGUNES A HYDROCARBURES.....	11
1.4 – PERIMETRE DU PROJET D’ETUDE.....	11
<b>2 - METHODOLOGIE APPLIQUEE A L’ELABORATION DE LA TYPOLOGIE.....</b>	<b>12</b>
2.1 – ETAPE 1 : PREPARATION.....	12
2.2 – ETAPE 2 : COLLECTE ET TRAITEMENT DES DONNEES RASSEMBLEES.....	12
2.3 – ETAPE 3 : SYNTHESE ET ELABORATION DU PROJET DE TYPOLOGIE.....	13
2.4 – ETAPE 4 : VALIDATION DE LA TYPOLOGIE.....	13
<b>3 – ORIGINES DES LAGUNES A HYDROCARBURES.....</b>	<b>14</b>
3.1 – INTRODUCTION.....	14
3.2 – SITUATIONS RENCONTREES.....	14
3.2.1 – EXPLORATION ET PRODUCTION PETROLIERE.....	14
3.2.2 – RAFFINAGE DES PRODUITS PETROLIERS.....	16
3.2.2.1 – Procédés générateurs de goudrons acides.....	16
3.2.2.2 – Sites liés aux raffineries de pétrole brut référencés au sein de BASOL.....	18
3.2.2.3 – Sites liés au re raffinage des huiles usagées référencés au sein de BASOL.....	21
3.2.2.4 – Sites référencés au sein de BASOL liés à la préparation des huiles blanches médicinales.....	21
3.2.3 – PYROLYSE DE LA HOUILLE.....	22
3.2.3.1 – Procédés générateurs de goudrons acides.....	22
3.2.3.2 – Sites référencés au sein de BASOL.....	22
3.2.4 – ACCIDENTS IMPLIQUANT DES HYDROCARBURES.....	24
3.2.4.1 – Accidents majeurs et autres accidents.....	24
3.2.4.2 – Procédés à l’origine des lagunes à hydrocarbures.....	24
3.2.4.3 – Sites référencés au sein de BASOL.....	24
3.2.5 – ORIGINES AUTRES.....	25
3.2.5.1 – Procédés générateurs de lagunes à hydrocarbures.....	25
3.2.5.2 – Sites référencés au sein de BASOL.....	25
<b>4 – CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES PRODUITS STOCKES.....</b>	<b>26</b>
4.1 – EXPLORATION ET PRODUCTION DE PETROLIERE.....	26
4.2 – RAFFINAGE DES PRODUITS PETROLIERS.....	26
4.2.1 – GENERALITES.....	26
4.2.2 – ASPECTS PHYSIQUES DES GOUDRONS ACIDES.....	27
4.2.2.1 – Viscosité.....	27
4.2.2.2 – Couleur.....	27
4.2.2.3 – Odeur.....	27
4.2.2.4 – pH.....	27
4.2.3 – DIFFERENTES PHASES PRESENTES AU SEIN DES LAGUNES.....	28
4.2.4 – COMPOSITION CHIMIQUES DES GOUDRONS ACIDES.....	30
4.2.5 – CODES DECHETS.....	30
4.3 – PYROLYSE DE LA HOUILLE.....	30
4.4 – ACCIDENTS IMPLIQUANT DES HYDROCARBURES.....	31
4.5 – AUTRES ORIGINES.....	31

<b>5 – TYPOLOGIE DES LAGUNES INVENTORIEES .....</b>	<b>32</b>
<b>5.1 – IDENTIFICATION DES SITES DE LAGUNES .....</b>	<b>32</b>
<b>5.2 – PRESENTATION DE LA GRILLE DE LECTURE .....</b>	<b>32</b>
5.2.1 – CHOIX DES CRITERES .....	33
5.2.1.1 – <i>Justification du choix des critères</i> .....	33
5.2.1.2 – <i>Présentation des critères</i> .....	33
5.2.1.3 – <i>Application des critères</i> .....	34
5.2.1.4 – <i>Cas des sites ayant fait l'objet d'une réhabilitation</i> .....	34
5.2.2 – PRESENTATION DE LA GRILLE DE LECTURE .....	34
5.2.2.1 – <i>Origine du terme source</i> .....	34
5.2.2.2 – <i>Estimation du terme source</i> .....	34
5.2.2.3 – <i>Répartition du terme source</i> .....	35
5.2.2.4 – <i>Nature du terme source</i> .....	35
5.2.2.5 – <i>Accessibilité du terme source</i> .....	36
<b>5.3 – PRESENTATION DE LA TYPOLOGIE .....</b>	<b>37</b>
5.3.1 – RAFFINAGE DES PRODUITS PETROLIERS .....	38
5.3.2 – PYROLYSE DE LA HOUILLE .....	49
5.3.3 – ORIGINES AUTRES .....	52
<b>5.4 – SYNTHESE.....</b>	<b>57</b>
<b>6 – LIMITES DE LA TYPOLOGIE.....</b>	<b>58</b>
<b>7 – SUJET D'ETUDE PROPOSE A LA SUITE DES PARTIES 1 ET 2.....</b>	<b>58</b>
<b>8 – REVUE DES METHODES GEOPHYSIQUES APPLICABLES A LA CARACTERISATION DES LAGUNES A HYDROCARBURES.....</b>	<b>59</b>
<b>8.1 – FICHES DE SYNTHESE DES METHODES GEOPHYSIQUES APPLICABLES A LA CARACTERISATION DES LAGUNES A HYDROCARBURES.....</b>	<b>59</b>
8.1.1 – PRESENTATION DES FICHES .....	59
8.1.2 – CONTRAINTES HSE (HYGIENE, SECURITE, ENVIRONNEMENT).....	59
8.1.2.1 – <i>Contraintes liées à l'environnement et aux conditions d'accès aux lagunes.</i> .....	60
8.1.2.2 – <i>Contraintes liées à la présence de composés chimiques nocifs à la santé.</i> .....	60
8.1.2.3 – <i>Contraintes intrinsèques à la mise en œuvre des méthodes géophysiques.</i> .....	60
8.1.3 – INFLUENCE DE LA MAILLE DE MESURE (ESPACEMENT ENTRE POINTS OU PROFILS DE MESURES).....	61
8.1.4 – COUTS .....	61
8.1.5 – AUTRES REMARQUES CONCERNANT LA MISE EN ŒUVRE DES METHODES GEOPHYSIQUES.....	62
8.1.6 – FICHES DE SYNTHESE .....	62
<b>8.2 – TABLEAUX DE SYNTHESE DES METHODES GEOPHYSIQUES APPLICABLES A LA CARACTERISATION DES LAGUNES A HYDROCARBURES.....</b>	<b>77</b>
<b>8.3 – FICHES D'EXEMPLES D'ETUDES GEOPHYSIQUES APPLIQUEES A LA CARACTERISATION DES LAGUNES A HYDROCARBURES .....</b>	<b>78</b>
8.3.1 – INTRODUCTION AUX FICHES D'EXEMPLES .....	78
8.3.2 – FICHES D'EXEMPLE .....	78
8.3.3 – COMMENTAIRES ET CONCLUSIONS SUR LES FICHES D'EXEMPLE .....	82
- <b>8.4 – TABLEAU SYNOPTIQUE D'ADEQUATION DES METHODES GEOPHYSIQUES A LA CARACTERISATION DES LAGUNES A HYDROCARBURES.....</b>	<b>84</b>
<b>9 – CONCLUSIONS.....</b>	<b>90</b>

## Liste des Tableaux

- Tableau-3.1 : Sites de lagunes à hydrocarbures associés au raffinage des produits pétroliers
- Tableau-3.2 : Sites de lagunes à hydrocarbures associés au re raffinage des huiles usées
- Tableau-3.3 : Sites de lagunes à hydrocarbures associés à la pyrolyse de la houille
- Tableau-3.4 : Sites de lagunes à hydrocarbures associés à des accidents impliquant des hydrocarbures
- Tableau-3.5 : Sites de lagunes à hydrocarbures associées à des origines autres
- Tableau-4.1 : Estimation des différentes phases composant les goudrons acides des lagunes de Lviv en Ukraine (couche de base)
- Tableau-4.2 : Estimation moyenne des différentes phases composant les goudrons acides de site de lagunes de Digboi en Inde
- Tableau-4.3 : Composés chimiques susceptibles d'être présents dans les goudrons acides (raffinage de houille)
- Tableau-5.1 : Critères sélectionnés en vue de l'élaboration de la typologie
- Tableau-5.2 : pH des goudrons acides du site E
- Tableau-5.3 : Concentrations en soufre total au sein des goudrons acides du site E
- Tableau-5.4 : Principaux paramètres organiques des goudrons acides du site E
- Tableau-5.5 : pH des goudrons acides du site G
- Tableau-5.6 : Concentrations en soufre au sein des goudrons acides du site G
- Tableau-5.7 : Principaux paramètres organiques des goudrons acides du site G
- Tableau-5.8 : Synthèse de la typologie des sites inventoriés

## Liste des Figures

- Figure-1.1 : Logigramme détaillant les principales étapes de la méthodologie suivie
- Figure-3.1 : Fosse de brûlage (vue aérienne)
- Figure-4.1 : Aspects physiques des goudrons acides
- Figure-5.1 : Site B (Royaume Uni)
- Figure-5.2 : Site de Frydek - Mistek (République Tchèque)
- Figure-5.3 : Lagune de Sydney (Nouvelle Ecosse, Canada)
- Figure-5.4 : Lagune du site J (Belgique)
- Figure-5.5 : Graisses flottant sur les déchets de fuel (Lagune de Chatequeue, Belgique)
- Figure-5.6 : Lagune de Brest (France)

## **1 - Introduction**

### **1.1 – Nature du projet d'étude**

Le projet d'étude comprend 3 parties :

- partie 1 – Typologie des lagunes à hydrocarbures existantes sur le plan national et européen, dans une perspective de caractérisation des volumes et des masses hétérogènes déposées ;
- partie 2 – Réalisation d'un état de l'art international sur les techniques et protocoles disponibles pour la caractérisation des volumes et des masses hétérogènes déposées ;
- partie 3 – Proposition d'une méthodologie de caractérisation des volumes et des masses hétérogènes stockés adaptée pour chaque type de lagune identifiée.

Le rapport provisoire est associé à la réalisation des parties 1 et 2, la partie 3 étant à ce stade prévisionnelle et liée à une phase d'étude à suivre.

### **1.2 – Objectifs**

Les objectifs du projet d'étude sont :

- de réaliser d'un inventaire des principales lagunes connues en France et en Europe permettant la constitution d'une base de travail applicable à l'étude (parties 1 à 3) ;
- de regrouper les connaissances d'expertises spécifiques sur le sujet (partie 2) ;
- de préparer une méthodologie de caractérisation originale applicable par les industriels et les ingénieries / bureaux d'études (partie 3) ;
- d'identifier et de proposer à RE.CO.R.D des axes de développement de cette méthodologie.

### **1.3 – Définition des lagunes à hydrocarbures**

Les lagunes à hydrocarbures sont définies comme étant des cavités naturelles ou artificielles creusées dans le sol, non équipées d'un fond étanche, d'une paroi latérale, d'une membrane ou toute autre forme d'étanchéité volontaire.

### **1.4 – Périmètre du projet d'étude**

Le projet d'étude défini ci avant n'incorpore pas les décharges internes contenant en majorité d'autres produits que les hydrocarbures. Dans le cas du projet, le terme source se distingue par la présence d'hydrocarbures en quantité significative, même si d'autres catégories de déchets peuvent y être associées.

Il intègre une ouverture européenne. Celle-ci se traduit par la recherche de lagunes singulières présentes dans les différents pays européens qui ne seraient pas représentées en France. Le projet d'étude n'a ainsi pas pour objet de réaliser un inventaire exhaustif des lagunes au niveau européen.

## **2 - Méthodologie appliquée à l'élaboration de la typologie**

### **2.1 – Etape 1 : Préparation**

L'étape de préparation comprend :

- la sélection des critères en vue de l'élaboration de la typologie en intégrant les contraintes et opportunités des méthodes de caractérisation dont la géophysique de sub surface ;
- l'élaboration du questionnaire « lagunes » pour présentation et validation par le Comité de scientifique de RE.CO.R.D ;
- l'envoi du questionnaire aux compagnies pétrolières sollicitées (Total, BP France, TexacoChevron, British Gas) ainsi qu'aux sociétés de services ;
- la recherche d'informations disponibles au sein des bases de données (BASOL, BASIAS, IFP, British Library ; TUDelft), des organismes scientifiques (BRGM, IFP, CNRSSP), et des sociétés de services (LESUISSE Dépol) ;
- la sollicitation de sociétés ayant été impliquées dans la gestion de goudrons acides ;
- l'élaboration des grilles destinées à la lecture des informations rassemblées.

Certaines des sociétés sollicitées n'ont pu répondre positivement à notre demande.

Le questionnaire « lagunes » est présenté en Annexe-2.1.

### **2.2 – Etape 2 : Collecte et traitement des données rassemblées**

L'étape de collecte et traitement des données intéresse :

- les articles techniques et scientifiques rassemblés à partir des bases de données interrogées ;
- les documents directement réceptionnés (BP France) ;
- les informations collectées lors des entretiens réalisés (IFP, CNRSSP, LESUISSE Dépol).

Elle aboutit à la sélection des sites de lagunes pour lesquels les données disponibles sont suffisamment détaillées pour être incorporées dans le projet de typologie.

L'incorporation des sites de lagunes s'effectue grâce à la grille de lecture élaborée à cet objet en intégrant 5 critères discriminants. L'analyse de l'ensemble des données disponibles vient ensuite compléter la lecture issue des grilles.

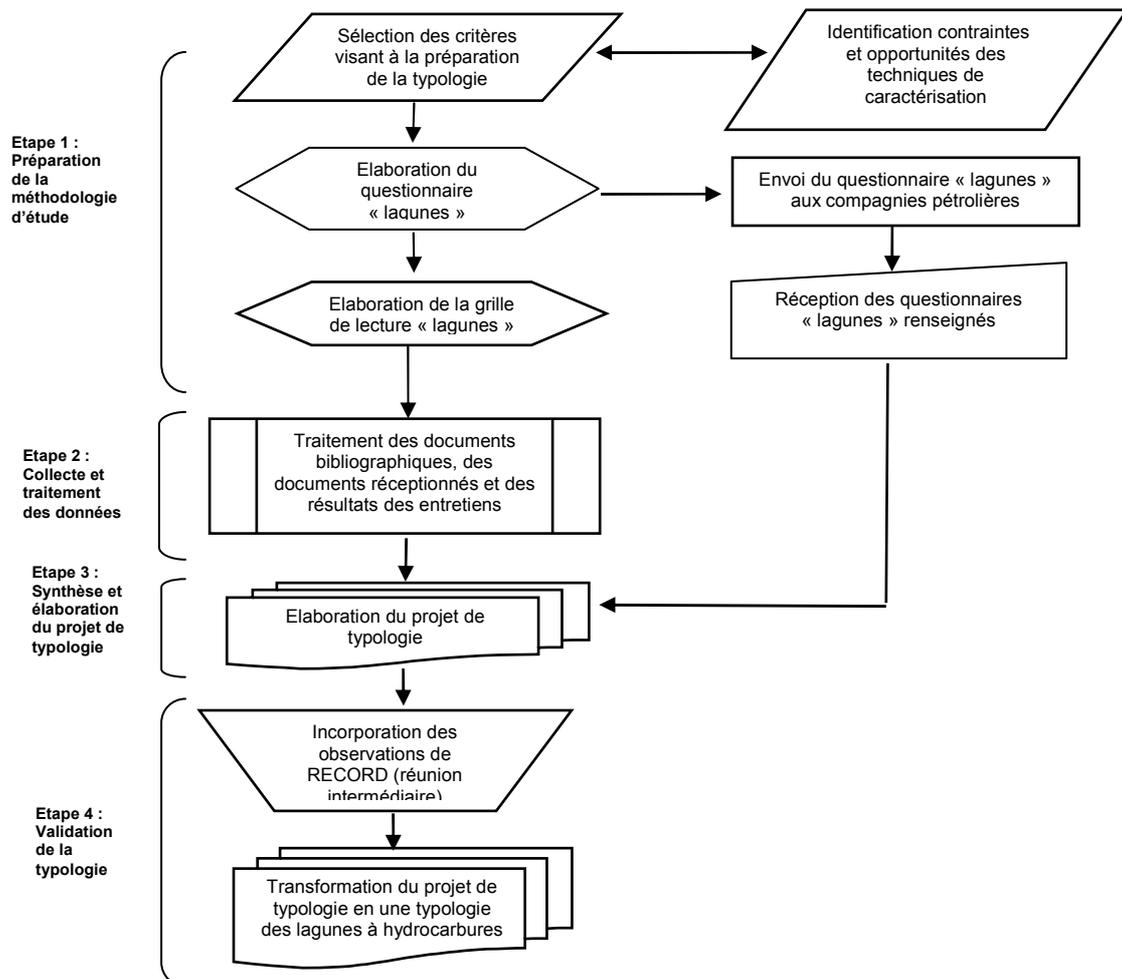
### 2.3 – Etape 3 : Synthèse et élaboration du projet de typologie

Lors de l'étape de synthèse et d'élaboration du projet de typologie, les données issues des questionnaires renseignés viennent compléter les informations issues de l'application des grilles de lecture. Elle aboutit à l'élaboration du projet de typologie soumis à RECORD lors de la réunion intermédiaire.

### 2.4 – Etape 4 : Validation de la typologie

La réunion intermédiaire permet la validation du projet grâce aux remarques formulées par le Comité scientifique de RECORD. A la suite de cette réunion, le projet de typologie est transformé en une typologie des lagunes à hydrocarbures. La Figure-1.1 présente les quatre étapes ayant conduit à l'élaboration de la typologie.

Figure-1.1 : Logigramme détaillant les principales étapes de la méthodologie suivie



## 3 – Origines des lagunes à hydrocarbures

### 3.1 – Introduction

Les lagunes à hydrocarbures ont des origines diverses.

Selon ces dernières, elles peuvent être regroupées en 5 catégories :

- l'exploration et la production pétrolière ;
- le raffinage des produits pétroliers ;
- la pyrolyse de la houille ;
- les accidents impliquant des hydrocarbures ;
- les origines autres.

Les origines autres sont définies par défaut : il s'agit des sites dont l'origine ne peut être rattachée aux quatre premières activités.

Les sites incorporant des lagunes à hydrocarbures connues amenant une action des pouvoirs publics sont référencés au sein de BASOL (Annexe-3.1).

On recense potentiellement 22 sites en France métropolitaine et 3 sites en Outremer pour lesquels la présence de goudrons est documentée ou possible, et dont la configuration peut être rattachée aux lagunes à hydrocarbures telles que définies par le projet d'étude.

Les sites peuvent être rattachés aux origines précitées à l'exclusion de l'exploration et de la production pétrolière pour laquelle aucun site n'est répertorié.

Cette dernière a néanmoins été incorporée au sein de l'étude car des sites lagunes à hydrocarbures peuvent lui être associés, notamment chez les pays producteurs significatifs.

### 3.2 – Situations rencontrées

#### 3.2.1 – Exploration et production pétrolière

Deux types de dépôts liés aux activités d'exploration et production pétrolière s'apparentent à des lagunes à hydrocarbures.

On distingue :

- les dépôts de boues de forage ou bourbiers ;
- les fosses de brûlage (« burn pits »).

→ Bourbiers

La création d'un bourbier préalablement aux opérations de forage répond à plusieurs nécessités :

- la récupération et le stockage temporaire des déchets solides (« cuttings ») provenant de l'exécution du forage ;
- la récupération de l'écumage de la boue de forage associée aux déchets solides ;
- le stockage temporaire de la boue de forage avant tout changement de phase (ex : passage d'une boue salée à une boue à l'eau douce) ;
- le stockage temporaire des résidus liquides non pétroliers lors des essais de production (eau de la formation géologique), les résidus pétroliers pouvant être détruits dans une fosse de brûlage (« burn pit »).

Les bourbiers sont aujourd'hui équipés d'une bâche d'étanchéité et d'un déshuileur après la surverse. Les résidus sont ensuite récupérés par pompage à partir de camions sous vide et dirigés vers des décharges autorisées. Ce processus implique une ségrégation organisée des rejets au niveau du chantier de forage. Dans le passé, les bourbiers étaient débarrassés de la phase liquide par infiltration dans les sols puis remblayés par une couche de matériaux terrigènes.

Les boues de forage qui y étaient stockées étaient élaborées à base d'eau, à base d'huiles ou à base d'eau et d'agents moussants.

Les boues à base d'eau étaient de plusieurs types (eau douce et eau salée) :

- bentonitique simple ;
- bentonitique aux extraits tannants ;
- bentonitique au lignosulfonate de fer et de chrome ;
- au gypse ;
- salé saturé aux amincissants minéraux (chlorure de sodium, chaux) ;
- salé saturé aux amincissants organiques (chlorure de sodium) ;
- émulsionné avec 5 à 10% d'huile ;
- à l'eau de mer ;
- aux biopolymères CMC (carbométhylcellulose).

Les boues à base d'huile étaient principalement élaborées avec du gazole ou de l'huile asphaltique (95 à 98%). Elles présentaient de multiples avantages lors des opérations de forage (réduction de l'invasion des formations productrices, diminution des perturbations sur les diagaphies) et offraient un coût moins élevé qu'aujourd'hui.

Leurs évacuations étaient en général effectuées au moyen d'unités sous vide avant d'être dirigées vers des décharges autorisées ou brûlées sous pression dans les « burn pits ». Elles ont pu aussi générer des lagunes à hydrocarbures.

Les boues à base d'eau et d'agents moussants concernent les forages dits à la « mousse et aux boues aérées ». Leurs caractéristiques physico-chimiques sont voisines de celles des boues à base d'huile.

→ « Burn pits »

Les « burn pits » sont utilisés pour détruire les résidus pétroliers ou para pétroliers. Ils sont généralement installés au sein d'excavations où aboutissent une ou plusieurs conduites noyées dans du béton réfractaire. Les excavations sont recouvertes par un lit de graviers. Les effluents liquides (pétrole, émulsion eau et pétrole) sont injectés sous pression et brûlés en sortie. Certains « burn pits » comprennent aussi des torchères permettant, après séparation des phases, d'incinérer les composés gazeux.

Dans le passé, les « burn pits » étaient mis en place au sein de simples excavations.

Ce type d'installation peut être présent sur les sites d'exploration et production pétrolière (Figure-3.1) ainsi qu'au sein des usines de raffinage.

Figure-3.1 : Fosse de brûlage (vue aérienne)



### 3.2.2 – Raffinage des produits pétroliers

#### 3.2.2.1 – Procédés générateurs de goudrons acides

Le raffinage sulfurique a été à l'origine de nombreuses lagunes à hydrocarbures. Il a concerné le traitement de finition des coupes légères (solvants) et des bases à essences, le

traitement des huiles vierges lubrifiantes et des paraffines, ainsi que la préparation des huiles blanches médicinales. Sur un même site de raffinerie, on a pu rencontrer ces différentes productions selon les installations présentes et leurs évolutions. Le raffinage sulfurique est aussi utilisé pour le re traitement des huiles usées.

→ *Solvants et bases à essences*

Le traitement à l'acide des solvants et des bases à essences avait pour objet l'élimination des composés soufrés et des composés azotés. Il permettait d'abaisser la teneur en soufre et d'ajuster la teneur en benzène de ces deux catégories de produits. La séparation des goudrons acides se faisait par simple décantation. Le raffinage acide n'est plus utilisé pour la production des bases essences depuis la fin des années 1950. Il est restreint à la production des solvants (« produits blancs »).

→ *Huiles vierges lubrifiantes*

Le traitement à l'acide sulfurique des huiles vierges lubrifiantes permettait l'obtention d'une couleur stable et acceptable, l'élimination des composés oxygénés, des résines et des traces d'asphalte, la suppression des odeurs, ainsi que l'obtention d'une qualité isolante adéquate pour les huiles destinées aux équipements électriques. Il était complété par un traitement à la chaux et à la terre absorbante destiné à capter les goudrons non décantés et à neutraliser l'acidité résiduelle. La séparation des goudrons acides se faisait par simple décantation. Aujourd'hui, le traitement à l'acide est remplacé par l'hydrogénation catalytique.

→ *Paraffines*

Le traitement de finition des paraffines (paraffines raffinées) impliquait un traitement à l'acide sulfurique complété par une neutralisation à la chaux de l'acidité et un traitement à la terre. La séparation des goudrons acides se faisait par simple décantation. L'hydrogénation catalytique remplace aujourd'hui le traitement à l'acide.

→ *Huiles blanches médicinales*

Les huiles blanches médicinales sont des produits de haute pureté, sans soufre, ni composés aromatiques, pouvant être utilisés par les industries pharmaceutiques et alimentaires. Le procédé de fabrication par traitement à l'acide sulfurique, utilisé dans les années 1950, n'est pas documenté au sein de la littérature disponible. Cette dernière

rapporte néanmoins son exploitation par 2 sites français. Le traitement à l'acide pour la production d'huiles blanches médicinales est aussi remplacé aujourd'hui par l'hydrogénation catalytique.

→ *Huiles usées*

Le procédé conventionnel de raffinage des huiles usagées implique l'utilisation d'acide sulfurique et de terres après l'étape de déshydratation amont. L'acide sulfurique permet l'élimination des impuretés contenues dans les huiles usagées. Les terres sont ensuite utilisées pour adsorber les produits oxydés et soufrés.

Le traitement à l'acide et à la terre est à l'origine de la production de boues et terres usées déposées au sein de lagunes. Le procédé « Meinken » constitue un exemple de procédé conventionnel à l'origine de boues et de terres usées. Il est admis qu'il génère environ 170 kg de boues acides et 31 kg de terres usées par tonne d'huiles usées traitées.

Les procédés plus avancés sur le plan environnemental ont remplacé le traitement à l'acide par la distillation sous vide qui génère des résidus pouvant être valorisés comme bitumes.

#### *3.2.2.2 – Sites liés aux raffineries de pétrole brut référencés au sein de BASOL*

Au Royaume Uni, le total de la production de goudrons acides des 10 à 12 raffineries en activité au cours des années 50 a été évalué à environ 400000 tonnes sur la base d'une production moyenne estimée entre 8000 et 12000 t/an. Ce chiffre documente globalement la production de goudrons acides liée à la fabrication des produits blancs. Il ne détaille pas la part liée à chacune des productions (solvants, bases essences, etc.).

A ce rythme annuel moyen, la quantité stockée (300000 tonnes) à proximité de la raffinerie de Lviv en Ukraine représente environ 30 ans de production (le dépôt des goudrons acides à l'intérieur de lagunes a été stoppé en 1991).

Il n'existe pas d'évaluation similaire pour la France.

Les sites de lagunes référencés en France intéressent :

- 4 raffineries ayant cessé leur activité (Gerland à Corbehem, BP à Courchelettes, Société de Bourron à Bourron Marlotte, Okoil à Fourmies) ;
- 4 raffineries en activité (Total à Gonfreville l'Orcher, Esso à Notre Dame de Gravenchon, Mobil à Notre Dame de Gravenchon, Kalor de Geeraert & Matthys à Dunkerque, aujourd'hui BP).

L'usine d'Esso de la Mailleraye destinée à la fabrication d'huiles minérales est incorporée au sein de cette catégorie.

Le Tableau-3.1 présente la liste des sites référencés au sein de BASOL.

Tableau-3.1 : Sites de lagunes à hydrocarbures associés au raffinage des produits pétroliers

Raffinerie	Situation exploitation	Lagunes associées	Remarques
Corbehem (Gerland) (62)	Fermée et démantelée	Noyelles-sous-Bellonne (« Gerland ») BASOL n°21	
Corbehem (Gerland) (62)	Fermée et démantelée	Dury (« Gerland ») BASOL n°22	
Courchelettes (BP France) (59)	Fermée et démantelée	BASOL n°58	
Bourron (Société des Raffineries de Bourron) (77)	Fermée et démantelée	BASOL n°82	
Dunkerque (BP) (anciennement Geeraert & Matthys) (62)	En activité	Coudekerque Branche BASOL n°29	
Gonfreville l'Orcher (Total) (76)	En activité	Lagune n°1, BASOL n° 31 Lagune n°2	Non référencée
Notre Dame de Gravenchon (Esso) (76)	En activité	BASOL n°34	
Notre Dame de Gravenchon (Mobil) (76)	En activité	BASOL n°36	
Raffinerie Okoïl (Okoïl) (59)	Fermée et démantelée	Fourmies BASOL n°40	Déchets éliminés
Usine de la Mailleraye (Esso) (76)	Fermée et démantelée	Le Trait BASOL n°13	Traité

Lié aux anciennes installations de Gerland à Corbehem (62), Noyelles-sous-Bellonne est référencé pour une lagune de goudrons acides et terres souillées (13000 t) qui a fait l'objet d'une stabilisation en 1983. Sur le site de Corbehem, trois activités différentes se sont succédées (raffinerie, distillation de houille, puis pétrochimie) dont deux sont susceptibles d'avoir pu générer des goudrons sulfuriques. Cette lagune a été investiguée de manière détaillée et fait aujourd'hui l'objet d'un suivi piézométrique.

Proche de Noyelles-sous-Bellonne, Dury (62) est aussi identifié au sein de BASOL pour une lagune à goudrons acides et terres souillées provenant du site de Corbehem, mais de taille plus modeste (3500 t) que celle de Noyelles-sous-Bellonne. La lagune a fait l'objet d'une stabilisation en 1985. Cette lagune a depuis été investiguée de manière détaillée et fait aujourd'hui l'objet d'un suivi piézométrique.

L'ancienne raffinerie de Courchelettes (59), ayant subi des dommages de guerre répétés durant les deux derniers conflits mondiaux, est à l'origine d'un site de lagunes sur le périmètre de l'établissement. Celles-ci ont fait l'objet d'études détaillées. La fabrication d'huiles blanches médicinales sur ce site est rapportée par la littérature. Les goudrons n'ont pas fait l'objet d'un traitement particulier. Un suivi des eaux souterraines est actuellement en cours sur toute l'étendue du périmètre de l'ancienne raffinerie.

Le site de la Société des Raffineries de Bourron (77) aujourd'hui dissoute accueillait une lagune à goudrons acides d'une taille significative (25000 t de produits liquides ou visqueux) distante d'environ 1 km de l'établissement. Une partie des déchets a été traitée en station d'épuration et par incinération en 1985. Les goudrons ont été stabilisés in-situ avant 1987.

Le site de Couderque Branche (62) est référencé comme ayant été une décharge (surface : 800 m<sup>2</sup>) exploitée, entre autre, par la raffinerie Kalor (Geeraert & Matthys) de Dunkerque entre 1957 et 1977. La décharge contenait une quantité limitée des goudrons sulfuriques qui a fait l'objet d'une neutralisation à la chaux, puis d'un traitement biologique des terres souillées (4500 m<sup>3</sup>). Venu au droit de BP France, ce site a été par la suite entièrement réhabilité par excavation et traitement hors site.

La raffinerie de Gonfreville l'Orcher (Total) (76) dispose d'une lagune à goudrons (8000 m<sup>3</sup> de goudrons, 3000 m<sup>3</sup> de phase aqueuse) réhabilitée en 2002 et 2003. Une deuxième lagune, plus modeste en taille que la première (goudrons : 1618 m<sup>3</sup> de goudrons, sédiments contaminés : 1850 m<sup>3</sup>, phase aqueuse contaminée : 642 m<sup>3</sup>), a depuis été mise à jour à l'occasion de travaux (2004).

Une ancienne décharge contenant des déchets de terres de filtration est référencée sur le site de la raffinerie Esso à Notre Dame de Gravenchon (76). Les déchets liquides ont été extraits pour être incinérés en 1998. Les déchets solides ont été stabilisés in-situ à la chaux.

La raffinerie Mobil à Notre Dame de Gravenchon (76) stockait au sein d'une ancienne fosse des résidus d'hydrocarbures, des terres et des eaux souillées. La décharge a été réhabilitée entre 1980 et 1990 par enlèvement des déchets et traitement externe.

L'ancienne raffinerie d'huiles Okoil a été arrêtée en 1986. Le site (superficie : 2,35 ha) est référencé pour la présence de goudrons sulfuriques. BASOL ne présente pas d'informations plus détaillées en dehors du constat de l'élimination des déchets.

L'ancienne usine Esso à la Mailleraye (76) a stoppé son activité en 1974. Elle est référencée pour deux lagunes à goudrons acides. La première lagune a été neutralisée à la chaux. La deuxième lagune a été vidangée puis les déchets incinérés. Le site fait l'objet aujourd'hui d'un suivi piézométrique.

### 3.2.2.3 – Sites liés au re raffinage des huiles usagées référencés au sein de BASOL

La production de goudrons acides par la seule usine en fonctionnement au milieu des années 1980 au Royaume Uni était estimée à environ 500 t/an.

Deux sites en France apparaissent dans la littérature pour le re traitement des huiles usées : la Compagnie des Bases Lubrifiants à Lillebonne (76) et Solunor à Baisieux (59). Le premier est référencé au sein de BASOL pour la présence de goudrons sulfuriques, le deuxième pour la contamination des sols et des eaux souterraines seule (aucun dépôt n'y est rapporté). Un 3<sup>ème</sup> site, la décharge Lemahieu à Abscon (59), a été intégré dans cette catégorie bien que son origine ne soit pas précisée par la documentation rassemblée (Tableau-3.2).

Tableau-3.2 : Sites de lagunes à hydrocarbures associés au re raffinage des huiles usées

Raffinerie	Situation exploitation	Lagunes associées	Remarques
Terrain CBL jouxtant Eco huile (76)	Friche	Lillebonne BASOL n°43	
Décharge Lemahieu (59)	Friche	Abscon BASOL n°66	

Le terrain de la Compagnie des Bases Lubrifiantes (CBL) à Lillebonne (76) accueille environ 30000 m<sup>3</sup> de déchets industriels incluant des cendres, des mâchefers d'incinération, ainsi que des terres de filtration imprégnées d'huiles et des goudrons sulfuriques. Ces derniers sont liés aux anciennes activités de l'usine de régénération d'huiles usées exploitée par CBL. La friche occupe une surface de 1,1 ha. Elle fait l'objet d'un suivi des eaux souterraines (situation au 09/2003).

La décharge Lemahieu à Abscon (59) est une ancienne carrière de craie de taille modeste (surface : 800 m<sup>2</sup>) comblée par des ordures ménagères et des goudrons sulfuriques (2000 m<sup>3</sup>). Le site a été exploité par la société Liloil (re raffinage des huiles usées ?). Les goudrons sulfuriques y ont fait l'objet d'un traitement physico-chimique et d'un confinement en 1984.

Le site de Solunor à Baisieux (59) accueillait une usine de re raffinage d'huiles usées. Il est référencé au sein de BASOL (site numéro 16) pour une contamination des sols et de la nappe par les hydrocarbures et les solvants. La présence de goudrons sulfurique n'y est pas rapportée.

### 3.2.2.4 – Sites référencés au sein de BASOL liés à la préparation des huiles blanches médicinales

L'ancienne usine Esso à la Mailleraye (76), référencée au sein de BASOL, assurait aussi la fabrication d'huiles blanches médicinales.

### 3.2.3 – Pyrolyse de la houille

#### 3.2.3.1 – Procédés générateurs de goudrons acides

La pyrolyse de la houille (carbonisation, cokéfaction) produit des goudrons qui sont collectés par décantation à la sortie des fours à coke. Les goudrons sont associés à une phase aqueuse, du benzol et des composés azotés (ammonium). Ces derniers composés sont ensuite extraits par traitement à l'acide sulfurique. Un traitement secondaire permet finalement d'extraire les sous produits valorisables (huiles, braie, sulfate d'ammonium, hydrocarbures aromatiques volatils).

Le tonnage de goudrons bruts générés par une cokerie sidérurgique du Nord de la France a été évalué à 4000 t/an pour 100000 t/an de coke produit. A ce tonnage, il convient d'adjoindre 1100 t/an de sulfate d'ammonium et 400 t/an de benzol. Le tonnage de goudrons acides à entreposer y était ensuite réduit par distillation grâce à la production d'huiles et de braie.

Les goudrons étaient stockés à l'intérieur de fosses en béton ou déposés au niveau de dépressions topographiques pour constituer des lagunes à hydrocarbures. Pour un même établissement, la localisation des dépôts de goudrons a pu évoluer au cours de l'exploitation. Les différentes localisations ne sont généralement pas documentées.

Le paragraphe ci-après exclut le parc des anciennes usines à gaz qui produisait aussi des goudrons associés à des eaux ammoniacales, des composés cyanurés et des phénols.

#### 3.2.3.2 – Sites référencés au sein de BASOL

Les sites de lagunes à goudrons référencés correspondent à des installations aujourd'hui fermées et démantelées ou en cours de déconstruction (Tableau-3.3).

Tableau-3.3 : Sites de lagunes à hydrocarbures associés à la pyrolyse de la houille

Cokerie	Situation	Lagunes	Remarques
Cokerie de Gosnay (CdF) (62)	Fermée et démantelée	Friche Carbolux BASOL n°11	
Usine Société Chimique de Gerland (13)	Fermée et démantelée	BASOL n°12	
Cokerie de Drocourt (CdF) (62)	Fermée et démantelée	Terril 205 BASOL n°20	
Cokerie d'Auby (CdF) (59)	Fermée et démantelée	BASOL n°55	
Cokerie de SIM (Bail Industrie) (59)	Fermée et démantelée	BASOL n°63	
Cokerie de Lourches (CdF) (59)	Fermée et démantelée	BASOL n°70	

La présence de lagunes à goudrons et eaux phénolées (environ 5000 tonnes) a été diagnostiquée sur le site de l'ancienne cokerie de Gosnay (cokerie minière) (62). L'extraction des goudrons a depuis été effectuée. La cokerie fabriquait du « semi coke » composé par l'agglomération de produits issus du raffinage de la houille et de distillation.

Le site de l'ancienne Société Chimique de Gerland est situé à Port Saint Louis du Rhône (13), au niveau du lieu-dit « Malebarge », sur un ancien marais comblé, non loin du domaine maritime. Sa superficie totale est de 6 ha. Il a accueilli une ancienne usine de distillation de goudrons de houille, puis une unité de fabrication d'engrais. L'exploitation a été définitivement stoppée en 1962. Ce site a ensuite fait l'objet d'une réhabilitation en deux temps : tout d'abord par traitement in-situ et ex-situ en 1995, puis de 2002 à 2005, par neutralisation à la chaux et stockage en cellule de confinement sur place. Il fait actuellement l'objet de la mise en place de servitudes d'utilité publique visant à restreindre l'usage des terrains et de la nappe.

L'ancienne cokerie de Drocourt (cokerie minière) (62) a exploité des lagunes à goudrons sur un site d'environ 2 ha (« teruil 205 ») entre 1972 et 1981. Le volume de goudrons a été estimé à environ 15000 m<sup>3</sup>. Ces derniers ont depuis été évacués et traités en incinération (les opérations de réhabilitation sont aujourd'hui pratiquement achevées).

L'ancienne cokerie d'Auby (cokerie minière) (59) est actuellement en cours de réhabilitation. Il s'agit d'une friche industrielle (30 ha) sur laquelle est documenté un dépôt de goudrons de taille réduite (1600 m<sup>3</sup>). L'ensemble des superstructures a été démolit et les sols pollués soumis à traitement.

L'ancienne cokerie SIM (cokerie sidérurgique) (59) (superficie : environ 5 ha) à Monchecourt est référencée pour une mare de goudrons (environ 10000 m<sup>3</sup>) et une contamination de la nappe sous jacente par des composés azotés (ammonium), des phénols, des cyanures et des hydrocarbures aromatiques polycycliques. Un programme de travaux extensifs a été planifié en 2004 incluant l'enlèvement et le traitement externe des goudrons (incinération).

L'ancienne cokerie de Louches (cokerie minière) (59) a été exploitée par les Houillères entre 1850 et 1983. Des lagunes à goudrons accompagnées de composés phénoliques, de ferro et sulfocyanures y ont été inventoriées. L'élimination des déchets visibles et des terres polluées a été menée fin 1989. Le volume des déchets qui étaient présents n'est pas renseigné.

### 3.2.4 – Accidents impliquant des hydrocarbures

#### 3.2.4.1 – Accidents majeurs et autres accidents

Les accidents majeurs (Amoco Cadiz : 1978 ; Tanio : 1980 ; Erika : 1999 ; Prestige : 2002) ont potentiellement été à l'origine de dépôts d'hydrocarbures dont l'importance est liée aux fractions récupérées en mer ou le long des côtes. Des accidents de moindre importance sur les sites de raffinage ou de dépôts de produits pétroliers (carburants) peuvent aussi être à l'origine de lagunes à hydrocarbures avant qu'une solution de remise en état ne soit trouvée.

#### 3.2.4.2 – Procédés à l'origine des lagunes à hydrocarbures

Dans le cas de l'Amoco Cadiz, les produits ont été récupérés le long de la côte pour être entreposés au niveau de stockages intermédiaires localisés sur le territoire des communes avoisinantes. Un certain pourcentage des produits récupérés a ensuite été neutralisé à la chaux pour une ré utilisation comme remblais. Le reste des produits a été transporté sur le site du Port de Brest pour être stocké dans des fosses étanchées préparées à cet effet. Les produits y ont été neutralisés pour une ré utilisation éventuelle comme remblais.

La gestion des déchets du Tanio est similaire à celle de l'Amoco Cadiz.

En ce qui concerne l'Erika, les déchets récupérés ont été transportés des stockages intermédiaires vers la raffinerie de Donge où ils ont été traités par lavage grâce à l'utilisation d'une coupe pétrolière comme solvant.

Ce sont donc les stockages intermédiaires (Amoco Cadiz, Tanio) qui peuvent être à l'origine de lagunes à hydrocarbures au sens du sujet d'étude.

#### 3.2.4.3 – Sites référencés au sein de BASOL

Aucun référencement ne concerne des sites liés à des accidents majeurs.

Le Tableau-3.4 liste sites de lagunes associées à des accidents impliquant des hydrocarbures référencés au sein de BASOL.

Tableau-3.4 : Sites de lagunes à hydrocarbures associés à des accidents impliquant des hydrocarbures

Sites	Situation	Lagunes	Remarques
Raffinerie de Berre (Shell) (13)	En activité	Source J28 BASOL n°70	
Raffinerie de Berre (Shell) (13)	En activité	Source H20 BASOL n°70	

Deux sources de pollution par les hydrocarbures sont référencées sur le site de la Raffinerie de Berre (Shell). La source J28 (surface < 1 ha) a pour origine probable une fuite intervenue en 1996 sur un bac de stockage. La deuxième, la source H20 (surface comprise entre 1 et 10 ha) comprend un mélange d'hydrocarbures incluant du benzène. Son origine n'est pas renseignée.

### 3.2.5 – Origines autres

#### 3.2.5.1 – Procédés générateurs de lagunes à hydrocarbures

Nous avons placé dans cette catégorie les situations rencontrées qui n'étaient pas liées aux 4 origines précédentes (exploration et production pétrolière, raffinage des produits pétroliers, pyrolyse de la houille, accidents impliquant des hydrocarbures). Cette catégorie rassemble des sites ayant des fonctions diverses incluant les lagunes de déballastage des navires, les décharges externes, ou encore, des accumulations d'hydrocarbures au sein des sédiments de lagunes naturelles.

#### 3.2.5.2 – Sites référencés au sein de BASOL

Les sites de lagunes référencés au sein de BASOL sont listés ci-après (Tableau-3.5).

Tableau-3.5 : Sites de lagunes à hydrocarbures associées à des origines autres

Sites	Situation exploitation	Lagunes associées	Remarques
Station de déballastage de Brest (CCI) (29)	Fermée et site réhabilité	BASOL n°8	
Centrale thermique de Degrad des Cannes (EdF) (973)	Centrale en exploitation	BASOL n°1	

La lagune de déballastage de Brest (29) a été réhabilitée en 2005 par la CCI. Elle était en service depuis la fin des années 1970. Le site accueillait les déchets provenant du déballastage des navires (environ 23000 m<sup>3</sup> contenant jusqu'à 35% d'hydrocarbures) à quai au Port de Commerce de Brest.

Le site de Dégrad des Cannes en Guyane (973) est référencé pour une accumulation d'hydrocarbures localisée à la sortie du point de rejet des eaux pluviales de la centrale thermique alimentant Cayenne. Un prisme (surface < 1 ha) constitué par un mélange d'hydrocarbures aromatiques polycycliques et de sédiments est venue s'accumuler sur le fond du marais mitoyen de l'établissement.

## 4 – Caractéristiques physico-chimiques des produits stockés

### 4.1 – Exploration et production de pétrolière

Il n'existe pas à ce jour de jour de résultats disponibles concernant les caractéristiques chimiques des produits contenus au sein des lagunes liées à l'exploration et à la production pétrolière (goudrons des « burn pits » et dépôts à l'intérieur des bourbiers).

Les caractéristiques des goudrons des « burn pits » dépendent du type de pétrole brut concerné ainsi que de l'efficacité du processus de brûlage (certains pétroles bruts sont des produits difficiles à brûler générant des résidus). De même, les caractéristiques des dépôts de boues de forage sont liées à la nature des boues utilisées par le forage utilisateur.

### 4.2 – Raffinage des produits pétroliers

#### 4.2.1 – Généralités

Les caractéristiques physico-chimiques originelles des goudrons acides varient en fonction du procédé source.

Les goudrons acides issus de la fabrication des solvants légers avaient une faible viscosité et une inflammabilité proche de la température ambiante du fait d'une teneur élevée en hydrocarbures légers. Ce type de goudrons acides ne pouvait être que brûlé au sein du four des raffineries et n'était ainsi pas mis en dépôt.

Les goudrons acides issus du traitement des huiles vierges avaient une viscosité élevée, tout en restant liquides à température ambiante. Les hydrocarbures les accompagnant avaient une inflammabilité largement supérieure à 200°C.

Les goudrons issus du re raffinage des huiles usées disposent probablement de caractéristiques similaires à ceux issus de la fabrication des huiles vierges.

Les goudrons acides issus du traitement de la paraffine se présentaient à l'état solide à température ambiante. Comme pour le traitement des huiles, leur inflammabilité était supérieure à 200°C. Ils pouvaient donc être mis en dépôt.

Les caractéristiques des goudrons issus de la fabrication des bases essences et des huiles blanches médicinales ne sont pas documentées au sein de la littérature disponible.

Ces différences de propriétés physico-chimiques contribuent à l'hétérogénéité des masses et des volumes stockés au sein des lagunes lorsque celles-ci ont réceptionné des goudrons issus de plusieurs fabrications, ce qui était fréquent pour les sites de raffineries.

#### 4.2.2 – Aspects physiques des goudrons acides

##### 4.2.2.1 – Viscosité

Les goudrons acides ont une viscosité élevée, cette dernière pouvant évoluer selon les saisons, les produits étant moins visqueux et plus liquides pendant les périodes chaudes. La viscosité des goudrons varie aussi en fonction des procédés sources. Les goudrons ayant la plus faible viscosité sont ceux liés à la fabrication des solvants légers bien que cet aspect puisse varier en fonction des paramètres d'exploitation des procédés. Leur densité est généralement plus faible que les sols (1300 kg/m<sup>3</sup> à 1600 kg/m<sup>3</sup>) si bien que les goudrons ont tendance à remonter à la surface. L'altération peut entraîner la formation de croûtes indurées en surface et la préservation de phases plus liquides en profondeur. Les goudrons sont hydrophobes.

##### 4.2.2.2 – Couleur

Les goudrons acides ont une couleur noire à marron, dépendante du procédé source ainsi que des processus d'altération affectant le dépôt. Les goudrons issus du re raffinage des huiles usées ont généralement une couleur foncée tendant vers le marron. Les processus d'altération peuvent aussi entraîner l'apparition de ce type de couleur.

##### 4.2.2.3 – Odeur

Les dépôts émettent des odeurs « huileuses » caractéristiques des hydrocarbures pétroliers. Celles-ci sont accompagnées par des odeurs acres soufrées liées aux émissions de dioxyde de soufre, qui se réduisent au cours du temps. D'autres odeurs soufrées peuvent être émises par d'autres composés (mercaptans). La présence d'une phase aqueuse acide est à l'origine du dégagement de vapeurs acides.

##### 4.2.2.4 – pH

Les goudrons ont un pH très acide variant avec les procédés sources. La fabrication des produits blancs est à l'origine de pH inférieurs à 1. Dans le cas du re raffinage des huiles usées, le pH est généralement plus élevé et inférieur à 2. Le traitement à la chaux sur certains sites de lagunes a neutralisé l'acidité initiale des dépôts.

Figure-4.1 : Aspects physiques des goudrons acides



#### 4.2.3 – Différentes phases présentes au sein des lagunes

Les goudrons acides sont composés de différentes phases (organique, eau, acide et impuretés) présentes de manière variable à l'intérieur des lagunes.

L'origine de cette variabilité est à rechercher au niveau des différentes fabrications sources, des paramètres d'exploitation des procédés, des évolutions subies par les goudrons postérieurement au dépôt (émission de dioxyde de soufre, émission de composés aromatiques légers, traitement éventuel des goudrons, incendie, etc.), aux apports de déchets autres à l'intérieur de la lagune (filtres argileux usagés, terres usées, fûts divers), aux traitements éventuels appliqués aux goudrons (stabilisation in-situ), etc. D'autres paramètres encore sont probablement à prendre en compte.

Trois couches distinctes ont été identifiées à l'intérieur des lagunes de Lviv (environ 300000 tonnes) en Ukraine : la couche terminale, la couche intermédiaire, et la couche de base. La couche intermédiaire est à dominante aqueuse. Elle inclue les composés solubles et les composés acides dont l'acide sulfurique. La couche supérieure incorpore les hydrocarbures légers. La couche de base est constituée par les goudrons.

La couche de base des lagunes de Lviv a fait l'objet d'une évaluation de l'importance des différentes phases la composant (fraction organique, fraction acide, eau, impuretés) en vue d'une réhabilitation ou d'une valorisation des hydrocarbures contenus (Tableau-4.1).

Tableau-4.1 : Estimation des différentes phases composant les goudrons acides des lagunes de Lviv en Ukraine (couche de base)

Phases (% de masse)	Estimation	Remarques
Fraction organique	77,2 - 81,0	
Fraction acide	1,8 - 1,9	
Eau	7,0 - 7,2	
Impuretés (cendres)	10,1 - 13,7	

Les résultats peuvent être complétés par une approche similaire concernant le site de lagunes de la raffinerie de Digboi (environ 30000 tonnes stockées en plusieurs dépôts) en Inde. Dans ce cas, les résultats avancés concernent une estimation moyenne de l'importance des différentes fractions contenues à l'intérieur des lagunes (Tableau-4.2).

Tableau-4.2 : Estimation moyenne des différentes phases composant les goudrons acides de site de lagunes de Digboi en Inde

Phases (% masse)	Estimation	Remarques
Fraction organique	50 - 63	
Fraction acide	1	
Eau	27 - 28	
Impuretés (cendres)	8 - 10	

Cette estimation fait valoir une importance relative de la fraction eau plus élevée par rapport au site de Lviv. A l'inverse, les hydrocarbures sont moins représentés.

Une approche comparative issue de différents travaux concernant des goudrons acides de plusieurs origines (raffinage du benzol, raffinage des huiles usées, raffinage des produits blancs) au Royaume Uni illustre, plus encore que les estimations précédentes, la grande variabilité des situations rencontrées.

Cette approche met en évidence que les faits suivants :

- la fraction organique varie entre 15 et 70% ;
- la fraction acide varie entre 10 et 90% ; et,
- la fraction aqueuse varie entre 5 et 40%.

En complément des résultats précités, une caractérisation détaillée des lagunes du Derbyshire (Royaume Uni) détaille les trois phases suivantes :

- une phase de goudrons composés par des asphaltènes de poids moléculaires élevés (molécules poly-aromatiques présentes au sein des pétroles bruts), peu solubles et peu mobiles, mélangés à des hydrocarbures polaires et des coupes moyennes de distillation ;
- des hydrocarbures libres composés principalement par des hydrocarbures saturés moyens issus de distillation ;
- une phase aqueuse riche en sulfate et très acide (pH < 1).

L'exportation de contaminants vers les milieux environnants (sols, eaux souterraines) provient des hydrocarbures présents sous forme dissoute au sein de la phase aqueuse ainsi que des hydrocarbures libres.

#### 4.2.4 – Composition chimiques des goudrons acides

A l'instar des différentes phases les constituants, la composition chimique des goudrons acides varie aussi fortement. Néanmoins, les catégories de composés suivantes y sont pratiquement toujours représentées :

- hydrocarbures aliphatiques ;
- hydrocarbures aromatiques ;
- phénols ;
- métaux ;
- acides ;
- hydrocarbures sulfonés ;
- gaz (hydrogène sulfuré ; dioxyde de soufre, méthane).

L'Agence de l'Environnement du Royaume Uni propose une liste non exhaustive de composés chimiques susceptibles d'être présents au sein des lagunes à goudrons acides (Annexe-4.1).

#### 4.2.5 – Codes déchets

En fonction de leur origine (raffinage, pyrolyse du charbon) et de leur caractère acide ou pas, les goudrons sont référencés par le décret n°2002-540 sous les codes :

- 050107 (goudrons acides issus du raffinage du pétrole) ;
- 050108 (autres goudrons et bitumes issus du raffinage du pétrole) ;
- 050601 (goudrons acides issus de la pyrolyse du charbon) ;
- 050603 (autres goudrons issus de la pyrolyse du charbon).

#### 4.3 – Pyrolyse de la houille

Les goudrons liés à la pyrolyse de la houille présentent, comme les goudrons issus du raffinage des produits pétroliers, des propriétés physiques variables allant de liquides parfois légèrement plus denses que l'eau à des matières solides aux conditions de pression et températures ambiantes.

Les principaux composés identifiés sont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (naphtalène, anthracène) auxquels sont associés des composés phénoliques ainsi que des composés azotés (ammonium). Ils contiennent un faible pourcentage (2%) de produits organiques légers. Ces derniers sont représentés en majorité par des composés aromatiques monocycliques (benzène, éthyl benzène, toluène, xylènes) et des hydrocarbures aliphatiques (alcanes et alcènes).

Le Tableau-4.3 liste les principaux composés chimiques susceptibles d'être présents.

Tableau-4.3 : Composés chimiques susceptibles d'être présents dans les goudrons acides (raffinage de houille)

Composés inorganiques	Métaux et métalloïdes	Hydrocarbures aromatiques monocycliques	Composés phénolés	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
Ammoniaque Cyanures Nitrate Sulfates Sulfures Sulfocyanate	Aluminium Antimoine Arsenic Baryum Cadmium Chrome Cuivre Fer Plomb Manganèse Mercure Nickel Sélénium Argent Vanadium Zinc	Benzène Ethyl benzène Toluène Xylènes Totaux	Phénol 2-méthylphénol 4-méthylphénol 2,4-diméthylphénol	Acénaphène Acénaphylène Anthracène Benzo(a)anthracène Benzo(a)pyrène Benzo(b)fluoranthène Benzo(g,h,i)pérylène Benzo(k)fluoranthène Chrysène Dibenzo(a,h)anthracène Fluoranthène Fluorène Naphtalène Phénanthrène Pyrène Indéno(1,2,3-c,d) pyrène

A ces composés, s'ajoutent des composés sulfurés (sulfates, sulfure de carbone, sulfhydrate d'ammonium) et des composés oxygénés (eau, phénols, acétone).

Ils sont référencés par le décret n°2002-540 sous le même code (050107) que les goudrons acides issus du raffinage des produits pétroliers.

#### 4.4 – Accidents impliquant des hydrocarbures

La composition des déchets récupérés lors des accidents dépend de la nature des produits impliqués. Celle-ci est variable et est susceptible d'intégrer toute la gamme des produits pétroliers. Dans le cas de l'Amoco Cadiz, le produit impliqué était un pétrole brut léger (« arabian light »). Pour l'Erika, il s'agissait de fiouls lourds.

#### 4.5 – Autres origines

Cette catégorie de lagunes intégrant des origines très diverses (station de déballastage, décharges, accumulations liées à des rejets actuels), il est attendu que la composition chimique des produits stockés soit aussi très diverse.

## 5 – Typologie des lagunes inventoriées

### 5.1 – Identification des sites de lagunes

Les sites de lagunes inventoriées sont issus :

- de recherches effectuées sur BASOL;
- d'un retour des questionnaires « lagunes » renseignés par les compagnies pétrolières (BP France) ;
- d'entretiens spécifiquement réalisés avec des prestataires de service (dépollution) ;
- de recherches effectuées sur internet.

Les informations recueillies ont ensuite été comparées à la grille de lecture afin de proposer une typologie organisée autour des sites connus pour lesquelles les informations disponibles sont suffisamment détaillées.

Un total de 25 sites potentiels de lagunes à hydrocarbures est ainsi référencé en France métropolitaine et outre-mer. Ce chiffre ne tient pas compte des sites des anciennes usines à gaz où le stockage des goudrons était généralement effectué au sein de fosses bétonnées.

Certains sites inventoriés comportent plusieurs lagunes mitoyennes ou proches les unes des autres. C'est le cas de Gonfreville l'Orcher (2 lagunes distinctes) et de Courchelettes (3 lagunes mitoyennes). Lorsque ce cas de figure est rencontré, le site est appréhendé dans sa globalité.

A titre de comparaison, le Royaume compte plus de 150 sites enregistrés.

Les questionnaires renseignés reçus suites à l'interrogation des compagnies pétrolières concernent 7 sites de lagune situés en France métropolitaine (4 sites), au Royaume Uni (2 sites) et aux Etats-Unis (1 site).

Les 7 questionnaires ont été renseignés par BP France.

### 5.2 – Présentation de la grille de lecture

Une grille de lecture a été élaborée pour les origines rencontrées (raffinage des produits pétroliers, pyrolyse de la houille, origines autres) au niveau des sites de lagunes connus. La grille de lecture est composée chacune de 5 critères.

## 5.2.1 – Choix des critères

### 5.2.1.1 – Justification du choix des critères

Les critères ont été sélectionnés pour la réunion des 4 propriétés suivantes :

- il s'agit d'informations communément disponibles au sein de la documentation rassemblée ;
- les critères constituent des caractéristiques importantes du site de lagune ;
- ils sont suffisamment discriminants pour constituer la base de la typologie ;
- les caractéristiques représentées ont des implications fortes en matière de diagnostic et / ou de réhabilitation.

### 5.2.1.2 – Présentation des critères

La grille de lecture intègre les 5 critères suivants :

- l'origine du terme source ;
- le tonnage du terme source ;
- la répartition du terme source ;
- la nature du terme source ; et,
- l'accessibilité du terme source.

D'autres critères ont été testés sans finalement être retenus car ils ne rassemblaient pas les quatre propriétés énoncées ci avant.

Parmi ceux-ci, on trouve l'incidence du site de lagune sur les sols et les eaux souterraines. Cette information n'apparaît pas sous une forme détaillée au sein de la documentation pour être sélectionnée. Lorsqu'elle y est présente, le niveau de précisions rencontré ne permet pas d'être suffisamment discriminant pour être retenu. Intégrer ce critère demanderait de pouvoir disposer des rapports de diagnostic pour chacun des sites étudiés. Un développement ultérieur de la typologie basé sur un volume d'informations plus élevé devrait considérer son incorporation qui offre des implications en matière de réhabilitation.

L'épaisseur du dépôt a aussi été considérée. A vue de la documentation disponible, il s'est avéré que ce critère n'était pas suffisamment discriminant pour être retenu. Certaines lagunes stockant un tonnage important sont peu épaisses (quelques mètres) alors que d'autres, disposant d'un tonnage plus faible, peuvent approcher la dizaine de mètre d'épaisseur.

### *5.2.1.3 – Application des critères*

Chaque critère se voit attribuer une note selon les situations rencontrées en fonction de grandeurs ou de caractères spécifiques. Lorsque l'information n'est pas disponible, le critère en question se voit attribuer un point d'interrogation.

Chaque type de lagune est ensuite défini par un code composé de 5 chiffres issus de l'application des 5 critères.

### *5.2.1.4 – Cas des sites ayant fait l'objet d'une réhabilitation*

La documentation rassemblée englobe des sites de lagunes ayant fait l'objet d'une réhabilitation ancienne ou récente. Dans le cas des réhabilitations récentes (§ paragraphe 5.3 : lagune de Brest, sites E) les informations disponibles décrivent les sites avant traitement. C'est donc cette situation qui est incorporée au sein de la typologie. Pour les réhabilitations anciennes (§ paragraphe 5.3 : sites E et F), la documentation traite de l'état actuel des sites. Ce dernier est incorporé au sein de la typologie.

## *5.2.2 – Présentation de la grille de lecture*

### *5.2.2.1 – Origine du terme source*

Le premier critère s'applique à l'origine du terme source.

Il permet de distinguer les lagunes issues :

- de l'exploration et la production pétrolière (note 1) ;
- du raffinage des produits pétroliers (note 2) ;
- de la pyrolyse de la houille (note 3) ;
- des dépôts issus d'accidents (note 4) ;
- d'origines autres (note 5).

### *5.2.2.2 – Estimation du terme source*

L'estimation du terme source sépare les lagunes en fonction de leur tonnage au sein de la typologie.

Les situations suivantes sont distinguées :

- le terme source est > 150000 tonnes (note 1) ;
- le terme source varie entre 40000 et 150000 tonnes (note 2);
- le terme source est compris entre 10000 et 40000 tonnes (note 3) ;
- le terme source est < 10000 tonnes (note 4).

Ce critère influe sur la nature et l'intensité des enjeux associés aux sites de lagunes ainsi que sur le choix des techniques d'investigations. Il a aussi des implications sur les solutions de réhabilitation applicables, et notamment sur le budget enveloppe.

#### *5.2.2.3 – Répartition du terme source*

La répartition du terme source permet de distinguer les sites de lagunes composés :

- d'un seul dépôt (note 1) ;
- d'au moins deux dépôts géographiquement distincts (note 2).

Certains sites de lagunes comportent un nombre élevé de dépôts distincts les uns des autres. C'est le cas au niveau d'anciennes provinces minières dont les excavations ont été progressivement transformées en lagunes à hydrocarbures.

Ce critère distingue les sites de lagunes selon la répartition du terme source. Les implications en matière de diagnostic ou de réhabilitation sont nombreuses : nécessité d'identifier l'ensemble des sites de dépôt, épaisseur et extension géographique des dépôts variables, choix de réhabilitation pouvant varier d'un site de dépôt à un autre, etc.

#### *5.2.2.4 – Nature du terme source*

La nature du terme source constitue le troisième critère sélectionné en vue de l'élaboration de la typologie.

Plusieurs situations sont distinguées :

- les déchets hydrocarbonés sont composés uniquement par des goudrons acides (incluant leur phase aqueuse) (note 1) ;
- les déchets hydrocarbonés sont composés par des goudrons acides accompagnés par d'autres catégories de déchets (note 2) ;
- les déchets hydrocarbonés sont composés uniquement par des goudrons non acides (note 3) ;
- les déchets hydrocarbonés sont composés par des goudrons non acides accompagnés par d'autres catégories de déchets (note 4) ;
- les déchets hydrocarbonés sont d'une autre nature que les goudrons et sont les seuls déchets présents à l'intérieur de la lagune (note 5) ;
- les déchets hydrocarbonés sont d'une autre nature que les goudrons et sont accompagnés par d'autres déchets (note 6).

Dans les 2 premiers cas, les goudrons composant le terme source entrent sous les codes 050107 et 050601 de la nomenclature. Dans le 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> cas, les goudrons (non acides) entrent dans les catégories 050108 et 050603. Le 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> cas regroupent les autres situations rencontrées (déchets de fioul, sédiments contaminés par les hydrocarbures).

Le caractère acide a des implications en matière de techniques d'investigations et de protection du personnel. Les lagunes à goudrons acides nécessitent l'adoption de mesures spécifiques en matière d'hygiène et sécurité pour le personnel procédant aux investigations. Il en est de même concernant les moyens physiques utilisés (protection vis-à-vis de l'acidité rencontrée). Les choix des procédés de réhabilitation sont aussi dépendants de ce critère.

#### *5.2.2.5 – Accessibilité du terme source*

Selon les conditions d'accès au terme source, les cas de figures suivants sont distingués :

- le terme source est directement accessible (note 1) ;
- le terme source est partiellement ou totalement recouvert par des matériaux (remblais) (note 2) ;
- le terme source est partiellement ou totalement sous eau (note 3) ;
- le terme source est partiellement recouvert par des matériaux (remblais) et partiellement sous eau (note 4).

Les conditions d'accès ont des incidences sur les choix des techniques d'investigations et de réhabilitation.

Le Tableau-5.1 résume le découpage adopté pour chaque critère en fonction des situations rencontrées.

Tableau-5.1 : Critères sélectionnés en vue de l'élaboration de la typologie

Critères	Découpage	Note
Origine du terme source	Exploration et production pétrolière	1
	Raffinage des produits pétroliers	2
	Pyrolyse de la houille	3
	Accidents	4
	Origines autres	5
Estimation du terme source	150000 tonnes	1
	50000 à 150000 tonnes	2
	10000 à 50000 tonnes	3
	< 10000 tonnes	4
Répartition du terme source	1 seul dépôt ou lagune	1
	Plusieurs dépôt ou lagunes	2
Nature du terme source	Goudrons acides seuls (incluant phase aqueuse)	1
	Goudrons acides et autres déchets	2
	Goudrons autres seuls	3
	Goudrons autres et autres déchets	4
	Hydrocarbures autres que goudrons	5
	Hydrocarbures autres que goudrons avec autres déchets	6
Accessibilité du terme source	Directement accessible	1
	Partiellement ou totalement recouvert par des matériaux	2
	Partiellement ou totalement sous eau	3
	Partiellement recouvert par des matériaux et sous eau	4

### 5.3 – Présentation de la typologie

Les sites intégrés à la typologie sont ceux disposant d'informations précises (questionnaires renseignés, articles au sein de la littérature technique et scientifique, communications orales de sociétés de services).

La typologie intègre 19 sites de lagunes localisés en France métropolitaine (10 sites) et Outre-mer (1 site), Belgique (2 sites), Royaume Uni (3 sites), République Tchèque (1 site), Ukraine (1 site) et Canada (1 site).

Bien que situé en dehors du périmètre européen, le site canadien a été intégré à l'étude pour ses caractéristiques exceptionnelles. Plus de 700000 tonnes de sédiments contaminés y ont été diagnostiqués à l'intérieur d'une lagune de plus de 30 ha de surface. Une partie importante des contaminations est liée à une ancienne cokerie sidérurgique.

Les 19 sites de lagunes présentés ci-après sont à rattacher :

- au raffinage des produits pétroliers (12 sites) ;
- à la pyrolyse de la houille (3 sites) ;
- aux origines autres (4 sites).

Aucun site lié à l'exploration & production pétrolière et aux accidents n'y figure du fait de la rareté des informations les concernant.

### 5.3.1 – Raffinage des produits pétroliers

#### → Type 2.1.2.2.1

Le type 2.1.2.2.1 correspond à des lagunes à goudrons acides de très grande taille (terme source > 150000 tonnes) comprenant plusieurs sites de dépôts issus du raffinage des produits pétroliers. Les goudrons acides sont accompagnés par d'autres catégories de déchets. Le terme source est directement accessible. Des hétérogénéités internes liées à la consistance variable (solide, pâteuse, liquide) des produits stockés et à la présence de différentes phases sont suspectées. Il est représenté par le site A (Belgique).

#### Ex<sub>1</sub> : Site A (Belgique)

- Origine du terme source : raffinage des produits pétroliers ;
- Estimation du terme source : 200000 tonnes ;
- Répartition du terme source : 3 lagunes distinctes ;
- Nature du terme source : goudrons acides, déchets d'huiles et déchets aqueux ;
- Accessibilité du terme source : directement accessible.

Le site A est composé de 3 lagunes à goudrons acides (environ 3 ha) dont la plus ancienne et la plus importante en surface (2 ha) a été exploitée depuis 1923. Le site a fait l'objet d'une étude détaillée (1998) visant à définir les choix de réhabilitation. Le terme source (> 150000 tonnes) est composé par des goudrons acides, des déchets d'huiles ainsi qu'une phase aqueuse. La présence d'explosifs y est aussi rapportée. Les autres caractéristiques du site A sont une épaisseur moyenne du terme source d'environ 3 m, et une consistance solide des goudrons acides.

#### → Type 2.1.2.?.?

Les informations disponibles concernant au site de la lagune de Lviv en Ukraine sont partielles. Celui-ci appartient au type de lagunes à goudrons acides de très grande taille issue du raffinage des produits pétroliers. La géométrie et l'accessibilité du terme source ne sont pas documentées au sein de la littérature. Il en est de même pour la présence éventuelle d'autres déchets accompagnant les goudrons acides. La lagune de Lviv peut éventuellement se rattacher au même type que le site A.

Ex<sub>2</sub> : Lviv (Ukraine)

- Origine du terme source : raffinage des produits pétroliers ;
- Estimation du terme source : 300000 tonnes (plusieurs lagunes référencées dans la littérature 1, 2, 4 et 5) ;
- Répartition du terme source : plusieurs sites de dépôts ;
- Nature du terme source : goudrons acides (présence d'autres déchets non documentée) ;
- Accessibilité du terme source : inconnue.

Trois couches distinctes sont documentées au sein du terme source des lagunes 1, 2, 4 et 5 : goudrons à la base du dépôt, couche aqueuse et acide en position intermédiaire, couche supérieure avec fraction organique légère. L'épaisseur du terme source des lagunes n'est pas rapportée.

→ *Type 2.2.1.2.1*

Le type 2.2.1.2.1 correspond à des sites de lagunes de grande taille liés au raffinage des produits pétroliers. Le site de dépôt est unique. Le terme source est compris entre 50000 et 150000 tonnes. Ce type inclut les lagunes à goudrons acides du site B (Royaume Uni) et du site C (Royaume Uni). Ces dernières incorporent des déchets industriels autres que les goudrons (filtres argileux usagés, terres usées, cendres). Le terme source peut être ponctuellement recouvert par des matériaux terrigènes, ou encore dans certains secteurs, directement accessibles. L'épaisseur du terme source est généralement importante (comprise entre 5 et 10 m).

Ex<sub>3</sub> : Site B (Royaume Uni), Figure-5.1

- Origine du terme source : raffinage des produits pétroliers (benzol principalement) ;
- Estimation du terme source : 94000 tonnes acide sulfurique et goudrons ; 7500 tonnes bentonite et hydrocarbures lourds, 1000 fûts métalliques de 55 gallons avec contenus incertains (1 seule lagune) ;
- Répartition du terme source : site de dépôt unique ;
- Nature du terme source : goudrons acides et autres déchets (fûts métalliques) ;
- Accessibilité du terme source : remblaiement ponctuellement par des matériaux.

Figure-5.1 : Site B (Royaume Uni)



Le site B (Royaume Uni) (environ 1,3 ha) a fait l'objet de plusieurs études incluant des investigations géophysiques (sismique et gravimétrie). Il s'agit d'un ancien site minier (extraction de charbon : 1750-1860) transformé en carrière d'argiles (fabrication de briques : 1820-1964), puis en lagune à goudrons à la fin des années cinquante. Il a été exploité à cet effet jusqu'en 1972.

Les goudrons acides ont principalement pour origine le raffinage des produits pétroliers (raffinerie B). Ils sont évalués à 94000 tonnes environ. Leur épaisseur peut atteindre 10 m. D'autres déchets industriels sont stockés avec les goudrons : 7500 tonnes de bentonite souillée par des hydrocarbures et plus de 1000 fûts métalliques (55 gallons) avec des contenus non précisés.

Le terme source incorpore une lame d'eau temporaire (épaisseur 0,5 m) à très faible pH (< 2,5). En 1980, une fine couche (épaisseur 7,5 cm) d'hydrocarbures légers surnageait sur cette lame d'eau. Suite à un incendie, probablement provoqué par le contact entre des produits incompatibles suite de la corrosion de fûts métalliques, cette couche a aujourd'hui disparu. Les goudrons, de consistance hétérogène (deux couches de goudrons distinctes ont été inventoriées), ne sont directement accessibles que lorsque la lame d'eau se contracte suite à un épisode de temps sec. La lagune n'a fait l'objet d'aucun traitement particulier.

#### Ex<sub>4</sub> : Site C (Royaume Uni)

- Origine : raffinage des produits pétroliers (benzol) ;
- Estimation du terme source : 62000 tonnes de goudrons acides ;
- Répartition du terme source : site de dépôt unique ;
- Nature du terme source : goudrons acides et autres déchets (amiante possible, déchets inertes en couverture) ;
- Accessibilité du terme source : remblaiements ponctuels, temporairement sous eau.

Le site C (Royaume Uni) (environ 2,4 ha) est une ancienne carrière d'argiles (fabrication de briques), transformée ensuite en lagune à goudrons acides (1951-1967). Elle n'a fait l'objet à ce jour d'aucun traitement des goudrons.

Les goudrons ont principalement pour origine le raffinage des produits pétroliers (raffinerie C). Ils sont évalués à environ 62000 tonnes. Leur épaisseur maximale peut atteindre de 7 à 9 m (les épaisseurs de 11 à 14 m sont aussi rapportées dans la littérature). Ils sont associés à d'autres déchets (bentonite imprégnée par des hydrocarbures, fûts de produits chimiques). Des déchets d'amiante peuvent aussi être présents (premier dépôt sous les goudrons).

Les goudrons sont présents sous formes boueuse et pâteuse.

Une couche de matériaux inertes (ép. 0,9 m) recouvre les goudrons. Le terme source incorpore temporairement une lame d'eau (ép. de la lame d'eau < 1,5 m).

→ *Type 2.2.2.2.1*

Le type 2.2.2.2.1 présente les mêmes caractéristiques que le type précédent à l'exclusion du terme source qui est réparti au niveau de plusieurs sites de dépôts. Ce type est représenté par le site de lagunes à goudrons acides de Cinderhills au Royaume Uni.

Ex<sub>5</sub> : Cinderhills (Derbyshire, Royaume Uni)

- Origine du terme source : re raffinage des huiles usées ;
- Estimation du terme source : 63600 tonnes ;
- Répartition du terme source : 8 lagunes ;
- Nature du terme source : goudrons acides et autres déchets (filtres argileux, déchets miniers souillés) ;
- Accessibilité du terme source : goudrons directement accessibles, le terme source incorpore une lame d'eau en surface (lagune intermédiaire et lagune Sud).

Cinderhills (Derbyshire, Royaume Uni) correspond à d'anciens sites d'extraction minière (production de charbon) transformés en carrières d'argiles (fabrication de briques : 1961-1980), avant d'être exploités comme décharges de goudrons acides (1972-1977). Ces derniers sont issus du re raffinage des huiles usées (fabricant local).

Les goudrons acides (environ 63600 tonnes) ont été déposés au sein de 8 lagunes distinctes, la 8<sup>ème</sup> ayant depuis été transposée pour les besoins de l'élargissement de la voie de circulation mitoyenne. Au sein des lagunes, les goudrons acides sont mélangés avec des filtres argileux usés, des déchets miniers souillés et des matériaux silteux. L'épaisseur du terme source atteint au maximum 9 à 10 m.

Le terme source est directement accessible. Il peut incorporer une lame d'eau (lagune intermédiaire, ép. 1,50 m). Sa consistance est hétérogène (goudrons solides et hydrocarbures liquides). Des poches d'eau huileuse sont aussi présentes. Les lagunes n'ont pas fait l'objet d'un traitement particulier.

L'incidence des lagunes à goudrons sur la qualité des eaux souterraines se traduit par un abaissement du pH (sondage H2A, pH : 4,8), une augmentation des concentrations en chlorures (sondage H2A, Cl<sup>-</sup> : 105 mg/l), de la conductivité des eaux (sondage H2A, 5400 µS/cm), ainsi que des concentrations en sulfates (sondage SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> : 5040 mg/l). Les molécules organiques (hydrocarbures, phénols) ne se retrouvent qu'à de faibles concentrations.

→ *Type 2.3.1.2.2*

Le type 2.3.1.2.2 correspond à des sites de lagunes de grande taille comprenant un seul site de dépôt lié au raffinage des produits pétroliers. Le terme source est compris entre 10000 et 50000 tonnes. Il est composé par des goudrons acides et d'autres catégories de déchets recouverts par des matériaux terrigènes. Ce type est représenté par le site D (France).

Ex<sub>6</sub> : Site D (France)

- Origine : raffinage des produits pétroliers (solvants, huiles lubrifiantes, paraffines) ;
- Estimation du terme source : 33200 m<sup>3</sup>, soit tonnes 46600 tonnes ;
- Répartition du terme source : site de dépôt unique ;
- Nature du terme source : goudrons acides (tonnage réduit) et autres déchets (paraffine, terres usées, déchets d'hydrocarbures de fonds de bacs, brais) ;
- Accessibilité du terme source : couverture quasi-totale (sables), rarement accessible.

Le site D occupe une surface de 124 ha environ à proximité de la raffinerie D. Il a été utilisé pour une activité agricole jusqu'en 1949. Des bacs pétroliers ont été installés dans la partie Nord - Ouest au cours des années 1950 puis furent démantelés au début des années 1980. La quasi totalité du site fut recouverte de sables à la fin des années 1960. Des terres usées, des goudrons acides, des boues et des paraffines ont été déposés au cours des années 1970 dans la partie centrale du site sur une surface de 5 ha et une épaisseur allant de 0,5 à 1 m. Les goudrons proviennent du raffinage des produits pétroliers. Le terme source est de consistance pâteuse. La continuité du dépôt n'est pas documentée. Ce site a ensuite été remblayé par des matériaux sableux et re végétalisé. Il présente aujourd'hui des intérêts faunistiques et floristiques. Le site fait actuellement l'objet d'une évaluation détaillée des risques pour la santé et pour les écosystèmes ainsi que d'un suivi de la nappe.

→ Type 2.3.2.2.2

Le type 2.3.2.2.2 correspond à des sites de lagunes de taille intermédiaire composés de plusieurs sites de dépôt issus du raffinage des produits pétroliers. Le terme source varie entre de 10000 et 50000 tonnes avec une épaisseur généralement inférieure à 5 m, rarement au-delà. Il est réparti en plusieurs sites de dépôts. Les goudrons acides sont accompagnés par d'autres catégories de déchets. Les dépôts sont totalement recouverts par des remblais. Les sites E et F (France) le représentent.

Ex<sub>7</sub> : Site E (France)

- Origine du terme source : raffinage des produits pétroliers ;
- Estimation du terme source : 43520 tonnes de goudrons traités ;
- Répartition du terme source : 4 lagunes ;
- Nature du terme source : goudrons ponctuellement en mélange avec des remblais (silts sableux ou crayeux, bois, briques) ;
- Accessibilité du terme source : remblaiement complet des lagunes par une couche composée de matériaux sableux à silteux et de la terre végétale (0,5 à 3,5 m).

Le site E (0,8 ha) est une ancienne carrière de sables utilisée pour le stockage des goudrons acides issus du site de la raffinerie E. Sa particularité est d'avoir fait l'objet d'un traitement d'une partie des goudrons stockés (stabilisation à la chaux en 1982-1983). Le site est composé de 4 lagunes distinctes.

Les 4 lagunes stockent un total de 27760 tonnes de goudrons acides traités (densité : 1500 kg/m<sup>3</sup>) et 17265 tonnes de goudrons acides non traités (densité : 1600 kg/m<sup>3</sup>). L'épaisseur du terme source varie entre 0,2 et 5,4 m. Il est constitué en presque totalité par des goudrons acides accompagnés par divers matériaux (briques, bois).

Les 4 lagunes ont été remblayées par une couche de sables d'épaisseur très variable (de 0,5 et 3,5 m).

Les goudrons traités se comportent comme des matériaux plastiques. Les goudrons non traités ont une consistance solide et friable. La teneur en eau moyenne est de 18,9% pour les goudrons traités et de 13,6% pour les goudrons non traités.

Le Tableau-5.2 présente les résultats des mesures de pH effectuées au sein des goudrons.

Tableau-5.2 : pH des goudrons acides du site E

	Goudrons acides traités	Goudrons acides non traités
PH	Moyenne : 9,1 [1,0 à 12,8]	Moyenne < 1,0

Le Tableau-5.3 détaille les concentrations en soufre total relevées.

Tableau-5.3 : Concentrations en soufre total au sein des goudrons acides du site E

	Goudrons acides traités	Goudrons acides non traités
Soufre Total	Moyenne : 2,5% [0,2 à 8,4%]	Moyenne : 3,9% [2,9 à 5,3%]

Le Tableau-5.4 présente les résultats des mesures des principaux paramètres organiques effectuées au sein des goudrons à partir d'une extraction au dichlorométhane, puis d'une chromatographie en couche mince.

Tableau-5.4 : Principaux paramètres organiques des goudrons acides du site E

	Goudrons acides traités	Goudrons acides non traités
COT	Moyenne : 20% [1,8 à 35%]	Moyenne : 4,4% [1,5 à 12%]
Hydrocarbures extractibles par solvant	Moyenne : 7,1% [0,4 à 38%]	Moyenne : 2,1% [0,2 à 7,5%]
Résines	Moyenne : 55% des hydrocarbures extractibles par solvant [21,0 à 75,0%]	Moyenne : 70% des hydrocarbures extractibles par solvant [34,0 à 90,0%]
Huiles minérales et paraffines	Moyenne : 33% des hydrocarbures extractibles par solvant [10,0 à 75,0%]	Moyenne : 22% des hydrocarbures extractibles par solvant [5,0 à 44,0%]
Aromatiques non volatils	Moyenne : 12% des hydrocarbures extractibles par solvant [2,0 à 18,0%]	Moyenne : 8% des hydrocarbures extractibles par solvant [4,0 à 22,0%]

Les HAP sont généralement présents à des concentrations non significatives.

Les résultats ci-dessus laissent supposer la présence en concentrations significatives d'hydrocarbures non extractibles au seul dichlorométhane.

La localisation de la prise d'échantillon pour analyses au sein des volumes et des masses hétérogènes stockées influe sur les résultats des analyses.

Concernant les éléments traces métalliques, des concentrations significatives sont relevées en arsenic (56 mg/kg), chrome (76 à 118 mg/kg), cuivre (156 à 458 mg/kg) et plomb (207 à 285 mg/kg).

Ex<sub>8</sub> : Site F (France)

- Origine du terme source : raffinage des produits pétroliers ;
- Estimation du terme source : < 40000 tonnes ;
- Répartition du terme source : 2 lagunes (lagune n°1 : 8000 m<sup>3</sup> de résidus, 3000 m<sup>3</sup> d'eau sous forme de lentilles, lagune n°2 : 642 m<sup>3</sup> de phase aqueuse, 1618 m<sup>3</sup> de phase pâteuse, 1850 m<sup>3</sup> de phase sédimentée) ;
- Nature du terme source : goudrons acides et autres déchets ;
- Accessibilité du terme source : lagune n°1 recouverte d'une couche argilo-sableuse ; lagune n°2 remblayée.

Le site F (France) est un site regroupant 2 lagunes (lagune n°1 : 0,8 ha, lagune n°2) implantées à proximité de la raffinerie F. La lagune n°1 a fait l'objet d'une réhabilitation par Solétanche Bachy / Inertec (2003).

La lagune n°1 comporte 15000 m<sup>3</sup> soit 24000 tonnes de goudrons acides et 3000 m<sup>3</sup> d'eau emprisonnée sous forme de lentilles. Son épaisseur était d'environ 1,8 m. La lagune n°2, située au Sud-Ouest de la raffinerie, stocke 1618 m<sup>3</sup> de goudrons pâteux, 1850 m<sup>3</sup> de sédiments chargés en hydrocarbures et 642 m<sup>2</sup> de phase aqueuse. L'épaisseur de chacune des couches n'est pas connue.

Remblayée par des matériaux inertes, la lagune n°2 a été découverte à l'occasion de travaux de terrassement).

Il est fait l'hypothèse de la présence de déchets autres que les goudrons acides au sein des 2 lagunes (ce point n'est pas renseigné par les documents disponibles).

La lagune n°1 a fait l'objet d'un traitement par stabilisation de la totalité du dépôt. Ce traitement a compris le pompage des eaux surnageantes et la stabilisation des goudrons acides par malaxage in-situ. Il est destiné à la création d'un massif stable dans la durée (le détail du procédé n'est pas disponible). Une couverture argilo-sableuse est venue scellée le massif qui fait l'objet d'une surveillance piézométrique (fréquence trimestrielle).

→ *Type 2.4.2.2.2*

Le type 2.4.2.2.2 correspond à des sites de lagunes à goudrons de petite taille issus du raffinage des produits pétroliers. Le terme source est inférieur à 10000 tonnes se répartissant au niveau de plusieurs lagunes. Il est composé par des goudrons acides et d'autres déchets totalement remblayés. Ce type est représenté par les sites G et H (France).

Ex<sub>9</sub> : Site G (France)

- Origine du terme source : raffinage des produits pétroliers ;
- Estimation du total terme source : total de 16252 tonnes se répartissant en 8126 tonnes de goudrons traités et non traités, 7376 tonnes de goudrons traités et 750 tonnes de goudrons non traités ;
- Répartition du terme source : 3 lagunes distinctes ;
- Nature du terme source : goudrons acides et autres déchets (déchets de filtration, ordures ménagères, remblais) ;
- Accessibilité du terme source : remblaiement complet des 3 lagunes par une couche de sables (1 à 3,5 m).

Le site G (France) (0,24 ha) est une ancienne carrière de sables utilisée comme lagunes à goudrons acides par la raffinerie G (1962-1975). Le site est composé de 3 lagunes moyennes qui ont fait l'objet d'un traitement par stabilisation d'une partie des goudrons (1985).

Les lagunes stockent un total de 8126 tonnes de goudrons comprenant 7373 tonnes de goudrons traités (densité : 1600 kg/m<sup>3</sup>) et 750 tonnes de goudrons non traités (densité : 1500 kg/m<sup>3</sup>). L'épaisseur du terme source varie entre 0,3 et plus de 7,7 m.

La consistance des goudrons non traités est solide et friable. Celle des goudrons traités est solide et plastique. La teneur en eau moyenne est de 26% pour les goudrons traités et de 24,1% pour les goudrons non traités.

Le Tableau-5.5 présente les résultats des mesures de pH effectuées au sein des goudrons.

Tableau-5.5 : pH des goudrons acides du site G

	Goudrons acides traités	Goudrons acides non traités	Goudrons acides partiellement traités ou en mélange
pH	Moyenne : 8,25 [5,82 à 9,65]	< 1 [6,6 à 12,7%]	Moyenne : 4,02 [3,50 à 4,53]

Le Tableau-5.6 détaille les concentrations en soufre total relevées.

Tableau-5.6 : Concentrations en soufre au sein des goudrons acides du site G

	Goudrons acides traités	Goudrons acides non traités	Goudrons acides partiellement traités ou en mélange
Soufre Total	Moyenne : 2,9% [0,8 à 5,5%]	Moyenne : 9,6% [6,6 à 12,7%]	Moyenne : 4,1% [4,0 à 4,1%]

Le Tableau-5.7 présente les résultats des mesures des principaux paramètres organiques effectuées au sein des goudrons grâce à une extraction au dichlorométhane, puis une chromatographie en couche mince.

Tableau-5.7 : Principaux paramètres organiques des goudrons acides du site G

	Goudrons acides traités	Goudrons acides non traités	Goudrons acides partiellement traités ou en mélange
COT	Moyenne : 12,2% [2,1 à 22,6%]	Moyenne : 12,8% [10,6 à 15,0%]	Moyenne : 9,4% [8,4 à 10,3%]
Hydrocarbures extractibles par solvant	Moyenne : 5,7% [2,0 à 10,3%]	Moyenne : 1,7% [0,2 à 3,1%]	Moyenne : 5,3% [6,0 à 100%]
Résines	Moyenne : 36,6% des hydrocarbures extractibles par solvant [22,5 à 50,1%]	Moyenne : 64,5% des hydrocarbures extractibles par solvant [57,4 à 71,5%]	Moyenne : 60,1% des hydrocarbures extractibles par solvant [42,0 à 78,3%]
Huiles minérales et paraffines	Moyenne : 53,9% des hydrocarbures extractibles par solvant [32,0 à 68,0%]	Moyenne : 22,9% des hydrocarbures extractibles par solvant [21,8 à 24,0%]	Moyenne : 28,1% des hydrocarbures extractibles par solvant [16,3 à 40,0%]
Aromatiques non volatils	Moyenne : 9,4% des hydrocarbures extractibles par solvant [5,0 à 17,9%]	Moyenne : 12,6% des hydrocarbures extractibles par solvant [6,6 à 18,6%]	Moyenne : 11,7% des hydrocarbures extractibles par solvant [5,4 à 18,0%]

Les HAP sont présents dans les goudrons à des concentrations non significatives.

Comme pour le site E, les résultats ci-dessus laissent supposer la présence en concentrations significatives d'hydrocarbures non extractibles au seul dichlorométhane.

Parmi les éléments traces métalliques et métalloïde, seuls l'arsenic (25 à 35 mg/kg), le cuivre (139 mg/kg) et le plomb (313 à 3213 mg/kg) sont dosés à des concentrations significatives.

Les lagunes sont recouvertes par une couche de matériaux inertes dont l'épaisseur varie entre 1 et 3,5 m.

Ex<sub>10</sub> : Site H (France)

- Origine du terme source : raffinage des produits blancs ;
- Estimation du terme source : 8000 tonnes de goudrons non traités ;
- Répartition du terme source : 2 lagunes distinctes ;
- Nature du terme source : goudrons acides, poches d'hydrocarbures liquides, débris à la base (béton, briques, graviers) de la couche de goudrons acides ;
- Accessibilité du terme source : recouvert par 1 à 2 m de sables.

Le site H (France) est un ancien dépôt pétrolier, à proximité d'une ancienne raffinerie exploitée par la compagnie H. Les goudrons acides y ont été stockés à l'intérieur de 2 anciennes cuvettes de rétention des bacs d'un dépôt. La 3<sup>ème</sup> cuvette a été utilisée pour stocker des déblais. Le site a fait l'objet d'études de diagnostic détaillées. Aucun traitement n'a encore été engagé à ce jour.

Le terme source est évaluée à 5600 m<sup>3</sup> de goudrons, soit environ 8000 tonnes (densité de 1400 kg/m<sup>3</sup>). La surface totale de dépôt des goudrons (lagunes n°1 et 2) est estimée à 4300 m<sup>2</sup>. Celle de la 3<sup>ème</sup> lagune (remplissage par des matériaux divers incluant des briques, des graves et des fragments de braie) est de 1400 m<sup>2</sup>.

L'épaisseur des goudrons acides varie entre à 4 et 2,4 m. En moyenne, elle est de 1,3 m.

Les goudrons se présentent sous la forme de deux consistances : solide et malléable ou solide et friable. Leur teneur moyenne en eau a été mesurée à 24% en poids.

Le pH des goudrons varie entre 0,7 et 2,4. Il est en moyenne de 1,2.

La teneur en soufre total varie entre 1,9 et 10,2% avec une moyenne à 6,0%.

Le seul élément trace métallique présent en quantité significative est le plomb. Les concentrations les plus élevées varient entre 3100 et 6300 mg/kg.

Les lagunes sont recouvertes par une couche de sables (1 à 2 m d'épaisseur).

→ *Type 2.4.1.2.1*

Le type 2.4.1.2.1 correspond à des lagunes à hydrocarbures ayant pour origine le raffinage des produits pétroliers. Le terme source est caractérisé par sa petite taille (< 10000 tonnes de goudrons). Il se répartit au niveau d'un seul dépôt stockant des goudrons acides accompagnés par d'autres déchets. Le terme source est directement accessible. Le type 2.4.1.2.1 est représenté par l'ancienne décharge Lemahieu (59).

Ex<sub>11</sub> : Décharge Lemahieu (Département 59, France)

- Origine du terme source : re raffinage des huiles usées ? (décharge externe) ;
- Volume total du terme source : environ 3300 t de goudrons acides accompagnés par d'autres déchets (ordures ménagères) ;
- Répartition du terme source : 1 seule lagune ;
- Nature du terme source : goudrons acides et autres déchets ;
- Accessibilité du terme source : directement accessible.

→ *Type 2.4.1.2.?*

Le type 2.4.1.2.?

Le type 2.4.1.2.? n'est pas totalement défini en raison de données bibliographiques ne décrivant pas totalement les critères utilisés pour élaborer la typologie. Il correspond à des sites de lagune de petite taille issus du raffinage des produits pétroliers. Les goudrons acides sont stockés au niveau d'un seul site de dépôt. La présence éventuelle d'un recouvrement n'est pas documentée pour le seul exemple identifié. Ce type peut être équivalent au type précédent.

Ex<sub>12</sub> : Site I (France)

- Origine du terme source : raffinage des produits pétroliers (fabrication des solvants et raffinage des huiles) ;
- Estimation du terme source : 280 tonnes ;
- Répartition du terme source : 1 seul site de dépôt ;
- Nature du terme source : goudrons acides, filtres argileux usagés et terres usées ;
- Accessibilité du terme source : non documentée.

Le site I (France) est un dépôt de goudrons acides issus du raffinage des produits pétroliers (huiles) localisé en bordure de la raffinerie I. Le terme source est estimé à 280 tonnes constituées pour moitié par des goudrons acides et pour moitié par des filtres argileux usagés. L'accessibilité au dépôt n'est pas documentée (recouvrement ?).

### 5.3.2 – Pyrolyse de la houille

Les mares de goudrons des cokeries (minière, sidérurgique) présentent des caractéristiques voisines (géométries, nature des produits) des lagunes à goudrons issues du raffinage des produits pétroliers.

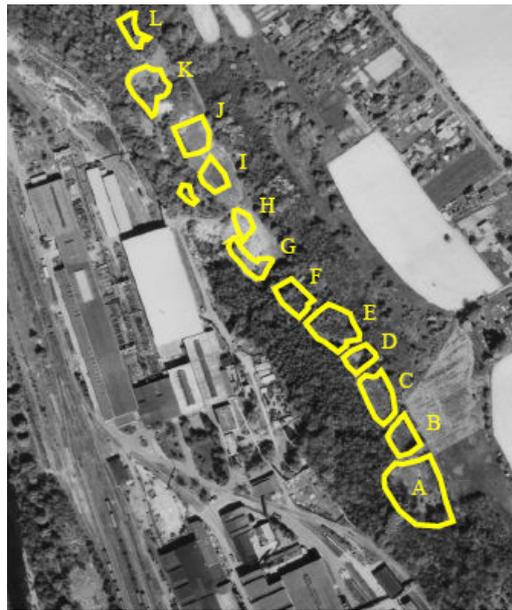
→ *Type 3.2.2.4.2*

Le type 3.2.2.4.2 correspond à des sites de lagunes de grande taille liée à la pyrolyse de la houille (terme source de 50 à 150000 tonnes). Le terme source est constitué par des goudrons accompagnés par d'autres déchets. Les lagunes sont remblayées par des matériaux terrigènes. Ce type est représenté par le site du complexe sidérurgique de Frydek – Mistek en République Tchèque.

Ex<sub>13</sub> : Frydek - Mistek (République Tchèque), Figure-5.2

- Origine du terme source : pyrolyse de la houille (et métallurgie) ;
- Estimation du terme source : total estimé à 115639 tonnes (dont seulement 17615 tonnes de goudrons) ;
- Répartition du terme source : plusieurs sites de dépôt ;
- Nature du terme source : goudrons et autres déchets ;
- Accessibilité du terme source : lagunes remblayées par des matériaux terrigènes.

Figure-5.2 : Site de Frydek - Mistek (République Tchèque)



Frydek - Mistek est constitué par une guirlande de lagunes de taille réduite stockant un total de 115639 tonnes de déchets. Une grande variété de déchets (goudrons, sols contaminés, déchets de déconstruction contaminés, boues de procédés, déchets d'acides, déchets municipaux, cendres, scories et poussières) a été identifiée à l'intérieur des lagunes. Les goudrons seuls sont estimés à 10362 m<sup>3</sup> ou 17615 t. Le terme source des différentes lagunes est remblayé.

→ Type 3.2.2.?.2

Le type 3.2.2.?.2 est représenté par le site des lagunes de goudrons du site J. Il s'agit de sites rattachés à la pyrolyse de la houille dont le terme source est estimé entre 50000 et 100000 tonnes. Le terme source est disséminé sous la forme de plusieurs sites de dépôts. Il est constitué par des goudrons dont l'acidité n'est pas documentée et des déchets autres. Les dépôts sont partiellement ou totalement recouverts par des matériaux terrigènes.

#### Ex<sub>14</sub> : Site J (Département 13, France)

- Origine du terme source : pyrolyse de la houille ;
- Estimation du terme source : environ 50000 m<sup>3</sup> dont 330 tonnes de goudrons ;
- Répartition du terme source : multiples dépôts ;
- Nature du terme source : goudrons autres et autres déchets (sols pollués), acidité des goudrons non précisée ;
- Accessibilité du terme source : directement accessible et localement recouverts par des remblais.

La principale activité du site J (France) est liée à la distillation des goudrons de houille. En exploitation, l'établissement disposait de fosses à brais, de bacs à goudrons bruts, ainsi que des réservoirs de stockage d'huiles de distillation et de produits benzéniques. Après arrêt définitif de cette activité, un atelier de fabrication d'engrais phosphaté a été exploité. Des études de diagnostic ainsi qu'une réhabilitation complète ont été engagées.

Les goudrons ont été retrouvés sous forme de poches disséminées de manière irrégulière sur le site. L'acidité des goudrons n'est pas précisée au sein de la documentation disponible. Les sols et la nappe du site sont contaminés par les hydrocarbures aromatiques polycycliques et les composés aromatiques volatils. Le terme source est estimé à environ 50000 m<sup>3</sup> ou 80000 tonnes dont 330 tonnes de goudrons solides ou liquides.

La réhabilitation a consisté en un stockage d'environ 23000 m<sup>3</sup> de terres polluées stabilisées à la chaux au sein d'une cellule de confinement. En parallèle, un tonnage réduit de goudrons (environ 330 tonnes) a été excavé et traité par incinération. Le reste des terres contaminées a été traité par voie biologique après épandage en andains sur site.

→ *Type 3.3.2.1.2*

Le type 3.3.2.1.2 est représenté par le site des lagunes de goudrons du site J. Il s'agit de sites de taille intermédiaire issus de la pyrolyse de la houille avec un terme source compris entre 10000 et 50000 tonnes. Plusieurs sites de dépôts sont présents. Chaque site est comblé par des goudrons acides (seuls), partiellement ou totalement recouverts par des matériaux terrigènes.

#### Ex<sub>15</sub> : Site K (France)

- Origine du terme source : pyrolyse de la houille ;
- Estimation du terme source : total compris entre 11700 à 11925 m<sup>3</sup> suivant les estimations, soit de 18720 à 19080 tonnes ;
- Répartition du terme source : 2 mares (une mare Nord, une mare Sud) ;
- Nature du terme source : goudrons acides seuls (pas d'autres déchets rapportés) ;
- Accessibilité du terme source : lagune Nord avec goudrons directement accessibles, lagune Sud avec goudrons pour partie recouverts (épaisseur du recouvrement entre 1 et 5 m suivant les secteurs).

Le site K (France) est un ancien site de lagune localisée à proximité d'une cokerie aujourd'hui démantelée. Les goudrons acides ont été déposés à l'intérieur de petites mares se déplaçant au fur et à mesure de leur comblement. Avec la fin du remplissage, on ne distingue plus qu'une mare Nord et une mare Sud. Les épaisseurs de goudrons n'excèdent pas 1 mètre. Les études réalisées sur ce site ne rapportent pas la présence d'autres catégories de déchets présents. Aucun résultat d'analyse physico-chimique n'est disponible au sein de la documentation disponible.

### 5.3.3 – Origines autres

Les sites identifiés à ce jour correspondent à deux situations différentes :

- les dépressions topographiques où cuvettes ouvertes où se juxtaposent déchets d'hydrocarbures et déchets aqueux (ex : lagune de déballastage de Brest, 29) ;
- les espaces naturels (marais, estuaires) dont les sédiments sont contaminés par les hydrocarbures apportés par les rejets d'établissements proches (ex : lagune de Sydney, Canada). Dans ce dernier cas, la lame d'eau (propre) n'est pas incorporée au terme source, différence avec, par exemple, le type 2.2.1.2.1.

#### → Type 5.1.2.6.3

Le type 5.1.2.6.3 est représenté par la lagune de Sydney en Nouvelle Ecosse (Canada) dont les caractéristiques (surface occupée, tonnages de sédiments pollués) sont exceptionnelles. Les sites de lagunes ont une origine autre que celles liées à l'exploration et la production pétrolière, le raffinage du pétrole, la pyrolyse de la houille et les accidents. Le terme source est > à 150 000 tonnes qui se répartissent sur deux lagunes distinctes. Il est constitué par des sédiments contaminés par des hydrocarbures (autres que les goudrons) accompagnés par d'autres substances.

Ex<sub>16</sub> : Sydney, (Nouvelle Ecosse, Canada), Figure-5.3

- Origine du terme source : rejets non contrôlés d'un site industriel exploitant des fours à coke ;
- Volume total du terme source : 700000 tonnes ;
- Répartition du terme source : 2 lagunes distinctes ;
- Nature du terme source : sédiments de fond d'estuaire contaminés par les hydrocarbures (HAP, BTEX) et d'autres composés (PCB, métaux) ;
- Accessibilité du terme source : Totalemment sous eau (profondeur > 10 m).

Figure-5.3 : Lagune de Sydney (Nouvelle Ecosse, Canada)



La lagune de Sydney (Nouvelle Ecosse, Canada) est située en bordure d'un ancien site sidérurgique (Sydney Steel Corporation) implanté en 1912. Divisée en deux (lagune Sud, lagune Nord) (surface totale 31 ha), le site est un estuaire ouvert sur l'Atlantique. Les deux lagunes renferment une quantité considérable de sédiments pollués par les HAP (700000 tonnes et plus) auxquels sont associés des BTEX, des PCB, ainsi que des métaux dont l'arsenic et le zinc. Les contaminants ont été transférés par les rejets non contrôlés du site sidérurgique proche (fonderie, cokerie). Ce site de lagunes a fait l'objet de très nombreuses études et sa réhabilitation doit débuter au cours des prochaines années.

→ *Type 5.4.1.5.3*

Le type 5.4.1.5.3 est similaire au type précédant mais ses dimensions sont beaucoup plus réduites. Il s'agit de lagunes naturelles dont les sédiments sont contaminés par des hydrocarbures issus d'une exploitation voisine. Le terme source est inférieur à 10000 tonnes qui se répartissent au niveau d'une seule lagune. Cette dernière est recouverte par une lame d'eau dont l'épaisseur est réduite (< 2 m).

Ex<sub>17</sub> : Site L (Outre mer, France)

- Origine terme source : rejets non contrôlés issus d'une centrale thermique voisine ;
- Volume total terme source : < 10000 tonnes ;
- Répartition du terme source : 1 seule lagune ;
- Nature du terme source : sédiments contaminés par les hydrocarbures (HAP) et d'autres composés (métaux) ;
- Accessibilité du terme source : profondeur inférieure à 2 m.

Le site L est un marais dont les sédiments sont contaminés par les hydrocarbures lourds (HAP). Le marais est recouvert par une lame d'eau dont l'épaisseur fluctue en fonction des

saisons sans excéder 2 m. Les études de diagnostic ont montré que le tonnage de sédiments contaminés était inférieur à 10000 tonnes. Le terme source est localisé à la sortie du point de rejet des eaux pluviales.

→ *Type 5.2.1.6.1*

Le type 5.2.1.6.1 est défini par un terme source ayant une « origine autre » compris entre 50000 et 150000 tonnes. Le terme source est constitué par des hydrocarbures autres que les goudrons. Les hydrocarbures sont accompagnés par d'autres déchets incluant des déchets aqueux. Le terme source est localisé au niveau d'une seule lagune. Son épaisseur est comprise entre 2 et 10 m. Ce type est représenté par le site M en Belgique.

Ex<sub>18</sub> : Site M (Belgique), Figure-5.4 ; Figure-5.5

- Origine du terme source : décharge externe ;
- Estimation du terme source : 65000 tonnes dont 15000 tonnes de déchets de fuel et 50000 m<sup>3</sup> d'eau contaminée par le fuel ;
- Répartition du terme source : 1 seule lagune ;
- Nature du terme source : déchets de fuel, autres déchets (graisses de mouton), déchets aqueux ;
- Accessibilité du terme source : profondeur de la lagune comprise entre 2 et 10 m.

Figure-5.4 : Lagune du site M (Belgique)



Figure-5.5 : Graisses flottant sur les déchets de fuel (Lagune du site M, Belgique)



Le site M (Belgique) (environ 1 ha) était initialement une ancienne carrière de roches molles qui fut ensuite exploitée comme décharge externe par la sidérurgie du bassin liégeois. La lagune a été réhabilitée au début des années 2000.

Le terme source y était constitué par des déchets de fuel (épaisseur 1,5 m environ) surnageant au sommet d'une couche d'eau (épaisseur 5 m environ). D'autres déchets industriels y étaient associés (graisses de mouton utilisés par les laminoirs sous la forme de « radeaux » flottants au sommet du fuel). Le terme source était directement accessible autorisant la reprise des déchets par pompage pour un traitement en incinération (déchets de fioul) ou en station d'épuration (déchets aqueux).

→ Type 5.3.1.6.2

Le type 5.3.1.6.2 correspond à des lagunes à hydrocarbures ayant une « origine autre » caractérisée par un terme source compris entre 10000 et 50000 tonnes. Ce dernier se répartit au niveau d'une seule lagune stockant des hydrocarbures autres que des goudrons. Les hydrocarbures sont accompagnés par d'autres déchets. Comme pour le type précédent, le terme source comprend une couche de déchets aqueux localisée sous les hydrocarbures. Le fond de la lagune est occupé par des sédiments contaminés.

Ex<sub>19</sub> : Brest (Département 29, France), Figure-5.6

- Origine du terme source : stockage des déchets de fioul des navires ;
- Volume total du terme source : environ 8800 m<sup>3</sup> de déchets de fioul, 14000 m<sup>3</sup> de boues et sédiments contaminés par le fuel, 11000 m<sup>3</sup> d'eau boueuse ;
- Répartition du terme source : 1 seule lagune ;
- Nature du terme source : fuel, eau, sédiments ;
- Accessibilité du terme source : profondeur comprise entre 2 et 10 m.

Figure-5.6 : Lagune de Brest (France)



La lagune de Brest (environ 2,2 ha) a été exploitée entre la fin des années 1970 et la fin des années 1990 comme site de déballastage des navires à quai. Elle est située à l'arrière du port du Moulin-Blanc. La lagune a été réhabilitée en 2005.

Le terme source était composé une couche de fioul d'environ 8000 tonnes surnageants sur une phase aqueuse. Le fond de la lagune était occupé par des matériaux de consistance pâteuse à semi – liquide contenant jusqu'à 35% d'hydrocarbures. La profondeur de la lagune était d'environ 1,5 m.

Le terme source était directement accessible, les déchets de consistance suffisamment liquide ont été repris par pompage pour un traitement externe. Les autres déchets (plus de 23000 m<sup>3</sup> soit environ 32200 tonnes) ont été laissés en place et stabilisés par injection d'un coulis par Solétanche Bachy / Inertec et malaxage in-situ. Le site a été ensuite recouvert par une couche de matériaux sains afin de rendre la zone constructible (usage industriel).

## 5.4 – Synthèse

Le Tableau-5.8 fait la synthèse de la typologie des sites inventoriés.

Tableau-5.8 : Synthèse de la typologie des sites inventoriés

Type	Origine	Caractéristiques	Site de lagune
2.1.2.2.1	Raffinage des produits pétroliers	Très grande taille, plusieurs sites de dépôt, goudrons acides et autres déchets, terme source directement accessible	Ex <sub>1</sub> : Site A (Belgique)
2.1.2.?.?	Raffinage des produits pétroliers	Très grande taille, goudrons acides et autres déchets, répartition et accessibilité du terme non documentée	Ex <sub>2</sub> : Lviv (Ukraine)
2.2.1.2.1	Raffinage des produits pétroliers (benzol)	Grande taille, site de dépôt unique, goudrons acides et autres déchets, remblaiement partiel du terme source (peut incorporer une lame d'eau acide)	Ex <sub>3</sub> : Site B (RU)
	Raffinage des produits pétroliers (benzol)		Ex <sub>4</sub> : Site C (RU)
2.2.2.2.1	Raffinage des produits pétroliers (huiles usées)	Grande taille, plusieurs sites, goudrons acides et autres déchets, terme source directement accessible (peut incorporer une lame d'eau)	Ex <sub>5</sub> : Cinderhills (Derbyshire, RU)
2.3.1.2.2	Raffinage des produits pétroliers (solvants, huiles, paraffines)	Taille intermédiaire, site de dépôt unique, goudrons acides et autres déchets, remblaiement quasi total	Ex <sub>6</sub> : Site D (France métropolitaine)
2.3.2.2.2	Raffinage des produits pétroliers	Taille intermédiaire, plusieurs sites de dépôt, goudrons acides et autres déchets, lagunes totalement remblayées	Ex <sub>7</sub> : Site E (France métropolitaine)
	Raffinage des produits pétroliers		Ex <sub>8</sub> : Site F (France métropolitaine)
2.4.2.2.2	Raffinage des produits pétroliers	Petite taille, plusieurs sites de dépôt, goudrons acides et autres déchets, lagunes totalement remblayées	Ex <sub>9</sub> : Site G (France métropolitaine)
	Raffinage des produits pétroliers		Ex <sub>10</sub> : Site H (France métropolitaine)
2.4.1.2.1	Raffinage des produits pétroliers (Re raffinage des huiles usées ?)	Petite taille, une seule lagune, goudrons acides et autres déchets, terme source directement accessible	Ex <sub>11</sub> : Décharge Lemahieu (France métropolitaine)
2.4.1.2.?	Raffinage des produits pétroliers (solvants et huiles minérales)	Petite taille, site de dépôt unique, goudrons acides et autres déchets, accessibilité non documentée	Ex <sub>12</sub> : Site I (France métropolitaine)
3.2.2.4.2	Pyrolyse de la houille (et métallurgie)	Grande taille, plusieurs sites de dépôt, goudrons et autres déchets, recouverts par des matériaux terrigènes	Ex <sub>13</sub> : Frydek - Mistek (République Tchèque)
3.2.2.?.2	Pyrolyse de la houille (distillation de goudrons de houille)	Taille intermédiaire, plusieurs sites de dépôt, acidité des goudrons non précisée, partiellement recouverts par des matériaux	Ex <sub>14</sub> : Site J (France métropolitaine)
3.3.2.1.2	Pyrolyse de la houille (cokerie sidérurgique)	Taille intermédiaire, plusieurs sites de dépôt, goudrons acides seuls, partiellement recouverts par des matériaux	Ex <sub>15</sub> : Site K (France métropolitaine)
5.1.2.6.3	Origines autres (rejets non contrôlés issus d'un complexe sidérurgique)	Très grande taille, plusieurs lagunes, sédiments contaminés par des hydrocarbures et autres substances, terme sous sous eau	Ex <sub>16</sub> : Sydney (Nouvelle Ecosse, Canada)
5.4.1.5.3	Origines autres (rejets non contrôlés)	Petite taille, une seule lagune, hydrocarbures autres que des goudrons accompagnés, terme source sous eau	Ex <sub>17</sub> : L (France, outre-mer)
5.2.1.6.1	Origines autres (décharge externe)	Grande taille, une seule lagune, hydrocarbures autres que des goudrons accompagnés par d'autres déchets, directement accessible	Ex <sub>18</sub> : Site M (Belgique)
5.3.1.6.2	Origines autres (station de déballastage)	Taille intermédiaire, une seule lagune, hydrocarbures autres que des goudrons accompagnés par d'autres déchets, accessible	Ex <sub>19</sub> : Brest (France métropolitaine)

## **6 – Limites de la typologie**

Les limites de l'étude réalisée résident dans la rareté des informations publiées, la nature dispersée et cloisonnée des informations existantes (pour être exhaustif, il conviendrait d'organiser une réunion avec chaque exploitant de site de lagune), les caractéristiques rapportées par la littérature qui ne se recouvrent pas toujours d'un auteur à un autre pour un même site, ainsi que dans la taille réduite de l'échantillon constituant la base de la typologie (19 sites de lagunes). La méthodologie propose néanmoins de s'affranchir de la taille de l'échantillon en élaborant une typologie à partir d'un nombre limité de critères discriminants appliqués au seul terme source (origine, tonnage, répartition, nature, accessibilité).

## **7 – Sujet d'étude proposé à la suite des parties 1 et 2**

Le sujet proposé comprend l'élaboration d'un protocole de caractérisation complet (volumes ; compositions chimiques), l'application de ce protocole à un nombre limité de sites pilotes sélectionnés pour leur intérêt, puis la recherche des contraintes et opportunités de réhabilitation mises en évidence par les résultats de la caractérisation.

Il suppose la possibilité d'assurer des investigations grandeur nature sur les sites pilotes et / ou, en complément d'investigations en partie déjà réalisées (ex : Noyelles-sous-Bellonne). Sauf cas particulier, les sites pour lesquels les connaissances historiques (évolution des procédés et des produits, ancienneté des dépôts) sont détaillées seront privilégiés au dépend de ceux pour lesquels peu d'informations sont disponibles.

Le sujet comprend une étape de prélèvements d'échantillons en vue de l'application d'un programme d'analyses très complet au laboratoire. Le prélèvement des échantillons sera réalisé après la délimitation des grandes hétérogénéités affectant les volumes et les masses stockés. Au laboratoire, sera défini un programme d'analyses étendu et standardisé destiné à couvrir, entre autres, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (16 EPA et autres HAP), les hydrocarbures extractibles aux solvants (cyclohexane/acétone ; dichlorométhane), ainsi que les hydrocarbures non extractibles avec ces mêmes solvants. Ce programme sera arrêté après un examen détaillé des difficultés pouvant être rencontrées lors du processus analytique appliqué aux échantillons de goudrons (lié par exemple à la viscosité élevée des produits).

Le passage des résultats de la caractérisation aux contraintes et opportunités de réhabilitation comme finalité du projet suppose d'établir préalablement une revue des procédés aujourd'hui appliqués. Ceux-ci appartiennent à deux grandes catégories : la stabilisation par malaxage in-situ des goudrons avec un produit défini, et le traitement thermique hors site (incinération). Des pistes de valorisation comme combustibles ou comme produit entrant dans la composition des bitumes routiers ont été étudiées mais ne se sont

pas traduits concrètement. La revue des procédés se fera grâce à une analyse de la littérature disponible incluant les documents issus des sites récemment traités. Un lien sera recherché avec les entreprises opérant au niveau Européen, et notamment, en Allemagne.

## **8 – Revue des méthodes géophysiques applicables à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures**

Le présent chapitre résume, sous forme de fiches, l'ensemble des méthodes géophysiques applicables à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures (une fiche par méthode). Un certain nombre de documents annexes sont également fournis : un tableau de synthèse, un tableau d'adéquation des méthodes aux différents critères de caractérisation des lagunes, ainsi que trois fiches présentant deux exemples d'études multi-méthodes.

### **8.1 – Fiches de synthèse des méthodes géophysiques applicables à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures**

#### **8.1.1 – Présentation des fiches**

Chaque fiche fournit dans des encadrés distincts :

- Le nom de la méthode,
- Le principe physique général,
- La forme des résultats obtenus,
- Un ensemble de données techniques : paramètre étudié et unités, profondeur d'investigation, matériel utilisé et mode de mise en œuvre,
- Les contraintes de la méthode, générales, spécifiques à la mise en œuvre en milieu aquatique, ou liées au tubage pour les méthodes en forage,
- Les applications de la méthode : études structurales, de faciès ou études directes de pollution, ainsi que l'aptitude de la méthode au monitoring,
- Enfin, des données pratiques relatives aux coûts.

#### **8.1.2 – Contraintes HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement)**

L'attribution d'une sous-section à la seule composante HSE vient du fait que son importance est primordiale dans le cadre d'investigations géophysiques sur des sites tels que les lagunes à hydrocarbures. En effet, la présence de produits dangereux ou potentiellement dangereux (acides, goudrons, composées chimiques néfastes sur la santé...), ou tout simplement l'environnement à risques (présence d'une tranche d'eau au-dessus des lagunes ; boues ou émulsions affectant le déplacement du personnel) font que la contrainte HSE sera déterminante dans la mise en œuvre des méthodes géophysiques, ainsi que sur leur coût.

#### 8.1.2.1 – Contraintes liées à l'environnement et aux conditions d'accès aux lagunes.

Elles concernent essentiellement les lagunes où le terme source est directement accessible et où il n'existe pas de recouvrement permettant le passage du personnel à pied sec.

Dans ce cas, plusieurs façons de procéder peuvent être envisagées :

- Navigation au-dessus d'une tranche d'eau à l'aide d'embarcations, ou plateformes sécurisées.
- Passage de câbles porteurs au-dessus de la lagune pour transporter le matériel géophysique lors de la réalisation des mesures.
- Construction de passerelles (méthode dite du « bridging » utilisée en exploration pétrolière).

En milieu aquatique, les consignes de sécurité HSE favorisent plutôt le passage de câbles au-dessus de la lagune (exposition aux risques du matériel seul), plus sûr par rapport à la mise en œuvre de moyens de navigation (exposition du personnel aux risques).

#### 8.1.2.2 – Contraintes liées à la présence de composés chimiques nocifs à la santé.

Comme précédemment, elles concernent essentiellement les lagunes dont le terme source est directement accessible, sans présence de recouvrement. Ces contraintes nécessitent alors le port de protections personnelles adaptées.

#### 8.1.2.3 – Contraintes intrinsèques à la mise en œuvre des méthodes géophysiques.

Certaines méthodes géophysiques peuvent interférer de façon dangereuse avec les produits constitutifs des lagunes à hydrocarbures. Les méthodes concernées sont essentiellement :

- La méthode sismique : l'utilisation des sources sismiques de type explosif ou électrique, pouvant réagir avec les composés des lagunes à hydrocarbures, est exclue. Seules les sources de type chute de poids pourront être utilisées.
- La méthode électrique et ses méthodes dérivées : cette méthode nécessite l'envoi de courant électrique dans le sol, susceptible de dégager par électrolyse, des produits dangereux (risque d'explosion). Ceci concerne principalement les techniques où l'injection de courant ne se fait pas à l'air libre mais dans un forage comme pour la méthode dite de « la mise à la masse ».

Au vu de ces contraintes HSE, il est clair que les méthodes géophysique sont beaucoup plus faciles d'utilisation sur des sites accessibles à pied ferme.

### 8.1.3 – Influence de la maille de mesure (espacement entre points ou profils de mesures)

La maille de mesures ou l'espacement entre profils de mesures sont directement liés à la résolution désirée ; la résolution étant le paramètre déterminant les dimensions des plus petites anomalies détectables. Plus les profils ou points de mesures seront proches, meilleure sera la résolution, et inversement.

D'une façon générale, dans le cadre des lagunes à hydrocarbures, des espacements entre profils ou stations de mesure de l'ordre de 5 à 10 m sont classiques. Ces espacements peuvent être réduits à 2-3 m pour des études de détail et élargis à 20-40 m dans le cas contraire.

En raison de l'impact sur les coûts, la surface à étudier est également un facteur influençant les dimensions de la maille de mesures. Si la surface à investiguer est grande (plusieurs dizaines d'hectares par exemple), la maille de mesures sera élargie afin de rester dans un volume de travaux (et un coût) raisonnable.

Enfin, à surface étudiée égale, le coût de chaque méthode influence également l'espacement entre stations ou profils de mesures. Une méthode rapide et légère sera plus facilement mise en œuvre à une maille plus resserrée qu'une méthode onéreuse.

### 8.1.4 – Coûts

Dans les fiches, les coûts de mise en œuvre des méthodes géophysiques proposés sont tout à fait indicatifs car ils sont principalement dépendants des volumes de travaux et des conditions de mise en œuvre.

Notamment, dans le cas des lagunes non accessibles de pied ferme, le prix de la géophysique devient insignifiant au regard des coûts engendrés par les contraintes HSE (Hygiène, Sécurité et Environnement).

D'une façon très schématique on retiendra que les méthodes pourraient être classées, par ordre de coût croissant, de la façon suivante :

- 1) Electromagnétisme EM 31 et magnétisme
- 2) Electromagnétisme EM 34 et Polarisation Spontanée
- 3) Panneau électrique
- 4) Radar
- 5) Méthode de la mise à la masse
- 6) Sismique réfraction
- 7) Microgravimétrie
- 8) Sismique réflexion

cette classification est très approximative, et sujette à variation d'une étude à une autre en fonction des conditions de mise en œuvre.

#### 8.1.5 – Autres remarques concernant la mise en œuvre des méthodes géophysiques

- Les profondeurs d'investigation sont toujours indiquées dans le contexte de l'application à la caractérisation des lagunes.
- L'efficacité de chaque méthode sera dépendante d'une part de ses contraintes propres, et d'autre part du contexte de chaque site. La liste des applications d'une méthode donnée reste théorique.
- Le « monitoring », ou contrôle suivi dans le temps, peut être envisagé de deux façons différentes : par instrumentation permanente de la zone d'étude, ou par interventions successives.
- L'étude des fonds de lagunes est souvent beaucoup plus difficile à réaliser que celle de leurs couvertures.

#### 8.1.6 – Fiches de synthèse

(pages suivantes)

**Fiche de synthèse de méthode géophysique applicable à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures**



**Résistivité électrique**

**Principe de la méthode**

La méthode électrique consiste à calculer la résistivité électrique des terrains à partir de la mesure du potentiel généré par la circulation dans le sous-sol d'un courant injecté en surface.

**Résultats obtenus**

Le **panneau électrique** permet d'obtenir des sections de résistivité traduisibles en termes géologiques. Le **sondage électrique** fournit une coupe verticale de résistivité à l'aplomb du point mesuré. Le **trainé électrique** fournit des profils de résistivité à une profondeur d'investigation fixée.

**Données techniques**

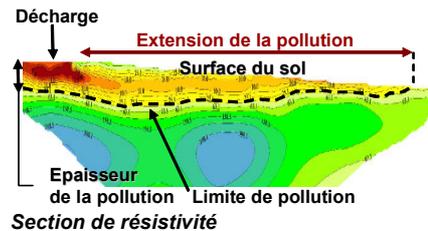
**Paramètre étudié :** résistivité électrique des terrains

**Unité :** ohm-mètre (ohm.m)

**Profondeur d'investigation :** 0-50 m

**Dispositif / mise en œuvre :** les dispositifs sont de 3 types :

- Dispositif du panneau électrique : résistivimètre relié à un système de câbles à sorties multiples, connectées à des électrodes espacées régulièrement (entre 2 et 5 m dans le contexte des lagunes), implantées à la surface du sol. L'appareil exploite automatiquement selon une séquence prédéfinie toutes les positions d'émission et de réception possibles sur ces électrodes pour couvrir la zone d'étude tant latéralement qu'en profondeur.
- Dispositif de sondage électrique : cas particulier du panneau à 4 électrodes.
- Dispositif du trainé électrique : cas particulier du panneau à 4 électrodes d'espacement invariable, translaté en surface (profondeur d'investigation fixée).



**Contraintes**

**Général :** les méthodes électriques sont sensibles aux perturbations électriques : canalisations métalliques et câbles enterrés.

**Milieu aquatique :** la méthode est applicable et nécessite alors l'utilisation de câbles spécifiques immergés (étanches, sans nécessité d'implantation d'électrodes), ainsi que des moyens de navigation ou de passage de câbles à l'aplomb de la lagune.

**Applications**

- **Etudes structurales**
  - Détermination de la géométrie des lagunes : *profondeur, extension latérale, présence d'alvéoles, épaisseur des goudrons et de leur recouvrement, détection de remontées de goudrons acides à travers la couverture.*
  - Détection d'accidents : *failles, fuites de digues pouvant drainer la pollution.*
- **Etudes de faciès**
  - Etude du contenu des lagunes : *corps autres que les goudrons (fûts, déchets...)*
  - Etude de l'étanchéité des terrains encaissants : *détection des variations affectant la couverture et/ou le fond de lagune (plus difficile pour le fond de lagune).*
  - Etude de l'étanchéité des digues : *détection d'interfaces de matériaux constitutifs de la digue, détection de vides et de circulation d'eau.*
- **Etude directe de pollution**
  - Cartographie d'un « plumeau » de pollution en aval de lagune (anomalie conductrice).
- **Monitoring**
  - Méthode bien adaptée au suivi dans le temps du plumeau de pollution conducteur en aval de la lagune. Attention, le monitoring est réalisé en suivant les variations de résistivité dans le temps. Il est par conséquent lié au caractère conducteur du terme source. Si ce dernier est résistant, le monitoring s'applique mal.

**Données pratiques**

	<b>Unité de vente :</b>	<b>Coût moyen :</b>
Panneau électrique	au mètre	20 € le mètre
Sondage électrique	à l'unité	150 € l'unité
Trainé électrique	au point de mesure	10 € l'unité

## Fiche de synthèse de méthode géophysique applicable à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures



### Polarisation provoquée

#### Principe de la méthode

La méthode de la polarisation provoquée (PP) consiste à mesurer l'effet capacitif des matériaux constitutifs du sous-sol en injectant un courant électrique, puis en étudiant les courants de dépolarisation après arrêt de l'injection.

#### Résultats obtenus

Les résultats sont représentés sous forme de coupe (section) de chargeabilité ; éventuellement sous forme de coupe verticale de chargeabilité dans le cas d'un sondage PP, voire de carte dans le cas du profilage.

#### Données techniques

**Paramètre étudié :** chargeabilité des terrains

**Unité :** le millivolt mesuré par volt injecté (mV/V), équivalent au « pour mille »

**Profondeur d'investigation :** 0-30 m

**Dispositif et mise en œuvre :** Les mesures de PP sont généralement réalisées en même temps que les mesures de résistivité, avec le dispositif du panneau électrique : appareil relié à un système de câbles à sorties multiples, connectées à des électrodes espacées régulièrement (entre 2 et 5 m dans le contexte des lagunes), implantées à la surface du sol. L'appareil exploite automatiquement selon une séquence prédéfinie toutes les positions d'émission et de réception possibles sur ces électrodes pour couvrir la zone d'étude tant latéralement qu'en profondeur.

Le même appareillage permet également de réaliser des sondages PP. Le dispositif ne nécessite alors que quatre électrodes mobiles, et l'information obtenue se résume à une coupe verticale de chargeabilité.



Enregistreur

#### Contraintes

**Général :** la PP est beaucoup plus sensible aux perturbations électriques industrielles que la résistivité (courants électriques, canalisations métalliques et câbles enterrés qui polarisent fortement). De plus, les terrains conducteurs limitent la profondeur d'investigation (milieux argileux ou à forte teneur en eau).

**Milieu aquatique :** tout comme l'électrique, la méthode est applicable à condition d'utiliser des câbles étanches spécifiques, qui reposeront au fond de la lame d'eau. La profondeur d'investigation est fortement affectée par l'épaisseur et la conductivité de l'eau, et la mise en œuvre nécessite des moyens de navigation ou de passage de câble à l'aplomb de la lagune.

#### Applications

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| - <b>Etudes structurales</b>        | - La PP apporte peu d'informations structurales.   |
| - <b>Etudes de faciès</b>           | - Etude du contenu des lagunes, avec discrimination des matériaux en fonction de leur polarisabilité : <i>corps autres que les goudrons (fûts, objets métalliques très polarisables)</i> |
| - <b>Etude directe de pollution</b> | - Cartographie d'un « plumeau » de pollution en aval de lagune.<br>- Détection directe des goudrons acides (polarisables).   |
| - <b>Monitoring</b>                 | - La méthode se prête au monitoring, mais reste d'une interprétation délicate.   |

#### Données pratiques

**Unité de vente :** au point de mesure

**Coût moyen :** 20 à 30 € le point de mesure

## Fiche de synthèse de méthode géophysique applicable à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures



### Polarisation spontanée

#### Principe de la méthode

La méthode de la polarisation spontanée (PS) consiste à mesurer les différences de potentiel liées aux courants existant naturellement dans le sous-sol.

#### Résultats obtenus

Les résultats obtenus sont des cartes représentant des courbes d'iso-potentiel, déterminées par rapport à une électrode de référence.

#### Données techniques

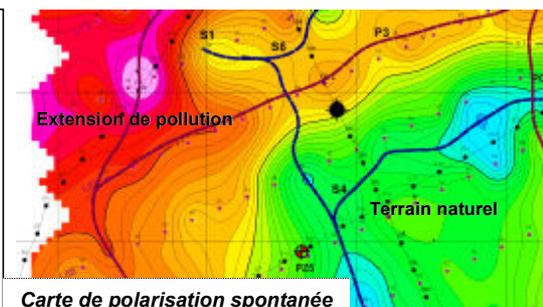
**Paramètre étudié :** différence de potentiel

**Unité :** le millivolt (mV)

**Profondeur d'investigation :** 0-50 m

**Dispositif et mise en œuvre :** Les mesures de PS sont réalisées à l'aide d'un appareillage de mesure électrique classique (type voltmètre), par mesure de la différence de potentiel existant entre une électrode fixe de référence, et une électrode mobile se déplaçant à intervalle régulier le long de profils. Les électrodes utilisées sont non polarisables.

Ces mesures peuvent être enregistrées en même temps que le panneau de résistivité, en utilisant le dispositif de ce dernier. Toutefois, cette procédure d'acquisition fournit des résultats moins précis.



Carte de polarisation spontanée



Enregistreur

#### Contraintes

**Général :** la PS est très sensible aux perturbations électriques, naturelles ou industrielles (courants électriques, prises de terre).

**Milieu aquatique :** généralement non applicable.

#### Applications

- **Etudes structurales** - La PS n'est en général pas adaptée à la fourniture d'informations structurales.
- **Etudes de faciès** - Peut mettre en évidence des variations lithologiques affectant les terrains (passages de sables à des argiles).  
- La PS est bien adaptée à la mise en évidence de circulation d'eau (saine ou polluée)  
- Détection d'accidents : *fuites de digues pouvant drainer la pollution.*
- **Etude directe de pollution** - Cartographie d'un « plumeau » de pollution en aval de lagune.  
- Détection directe des goudrons acides, qui se traduisent par des différences de potentiel élevées à leur hauteur.
- **Monitoring** - Les mesures de PS se prêtent bien au suivi dans le temps de la pollution (plumeau de pollution ou goudrons acides), mais l'interprétation de leurs variations reste très délicate.

#### Données pratiques

**Unité de vente :** au point de mesure

**Coût moyen :** 10 € le point de mesure

## Fiche de synthèse de méthode géophysique applicable à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures



### Mise à la masse

#### Principe de la méthode

La mise à la masse consiste à mesurer la différence de potentiel engendrée par l'injection de courant dans un corps conducteur.

#### Résultats obtenus

Les résultats obtenus sont des cartes représentant des courbes d'iso-potential par rapport à une électrode de référence.

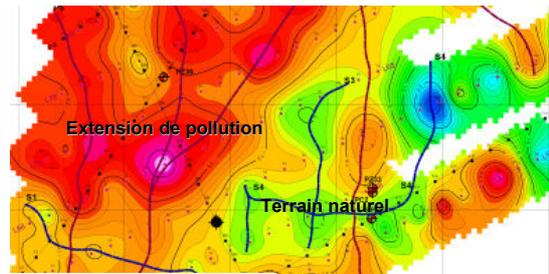
#### Données techniques

**Paramètre étudié :** différence de potentiel relative à un courant

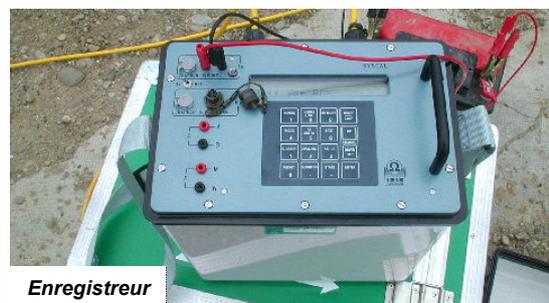
**Unité :** le milliVolt par Ampère (mV/A)

**Profondeur d'investigation :** 0-30 m

**Dispositif et mise en œuvre :** Les mesures de mise à la masse sont réalisées à l'aide d'un appareillage de mesure électrique classique. Un courant électrique est injecté à l'aide d'une électrode dans le corps étudié; soit directement, soit par l'intermédiaire d'un forage recoupant ce dernier. Le second pôle (électrode) d'injection est placé à l'« infini » (quelques centaines de mètres). Le corps étudié étant très conducteur, il s'équilibre à un potentiel. Les courbes équipotentielles mesurées en surface à l'aide d'un second couple d'électrodes en dessinent ses contours.



Carte de mise à la masse



Enregistreur

#### Contraintes

**Général :** les mesures de mise à la masse sont très sensibles aux perturbations électriques, naturelles ou industrielles (courants électriques, prises de terre, ...). Si l'électrode d'injection de courant introduite dans le corps conducteur (goudrons acides, eau polluée) se fait par l'intermédiaire d'un forage, s'assurer que l'électrolyse des fluides ne risque pas de générer de gaz explosifs.

**Milieu aquatique :** généralement non applicable.

#### Applications

- |                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| - <b>Etudes structurales</b>        | - Détermination de la géométrie des lagunes : <i>extension latérale et contours de la lagune à goudrons acides.</i> |
| - <b>Etudes de faciès</b>           | - Pas d'application.  |
| - <b>Etude directe de pollution</b> | - Cartographie d'un « plumeau » de pollution conducteur en aval de lagune.  |
| - <b>Monitoring</b>                 | - La mise à la masse se prête bien au suivi dans le temps d'un plumeau de pollution conducteur.                     |

#### Données pratiques

**Unité de vente :** au point de mesure

**Coût moyen :** 30-50 € le point de mesure

**Fiche de synthèse de méthode géophysique applicable à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures**



**Electromagnétisme**

**Principe de la méthode**

La méthode électromagnétique (EM) consiste à calculer la conductivité électrique du sous-sol par l'étude du champ EM dit secondaire, émis par le sous-sol en réaction à l'application d'un champ primaire.

**Résultats obtenus**

Le **profilage électromagnétique** fournit des profils ou des cartes de conductivité.

Le **sondage électromagnétique** fournit une coupe verticale de conductivité.

**Données techniques**

**Paramètre étudié :** conductivité électrique des terrains

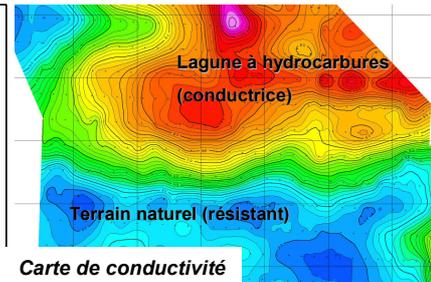
**Unité :** milliSiemens par mètre (mS/m)

**Dispositif / mise en œuvre :** deux types de dispositifs sont utilisés :

- Profilage ou cartographie électromagnétique : dispositifs visualisant les variations latérales de conductivité moyenne d'une tranche de terrain, jusqu'à une profondeur d'investigation fixe. Appareillage classique : EM31 (mesures point par point ou en continu) et EM34 (point par point)
- Sondage EM : dispositifs donnant une coupe verticale de conductivité. Emission et réception du champ EM transitoire via une boucle magnétique (de 5 à 50 m de côté pour une boucle carrée).

**Profondeur d'investigation :**

- 0-3, 0-6 m : EM31, selon configuration
- 0-6, 0-15, 0-30 m : EM34, selon configuration.
- 0-50 m : sondage EM



**Contraintes**

**Général :** les méthodes EM sont très sensibles (davantage que les méthodes électriques) aux perturbations industrielles (lignes électriques, câbles enterrés), ainsi qu'aux masses métalliques (canalisations, grillages...).

**Milieu aquatique :** inapplicable, à moins d'un aménagement lourd.

**Applications**

- **Etudes structurales**
  - Détermination de la géométrie des lagunes : *profondeur (sondage EM), extension latérale (EM31 –EM34), présence d'alvéoles, épaisseur des goudrons et de leur recouvrement (sondage EM).*
  - Détection d'accidents : *failles, fuites de digues pouvant drainer la pollution.*
- **Etudes de faciès**
  - Etude du contenu des lagunes : *corps autres que les goudrons (fûts, déchets...)*
  - Etude de l'étanchéité des terrains encaissants : *détection des variations affectant la couverture et/ou le fond de lagune (plus difficile pour le fond de lagune)*
  - Etude de l'étanchéité des digues : *caractérisation de l'hétérogénéité des matériaux constitutifs de la digue, détection de circulations d'eau*
- **Etude directe de pollution**
  - Cartographie d'un « plumeau » de pollution conducteur en aval de lagune, qui se caractérise généralement par une anomalie conductrice.
- **Monitoring**
  - Méthode bien adaptée au suivi dans le temps du plumeau de pollution conducteur en aval de la lagune. Attention, le monitoring est réalisé en suivant les variations de conductivité dans le temps. Il est par conséquent lié au caractère conducteur du terme source. Si ce dernier est résistant, le monitoring s'applique mal.

**Données pratiques**

- Sondage électromagnétique (TDEM)
- Profilage/Cartographie EM34
- Profilage/Cartographie EM31

**Unité de vente :**  
à l'unité  
au point de mesure  
au mètre / au point

**Coût moyen :**  
150 € l'unité  
10 € la mesure  
1€ le m / 3 € le point

## Fiche de synthèse de méthode géophysique applicable à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures



### Radar

#### Principe de la méthode

La méthode est basée sur la propagation dans le sol d'ondes radar émises depuis la surface. Elle étudie les réflexions de ces ondes sur les hétérogénéités du sous-sol.

#### Résultats obtenus

Les résultats sont représentés sous forme de sections radar, où les interfaces et hétérogénéités du sous-sol apparaissent sous forme de réflecteurs, interprétables en termes géologiques.

#### Données techniques

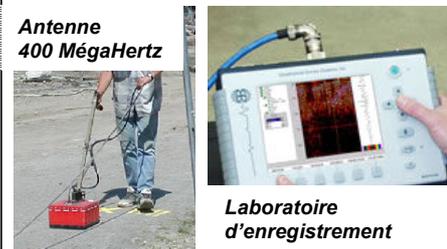
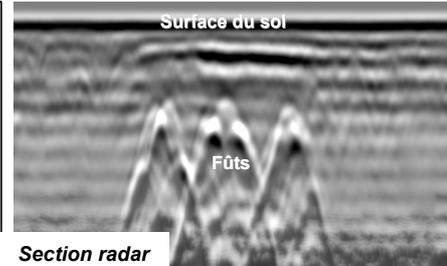
**Paramètres étudiés :** vitesse de propagation des ondes radar, ainsi que l'amplitude de leur réflexion sur les interfaces séparant des milieux de propriétés électromagnétiques (constante diélectrique) différentes

**Unité :** vitesse des ondes en centimètres par nanoseconde (cm/ns)

**Profondeur d'investigation :** 0-5 m.

La profondeur d'investigation du radar varie avec la conductivité des terrains (voir contraintes ci-dessous) et la fréquence émise. Les basses fréquences permettent une meilleure pénétration, mais entraînent une baisse de résolution verticale.

**Dispositif et mise en œuvre :** acquisition en continu le long de profils. Enregistreur portable, connecté à une antenne généralement traînée en surface.



#### Contraintes

**Général :** la conductivité des terrains est le principal facteur affectant la profondeur d'investigation du radar, qui est réduite en milieu conducteur (milieu argileux, humide, ou à la verticale d'éléments métalliques tels que ferrillages, plaques, déchets...). Inversement, plus le terrain est résistant, meilleure est la pénétration.

**Milieu aquatique :** La méthode est applicable en milieu aquatique avec des antennes spécifiques immergées. La profondeur d'investigation dépend alors de la conductivité de l'eau, et la mise en œuvre nécessite des moyens de navigation ou de passage de câble à l'aplomb de la lagune (antenne placée sur embarcation tractée ?).

#### Applications

- **Etudes structurales**
  - Détermination de la géométrie des lagunes : *extension latérale, présence d'alvéoles, recouvrement des goudrons, détection de remontées de goudrons acides à travers la couverture.*
  - Détection d'accidents : *failles, fuites de digues pouvant drainer la pollution.*
- **Etudes de faciès**
  - Etude du contenu des lagunes : *corps autres que les goudrons (fûts, déchets...)*
  - Etude de l'étanchéité des terrains encaissants : *détection des variations affectant la couverture de la lagune.*
  - Etude de l'étanchéité des digues : *détection d'interfaces de matériaux constitutifs de la digue, détection de vides et de circulations d'eau.*
- **Etude directe de pollution**
  - Cartographie d'un « plumeau » de pollution en aval de lagune, par analyse des variations de la pénétration des ondes radar.
- **Monitoring**
  - Possible, mais généralement peu utilisé (suivi de remontées de goudron). Compte tenu de la sensibilité du radar à la conductivité des matériaux, plus le terme source est conducteur, plus le monitoring est aisé.

#### Données pratiques

**Unité de vente :** au mètre  
**Coût moyen :** 10 € le mètre

## Fiche de synthèse de méthode géophysique applicable à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures



### Magnétisme

#### Principe de la méthode

Le magnétisme consiste à étudier le champ magnétique terrestre et ses perturbations.

#### Résultats obtenus

Les résultats sont représentés sous forme de profils ou de cartes mettant en évidence des anomalies du champ magnétique.

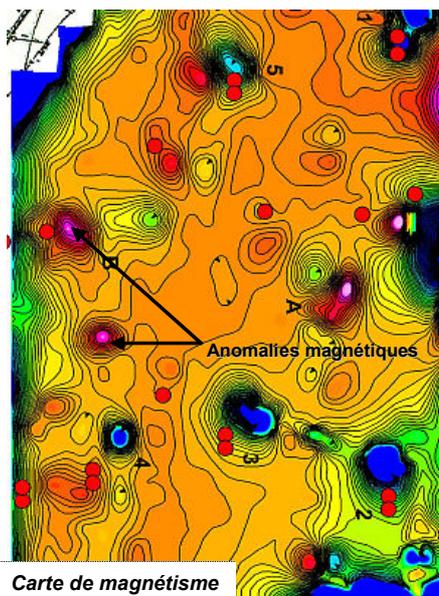
#### Données techniques

**Paramètre étudié :** champ magnétique terrestre total

**Unité :** le nanotesla

**Profondeur d'investigation :** 0-20 m pour les objets magnétiques de taille courante (fûts).

**Dispositif et mise en œuvre :** les mesures de magnétisme sont réalisées soit en continu, soit point par point le long de profils. L'appareil de mesure, appelé magnétomètre, est autonome et portable, manipulé par un seul opérateur.



Carte de magnétisme



Magnétomètre à protons

#### Contraintes

**Général :** les mesures de magnétisme sont très sensibles aux perturbations industrielles, dues notamment aux champs générés par les courants électriques, les canalisations métalliques et câbles enterrés, les clôtures, etc... (de même que toute autre masse magnétique non recherchée).

**Milieu aquatique :** la méthode est applicable avec des aménagements (câbles de traction non magnétiques, embarcation...).

#### Applications

- **Etudes structurales** - Méthode non adaptée.
- **Etudes de faciès** - Etude du contenu des lagunes : *détection de masses magnétiques et de corps métalliques autres que les goudrons (fûts, canalisations, citernes, cuves...)*.
- **Etude directe de pollution** - Méthode non adaptée.
- **Monitoring** - Méthode peu appliquée au monitoring.

#### Données pratiques

**Unité de vente :** à la station de mesure ou au mètre

**Coût moyen :** 5-10 € la station de mesure ou 2-3 € le mètre

## Fiche de synthèse de méthode géophysique applicable à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures



### Microgravimétrie

#### Principe de la méthode

La microgravimétrie consiste à étudier les variations de l'attraction terrestre en relation avec les variations de densité affectant les terrains superficiels.

#### Résultats obtenus

Les résultats obtenus sont représentés sous forme de cartes traduisant les variations de densité affectant les terrains superficiels.

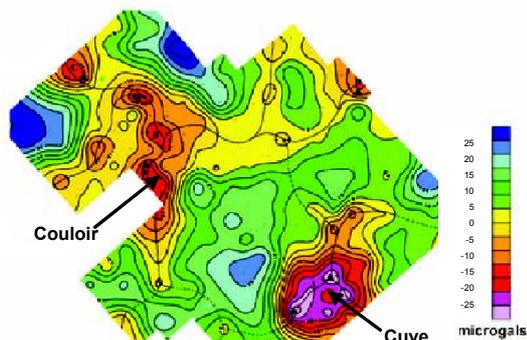
#### Données techniques

**Paramètre étudié :** attraction terrestre (accélération de la pesanteur) exprimée en microgals

**Unité :** le microgal ( $\mu\text{gal}$ ), avec  $1 \mu\text{gal} = 0,000001 \text{ gal}$ ,  
 $1 \text{ gal} = 1 \text{ cm/s}^2$

**Profondeur d'investigation :** 0-20 m

**Dispositif et mise en œuvre :** les mesures de microgravimétrie sont réalisées point par point suivant une maille généralement carrée, dont les dimensions sont adaptées à celles de l'objectif recherché (typiquement 3x3, 5x5 ou 7x7 mètres). En général, on admet que la maille de mesure ne doit pas excéder le double de la largeur des anomalies recherchées. Les mesures sont effectuées par un opérateur, à l'aide d'un appareil autonome et portatif appelé microgravimètre.



Carte d'anomalies gravimétriques



Microgravimètre

#### Contraintes

**Général :** la microgravimétrie est très sensible aux vibrations, issues notamment de la proximité d'activités industrielles.

**Milieu aquatique :** non applicable dans des conditions normales d'utilisation.

#### Applications

- **Etudes structurales** - Détermination de la géométrie des lagunes : *extension latérale d'une lagune sous recouvrement végétal, présence d'alvéoles, surcreusements.*
- **Etudes de faciès** - Détection de vides : *cuves, caves, citernes...*
- **Monitoring** - La microgravimétrie se prête bien au monitoring en général. Par contre, elle n'est pas applicable dans le cadre du monitoring des lagunes à hydrocarbures.

#### Données pratiques

**Unité de vente :** à la station (point) de mesure

**Coût moyen :** 30 €

**Fiche de synthèse de méthode géophysique applicable à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures**



**Sismique réfraction**

**Principe de la méthode**

La sismique réfraction consiste à étudier la propagation d'ondes sismiques (mécaniques) émises dans le sous-sol et réfractées au toit de couches plus dures.

**Résultats obtenus**

Les résultats obtenus sont représentés sous forme de coupes sismiques, où les terrains sont caractérisés par leur épaisseur et la vitesse des ondes en leur sein.

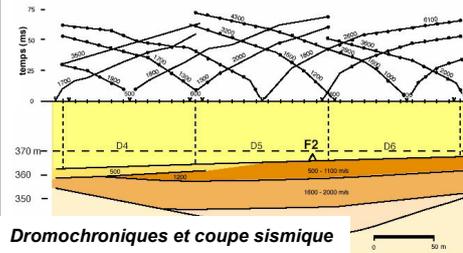
**Données techniques**

**Paramètre étudié :** vitesse des ondes sismiques

**Unité :** le mètre par seconde (m/s)

**Profondeur d'investigation :** 0-15 m

**Dispositif et mise en œuvre :** les mesures sont enregistrées le long de profils rectilignes. Chaque dispositif de mesure unitaire est appelé « base sismique ». Il comporte en général 24 capteurs (géophones), et 5 tirs sismiques (3 effectués sur base et 2 à l'extérieur), reliés à l'enregistreur par un câble (flûte) à 24 sorties espacées régulièrement (espacement entre géophones de 2,5 à 5 m dans le contexte des lagunes). Il existe plusieurs types de sources sismiques pour les tirs, chacun présentant avantages et inconvénients, tant du point de vue énergétique, qu'en terme de lourdeur et de dangerosité de mise en œuvre (par exemple, l'explosif nécessite de réaliser des forages d'environ 1 m de profondeur, alors que la frappe à la masse est moins contraignante, mais moins énergétique).



**Dromochroniques et coupe sismique**



**Exemple de source : masse**

**Enregistreur et géophone (haut)**

**Contraintes**

**Général :** pour que la sismique réfraction soit opérationnelle, il est nécessaire que la vitesse des terrains augmente avec la profondeur. La sismique réfraction ne permet donc pas la détection d'une couche tendre sous une couche dure. Cette méthode est très sensible aux vibrations (dues à la proximité d'infrastructures industrielles, urbaines, ou de routes à forte circulation). L'utilisation de sources sismiques de type explosif ou impacteur, qui donnent les meilleurs résultats en terme de profondeur d'investigation, pose des problèmes cruciaux de sécurité dans ce contexte (présence de composés inflammables ou explosifs).

**Milieu aquatique :** la méthode peut être envisagée au prix d'un alourdissement logistique important : utilisation de flûtes spécifiques équipées d'hydrophones, source marine spécifique (canon à air) ou enfouissement des charges explosives par forage.

**Applications**

- **Etudes structurales**
  - Détermination de la géométrie des lagunes : *calcul de la profondeur et de l'extension des lagunes, présence d'alvéoles.*
  - Calcul de l'épaisseur du recouvrement.
  - Etude d'accidents pouvant drainer les pollutions : *failles.*
- **Etudes de faciès**
  - Etude du contenu des lagunes, avec discrimination des matériaux en fonction de leur dureté, qui a une influence primordiale sur la vitesse des ondes sismiques.
  - Distinction entre couches consolidées et couches meubles.
- **Etude directe de pollution**
  - Méthode non adaptée à l'étude directe de pollution.
- **Monitoring**
  - Méthode mal adaptée au monitoring.

**Données pratiques**

**Unité de vente :** base sismique

**Coût moyen :** 1000 € (applicable pour une base de 115 m de long)

## Fiche de synthèse de méthode géophysique applicable à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures



### Sismique réflexion

#### Principe de la méthode

La sismique réflexion consiste à étudier la propagation d'ondes sismiques émises dans le sous-sol et réfléchies aux interfaces entre couches.

#### Résultats obtenus

Ils sont représentés sous forme de sections sismiques, où les interfaces et hétérogénéités du sous-sol apparaissent sous forme de réflecteurs, interprétables en termes géologiques

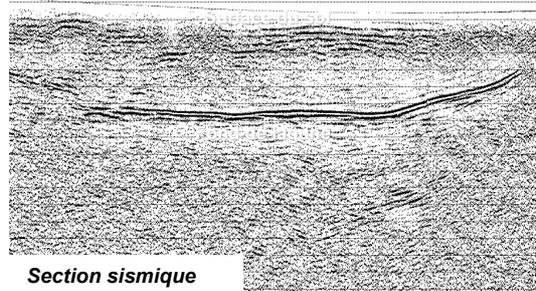
#### Données techniques

**Paramètre étudié :** vitesse, amplitude et fréquence des ondes sismiques

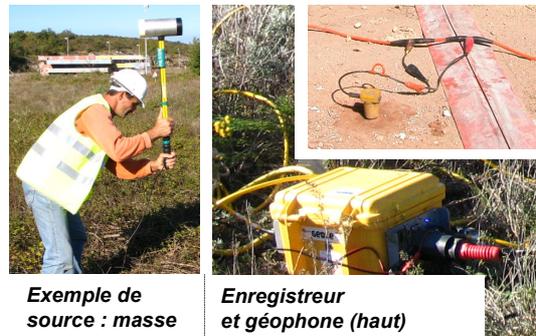
**Unité :** vitesse en mètres par seconde (m/s), fréquence en Hertz (Hz)

**Profondeur d'investigation :** 5-50 m

**Dispositif et mise en œuvre :** les mesures de sismique réflexion sont enregistrées en pseudo-continu, le long de profils plus ou moins rectilignes. Chaque dispositif de mesure unitaire comporte habituellement 24 ou 48 récepteurs (géophones), reliés aux enregistreurs par des câbles (flûtes) à 12 sorties espacées régulièrement (entre 1 et 2 m dans le contexte des lagunes). Un tir sismique est effectué entre chaque couple de géophones successifs. La source sismique la plus couramment utilisée est la masse (marteau). Possibilité d'utiliser un impacteur à cartouches (explosif faible). La méthode requiert une énergie plus faible que la sismique réfraction.



Section sismique



Exemple de source : masse

Enregistreur et géophone (haut)

#### Contraintes

**Général :** la sismique réflexion est très sensible aux vibrations (dus à la proximité d'infrastructures industrielles, urbaines, ou de routes à forte circulation). Elle est davantage orientée vers l'étude des terrains profonds, situés au-delà de 5-10 m de profondeur. La méthode est d'une mise en œuvre lourde et lente.

**Milieu aquatique :** la méthode peut être envisagée, au prix d'un alourdissement logistique important : utilisation de flûtes spécifiques équipées d'hydrophones, source marine spécifique (canon à air) ou enfouissement des charges explosives par forage.

#### Applications

- **Etudes structurales**
  - Détermination de la géométrie de lagunes profondes (au-delà de 10-15 m) : *extension latérale, profondeur, présence d'alvéoles.*
  - Etude d'accidents profonds pouvant drainer les pollutions : *failles.*
- **Etudes de faciès**
  - Détection d'hétérogénéités de grandes dimensions, qui se traduisent par l'observation de phénomènes de diffraction.
- **Etude directe de pollution**
  - Cartographie d'une lentille d'hydrocarbures ; leur présence ou celle d'autres composants organiques, mélangés à l'eau ou flottant sur la nappe, pouvant modifier le signal sismique.
- **Monitoring**
  - Suivi dans le temps possible, mais rarement mis en œuvre.

#### Données pratiques

**Unité de vente :** au mètre  
**Coût moyen :** 100 €

**Fiche de synthèse de méthode géophysique applicable à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures**



**Sismique en forage**

**Principe de la méthode**

La méthode sismique en forage consiste à étudier la vitesse de propagation des ondes sismiques (mécaniques), émises et réceptionnées à la surface, ou en forages.

**Résultats obtenus**

Les **diagrapies sismique** fournissent des courbes de vitesse en fonction de la profondeur.  
Les **tomographies sismiques entre forages** fournissent des sections de vitesse, qui correspondent à la coupe verticale de terrain passant par les forages, délimitée latéralement et en profondeur par ces derniers.

**Données techniques**

**Paramètre étudié :** vitesse des ondes sismiques

**Unité :** le mètre par seconde (m/s)

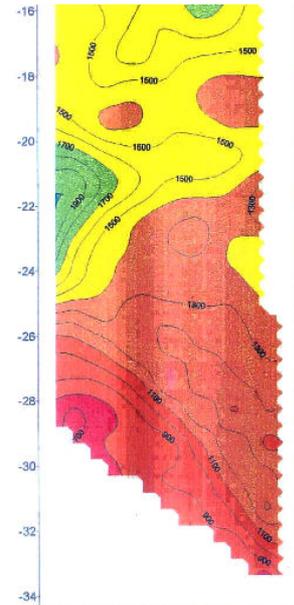
**Comportement des goudrons acides :** leur état pâteux peut diminuer la vitesse et absorber l'énergie des ondes sismiques en leur sein.

**Profondeur d'investigation :**

- Diagrapie : inférieure à 1 m de l'axe du forage
- Tomographie sismique entre forages : distance inter-forage inférieure à 15 m

**Dispositif et mise en œuvre :** ils sont de deux types

- Diagrapie sismique en forage unique : cette méthode peut être mise en œuvre de différentes façons : tir en surface et enregistrement en forage (essais down-hole), tir en forage et enregistrement en surface (essais up-hole), tir en forage et enregistrement en forage (microsismique).
  - Tomographie sismique entre forages : les tirs et les réceptions sont effectués depuis l'intérieur des forages, et distribués de façon régulière, de manière à couvrir complètement la zone inter-forage.
- Les sources mises en œuvre pour les tirs en forage peuvent être explosives (détonateurs), mécaniques (marteau pneumatique) ou électriques (étincelleur). En tomographie sismique, la réception en forage est effectuée à l'aide de flûtes (câbles à sorties multiples) d'hydrophones, ou sur géophones unitaires.



Tomographie sismique entre forages

**Contraintes**

**Généralités :** Cette méthode est très sensible aux vibrations. L'utilisation de sources sismiques de type explosif, qui donnent les meilleurs résultats en terme de profondeur d'investigation, pose des problèmes cruciaux de sécurité dans ce contexte (présence de composés inflammables ou explosifs).

**Tubage :** Le forage doit être maintenu en eau et tubé PVC plein dans le cas de la tomographie sismique. En trou sec, le tubage doit être parfaitement cimenté au terrain (up-hole et down-hole).

**Applications**

- **Etudes de faciès et de structure**
  - Etude du contenu des lagunes : *identification des différents horizons traversés par un forage (diagrapie sismique)*
  - Etude des terrains entre forages (tomographie sismique)
- **Etude directe de pollution**
  - Détection d'alvéoles de goudrons acides entre 2 forages.
- **Monitoring**
  - Méthode mal adaptée au monitoring

**Données pratiques**

Diagrapie sismique  
Tomographie sismique

**Unité de vente :**  
au mètre  
vendu à la section (panneau) entre 2 forages

**Coût moyen :**  
10 à 30 € le mètre  
1000 à 2000 € suivant dimensions

## Fiche de synthèse de méthode géophysique applicable à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures



### Radar en forage

#### Principe de la méthode

La méthode est basée sur la propagation dans le sol d'ondes radar émises depuis l'intérieur de forages. Elle étudie les réflexions de ces ondes sur les hétérogénéités du sous-sol, ou leur vitesse de transmission entre forages.

#### Résultats obtenus

La **réflectométrie radar en forage** fournit des sections radar (information sur 360° pour des antennes non directionnelles), où les interfaces et hétérogénéités du sous-sol, le long des forages, apparaissent sous forme de réflecteurs, interprétables en termes géologiques. La **tomographie radar entre forages** fournit une section radar qui correspond à la coupe verticale de terrain passant par les forages, délimitée latéralement et en profondeur par ces derniers.

#### Données techniques

**Paramètres étudiés :** vitesse de propagation des ondes radar, fréquence, et amplitude de leur réflexion sur les interfaces séparant des milieux de propriétés électromagnétiques (constante diélectrique) différentes

**Unité :** vitesse en centimètres par nanoseconde (cm/ns), fréquence en Hertz (Hz)

**Comportement des goudrons acides :** leur conductivité élevée induit une forte réflexion au niveau des interfaces, de même qu'une atténuation plus forte de l'amplitude des ondes en leur sein.

#### Profondeur d'investigation :

- réflectométrie radar : 1 à 5 m autour de l'axe du forage
  - tomographie radar entre forages : 2 à 5 m de distance entre forages.
- La profondeur d'investigation du radar varie avec la conductivité des terrains (voir contraintes ci-dessous) et la fréquence émise.

#### Dispositif et mise en œuvre :

- réflectométrie radar en forage : l'émission et la réception des ondes est effectuée à l'aide d'antennes spécifiques descendues progressivement dans le forage ausculté. L'acquisition est continue. Dans le cas plus courant d'antennes non directionnelles, l'information obtenue n'est pas localisable dans le plan horizontal (information « sommée » sur les 360°)
- Tomographie radar entre forages : les dispositif générique consiste à émettre les ondes (impulsions radar) depuis l'intérieur d'un forage, et de mesurer les temps d'arrivée et/ou l'atténuation des ondes dans un second forage ; les points d'émission/réception étant distribués régulièrement de façon similaire, de manière à couvrir l'ensemble de la zone inter-forages. Le matériel d'acquisition utilisé est classique, hormis les antennes de forage.

#### Contraintes

**Généralités :** la conductivité des terrains est le principal facteur affectant la profondeur d'investigation du radar, qui est réduite en milieu conducteur (milieu argileux, humide, ou à la verticale d'éléments métalliques tels que ferrallages, plaques, déchets...). Inversement, plus le terrain est résistant, meilleure est la pénétration.

**Tubage :** Les forages doivent être tubés PVC. Pas de tubage métallique.

#### Applications

- **Etudes de faciès et de structure**
  - Etude du contenu des lagunes : *identification des différents horizons ou hétérogénéités traversés par un forage ou situées à proximité du forage (diagraphie ou réflectométrie radar).*
  - Etude des terrains entre forages
- **Etude directe de pollution**
  - Etude de l'extension de zones polluées entre forages (tomographie radar)
- **Monitoring**
  - Méthode mal adaptée au monitoring

#### Données pratiques

Réflectométrie radar  
Tomographie radar

#### Unité de vente :

au mètre  
vendu à la section (panneau) entre 2 forages

#### Coût moyen :

10 € le mètre  
suivant dimensions

**Fiche de synthèse de méthode géophysique applicable à  
la caractérisation des lagunes à hydrocarbures**



## Résistivité électrique en forage

### Principe de la méthode

Les méthodes électriques consistent à calculer la résistivité électrique des terrains, à partir de mesures (en forage) du potentiel généré par l'injection d'un courant dans les terrains depuis l'intérieur d'un forage.

### Résultats obtenus

La **diagraphie de résistivité** permet d'obtenir une courbe de résistivité en fonction de la profondeur du forage, traduisible en terme géologiques.

La **tomographie de résistivité entre forages** fournit une section de résistivité qui correspond à la coupe verticale de terrain passant par les forages, délimitée latéralement et en profondeur par ces derniers.

### Données techniques

**Paramètre étudié :** résistivité électrique des terrains

**Unité :** ohm-mètre (ohm.m)

**Comportement des goudrons acides :** mesures de faibles résistivités.

#### Profondeur d'investigation :

- diagraphie de résistivité : inférieure à 2 m autour de l'axe du forage
- tomographie électrique : 10 à 15 m de distance inter-forages

**Dispositif / mise en œuvre :** les dispositifs en forage sont de 2 types :

- Diagraphie de résistivité : l'injection du courant et la mesure de la différence de potentiel dont sera déduite la résistivité se font toutes deux au niveau d'une sonde descendue progressivement dans le forage ausculté. L'acquisition est continue.
- Tomographie de résistivité entre forages : les dispositifs génériques consistent à injecter le courant depuis des électrodes implantées en surface et / ou dans un forage ; les points de mesure étant distribués de façon similaire, éventuellement dans un second forage. Le résistivimètre utilisé est classique (type panneau électrique), de même que les câbles et électrodes de surface. Les câbles de forage devront être étanche, le passage du courant se faisant directement des sorties de câbles vers les terrains à travers un fluide conducteur remplissant le forage (eau ou autre fluide électriquement conducteur).

### Contraintes

**Générale :** La méthode électrique est sensible aux perturbations électriques : canalisations métalliques, câbles enterrés...

**Tubage :** Les forages doivent être tubés de PVC crépiné. Ils doivent être maintenus en eau ou en fluide électriquement conducteur. Le tubage métallique est proscrit.

### Applications

- **Etudes de faciès** :
  - Etude du contenu des lagunes : *identification des différents horizons traversés par un forage (diagraphie de résistivité), étude des terrains entre forages (tomographie de résistivité)*
- **Etude directe de pollution** :
  - Etude de l'extension de zones polluées entre forages (tomographie de résistivité)
- **Monitoring** :
  - Méthode bien adaptée au suivi dans le temps

### Données pratiques

Diagraphie de résistivité  
Tomographie de résistivité

**Unité de vente :**  
au mètre  
vendu à la section entre 2 forages

**Coût moyen :**  
1 € le mètre  
Suivant dimensions du panneau

**Fiche de synthèse de méthode géophysique applicable à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures**



## Magnétisme en forage

### Principe de la méthode

Le magnétisme consiste à étudier le champ magnétique terrestres et ses perturbations. Les mesures de magnétisme en forage sont peu courantes.

### Résultats obtenus

Les résultats sont représentés sous forme de courbes de magnétisme en fonction de la profondeur (diagraphie de magnétisme).

### Données techniques

**Paramètre étudié :** champ magnétique terrestre total

**Unité :** le Gamma, équivalent au nano-tesla, soit  $10^{-9}$  Tesla (T)

**Comportement des goudrons acides :** sans incidence notable sur le champ magnétique terrestre

**Profondeur d'investigation :** inférieure à 5 m autour de l'axe du forage

**Dispositif et mise en œuvre :** les mesures de diagraphie de magnétisme sont réalisées en continu ou point par point par l'intermédiaire d'une sonde descendue dans le forage.

### Contraintes

**Généralités :** les mesures de magnétisme sont très sensibles aux perturbations industrielles, dues notamment aux champs générés par les courants électriques, les canalisations métalliques et câbles enterrés, les clôtures, etc... (de même que toute autre masse magnétique non recherchée).

**Tubage :** Pas de restrictions sur le tubage des forages, hormis le tubage métallique qui est proscrit.

### Applications

- |   |   |
|---|---|
| - <b>Etudes de faciès et de structure</b> | - Etude du contenu des lagunes : <i>détection de masses magnétiques et de corps métalliques autres que les goudrons à proximité des forages (fûts, canalisations, citernes, cuves...)</i> |
| - <b>Etude directe de pollution</b>       | - Méthode non adaptée   |
| - <b>Monitoring</b>                       | - Méthode non adaptée   |

### Données pratiques

**Unité de vente :** au mètre

**Coût moyen :** 10 € le mètre (compter un forfait de mise en station par forage)

## 8.2 – Tableaux de synthèse des méthodes géophysiques applicables à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures

Tableau de synthèse des méthodes géophysiques appliquées à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures					
Méthodes	Paramètres	Applications	Profondeurs Limites d'utilisation	Comportement des goudrons acides	Comportement des goudrons non acides
Résistivité	Résistivité électrique des terrains	Coupe électrique des terrains (panneau de résistivité) Cartographie de pollutions	Jusqu'à 50 m Sensible aux objets métalliques et aux courants électriques	Mesures de faibles résistivités	Mesures de résistivités faibles à élevées, suivant le degré d'altération (goudrons frais résistants, goudrons altérés conducteurs)
Electromagnétisme	Conductivité des terrains	Cartographie des terrains. Détection d'objets métalliques.	Jusqu'à 6 m (EM31) et 30 m (EM34) selon configuration. Sensible aux objets métalliques et courants électriques	Mesures de conductivités élevées	Mesures de conductivités faibles à élevées, suivant le degré d'altération (goudrons frais résistants, goudrons altérés conducteurs)
Sismique réfraction	Vitesse des ondes P réfractées	Coupes sismiques Epaisseur et vitesse des terrains	Jusqu'à 20 m Sensible aux vibrations	Leur état pâteux peut diminuer la vitesse et absorber l'énergie des ondes sismiques en leur sein	Leur état pâteux peut diminuer la vitesse et absorber l'énergie des ondes sismiques en leur sein
Radar géologique	Vitesse, amplitude, et fréquence des ondes électromagnétiques	Coupes géologiques Détection d'objets	Jusqu'à 5 m Sensible au ferrailage	Leur conductivité élevée induit une forte réflexion au niveau des interfaces, de même qu'une atténuation plus forte de l'amplitude des ondes en leur sein (faible pénétration des ondes radar)	La pénétration radar est meilleure dans les goudrons frais, moins conducteurs. Le comportement des goudrons altérés rejoint celui des goudrons acides
Sismique réflexion	Vitesse, amplitude et fréquence des ondes P réfléchies	Coupes géologiques. Etudes de faciès	A partir de 10-15 m, puis > 30 m Sensible aux vibrations	L'état pâteux de ces goudrons peut diminuer la vitesse, modifier la fréquence, et absorber l'énergie des ondes sismiques en leur sein	L'état pâteux de ces goudrons peut diminuer la vitesse, modifier la fréquence, et absorber l'énergie des ondes sismiques en leur sein.
Magnétisme	Champ magnétique terrestre total	Détection de masses magnétiques	>30 m - Sensible aux masses magnétiques et courants électriques	Sans incidence notable sur le champ magnétique terrestre	Sans incidence notable sur le champ magnétique terrestre
Microgravimétrie	Attraction terrestre	Cartographie de terrains décomprimés et de vides	Jusqu'à 20 m Sensible aux vibrations	La plus faible densité des goudrons vis-à-vis des terrains encaissants se traduit par des anomalies négatives de gravité	La plus faible densité des goudrons vis-à-vis des terrains encaissants se traduit par des anomalies négatives de gravité
Polarisation provoquée	Potentiel de décharge	Cartographie de pollutions	Jusqu'à 30 m Sensible aux perturbations électriques	La conductivité des goudrons et leur concentration en électrolytes (ou sels dissous) leur confèrent une polarisabilité élevée	La polarisabilité des goudrons augmente avec leur degré d'altération.
Polarisation spontanée	Potentiel naturel	Cartographie de pollutions	Jusqu'à 50 m Sensible aux perturbations électriques	Suivant leur degré d'altération, les goudrons acides peuvent donner naissance à des phénomènes de polarisation spontanée (présence de sels dissous ou d'électrolytes)	Phénomène PS créé par un différentiel d'oxydoréduction entre goudrons et encaissants, ou entre goudrons frais et altérés. Pas de relation simple entre nature des goudrons et PS
Mise à la masse	Potentiel naturel	Cartographie de pollutions	Jusqu'à 30 m Sensible aux perturbations électriques	Ces goudrons électriquement conducteurs se mettent sensiblement au même potentiel lors de l'injection d'un courant en leur sein.	La mise à la masse n'est pas applicable sur goudrons frais résistants. Sur goudrons altérés, le comportement se rapproche de celui des goudrons acides

Tableau de synthèse des méthodes géophysiques en forage appliquées à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures			
Méthodes	Paramètres	Applications	Profondeurs Limites d'utilisation
Résistivité en forage	Résistivité électrique des terrains.	Etude des terrains dans l'environnement proche d'un forage, ou entre forages. Coupe verticale de résistivité (diagraphie de résistivité). Tomographie de résistivité.	Sensible aux objets métalliques et aux courants électriques. Forages nus ou tubés de PVC crépiné. Forages remplis d'eau.
Magnétisme en forage	Champ magnétique terrestre total.	Diagraphie de magnétisme (courbe de magnétisme en fonction de la profondeur du forage)	Sensible aux perturbations issues de masses magnétiques. Tubage des forages impérativement non métallique.
Polarisation provoquée en forage	Potentiel de décharge	Etude des terrains dans l'environnement proche d'un forage, ou entre forages. Coupe verticale de résistivité (diagraphie de chargeabilité). Tomographie de polarisation provoquée.	Sensible aux perturbations électriques. Forages nus ou tubés de PVC crépiné. Forages remplis d'eau.
Polarisation spontanée en forage	Potentiel naturel	Etude des terrains dans l'environnement proche d'un forage. Coupe verticale de polarisation spontanée (diagraphie de polarisation spontanée)	Sensible aux perturbations électriques. Forages nus ou tubés de PVC crépiné. Forages remplis d'eau.
Radar en forage	Vitesse, amplitude et fréquence des ondes électromagnétiques.	Etude des terrains dans l'environnement proche d'un forage, ou entre forages. Section radar verticale (réflectométrie radar). Section radar par transmission entre forages (Tomographie radar).	Sensible au ferrailage. Tubage impérativement non métallique
Sismique entre forages	Vitesse des ondes P	Etude des terrains entre forages. Tomographie sismique par transmission entre forages.	Sensible aux vibrations Forages tubés PVC et remplis d'eau (tomographie)
Sismique réflexion en forages (acoustique)	Vitesse, amplitude et fréquence des ondes sismiques.	Etude des terrains environnant un forage. Sections sismiques. Diagraphie sonique. Profil sismique vertical (PSV)	Sensible aux vibrations Forages nus ou tubés PVC. Forages remplis d'eau.

## 8.3 – Fiches d'exemples d'études géophysiques appliquées à la Caractérisation des lagunes à hydrocarbures

### 8.3.1 – Introduction aux fiches d'exemples

Les 3 fiches suivantes présentent 2 cas concrets d'application des méthodes géophysiques à la caractérisation de sites pollués. Le premier exemple (fiches 1 et 2) concerne l'étude de lagunes à hydrocarbures ; le second (fiche 3) celle d'une décharge sauvage.

La première étude est représentative de l'approche multi-méthodes, incontournable pour la détermination des différentes caractéristiques des lagunes à hydrocarbures. La campagne s'organise en deux phases : une première phase qui s'intéresse à la zone de lagunes elle-même (fiche 1) ; et une seconde qui la replace dans un contexte plus large, et qui inclut l'étude de l'extension - de la migration - des polluants en aval du site initial (fiche 2).

La seconde étude est caractéristique du diagnostic d'une décharge avec détermination de sa géométrie et de son contenu.

Chaque méthode permet de déterminer une ou plusieurs caractéristiques des lagunes ou de la zone polluée qui en découle. La mise en œuvre combinée de ces méthodes donne alors accès à une meilleure représentation spatiale de l'objectif. Le choix des méthodes, dans le cas présent, est fortement influencé par la qualité des résultats fournis dans le contexte d'un milieu à pollution très conductrice, ainsi que par la légèreté et la rapidité de leur mise en œuvre par comparaison aux autres méthodes.

### 8.3.2 – Fiches d'exemple

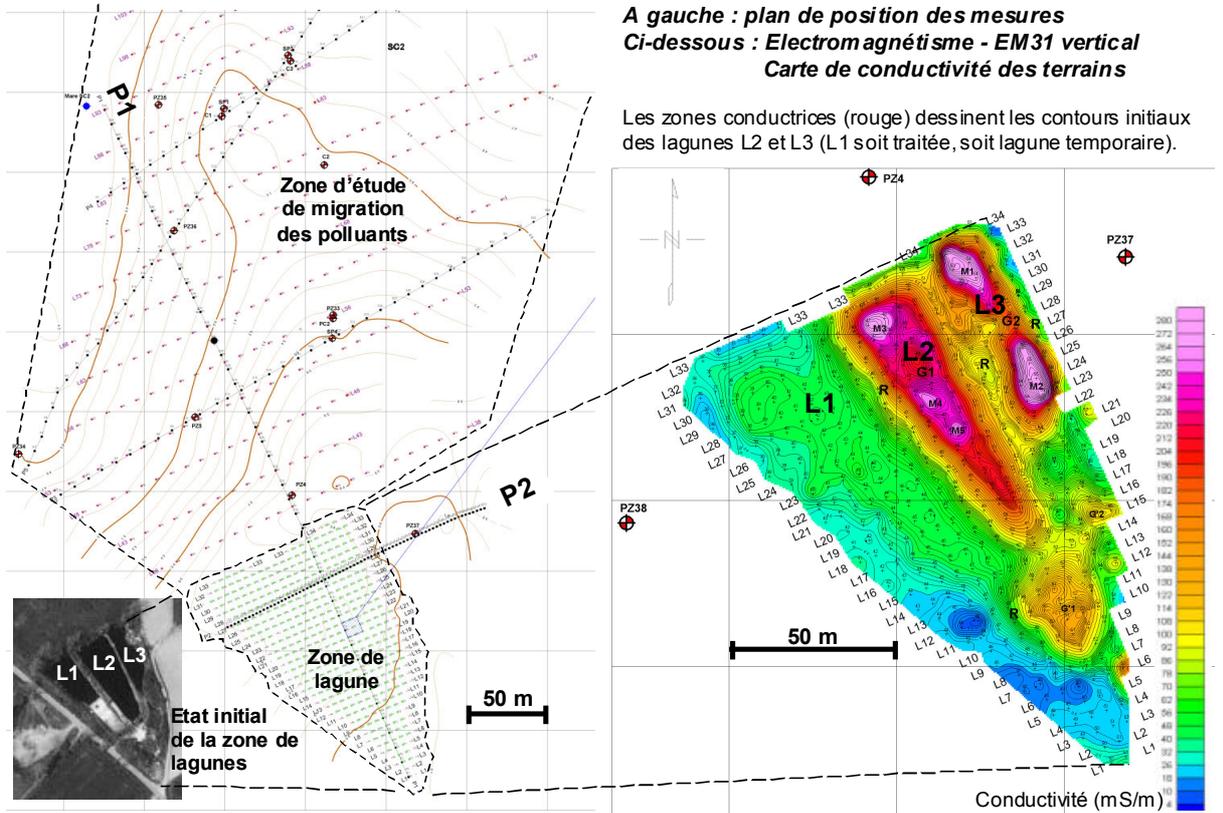
(pages suivantes)

Fiche d'exemple d'étude géophysique appliquée à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures



Etude de lagunes à goudrons acides (1/2)

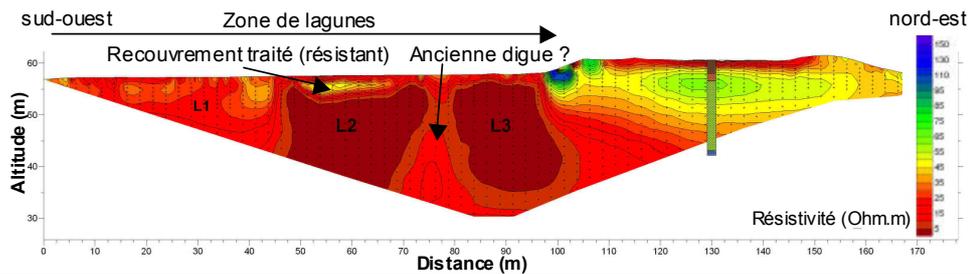
Géométrie des lagunes : délimitation des lagunes



Géométrie des lagunes : détermination de profondeur

Panneau de résistivité inversée P2

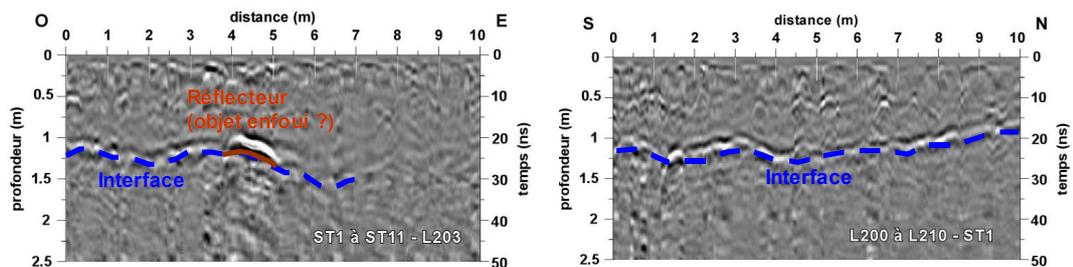
L1, L2 et L3 : Lagunes 2 et 3 (zones très conductrices de couleur marron), et lagune traitée L1 (plus résistante).



Etude du recouvrement

Sections radar

Détection d'interfaces et d'objets enfouis métalliques ou autres.



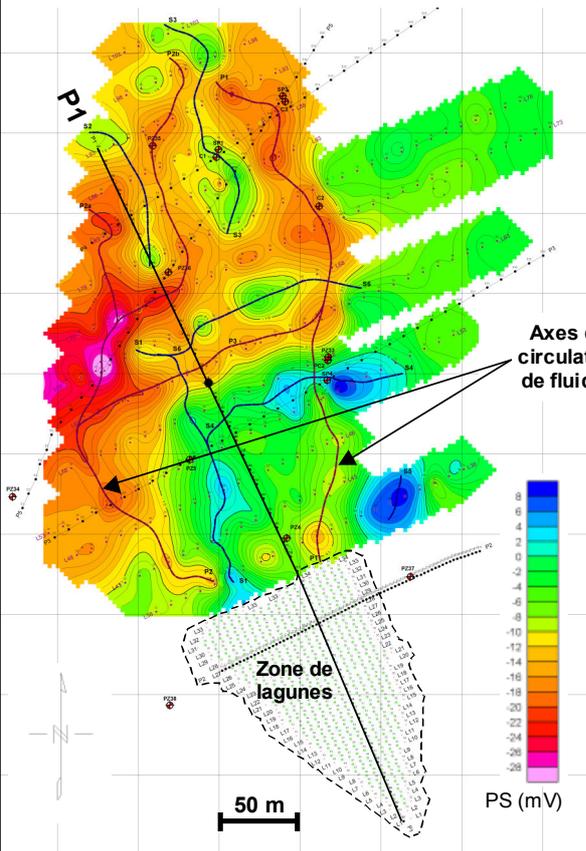
**Fiche d'exemple d'étude géophysique appliquée à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures**



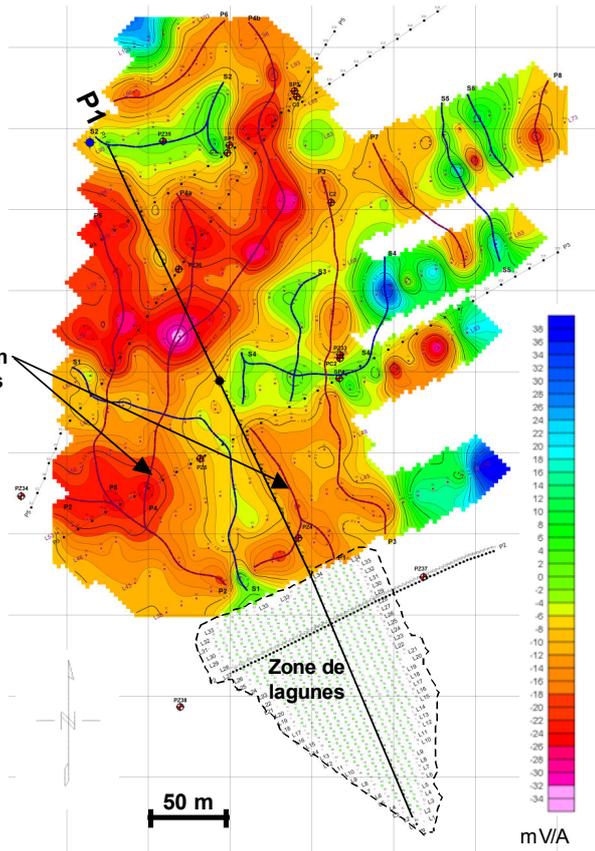
**Etude de lagunes à goudrons acides (2/2)**

**Etude de l'environnement des lagunes : extension et migration de la pollution**

Carte de polarisation spontanée

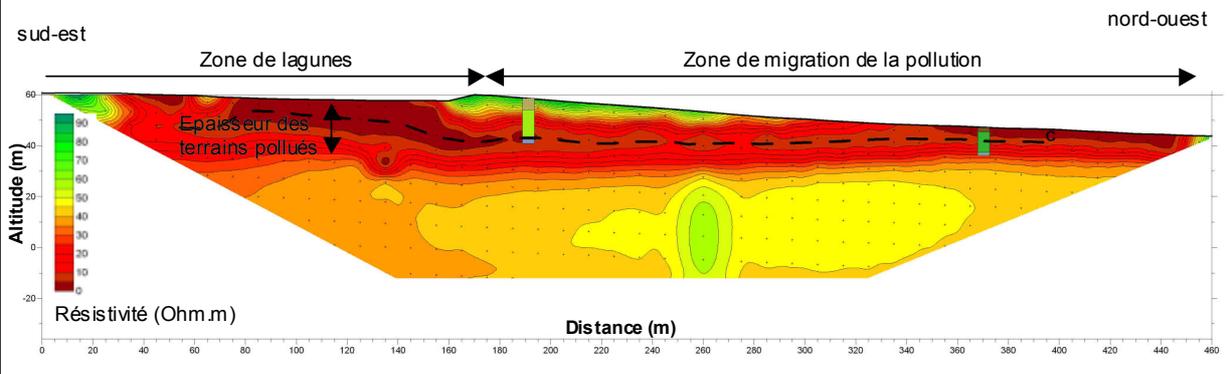


Carte de mise à la masse



Pour ces deux exemples, les zones conductrices ou de plus forte polarisabilité (représentées par les couleurs allant du jaune vers le rouge) sont susceptibles de correspondre aux polluants recherchés, davantage conducteurs que le milieu naturel encaissant.

Ci-dessous : panneau électrique P1 (représenté en trait gras continu sur les cartes ci-dessus)

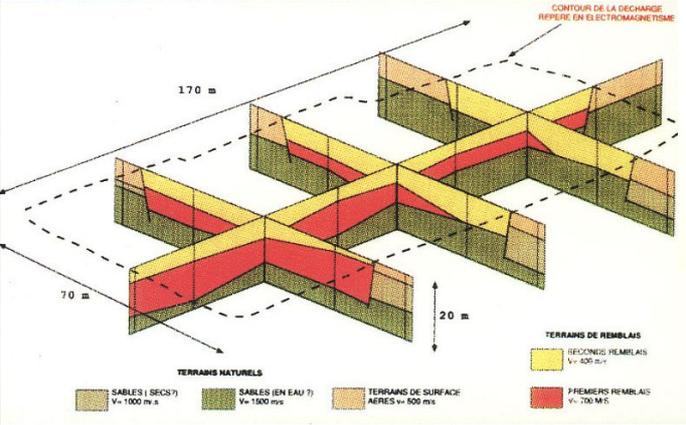
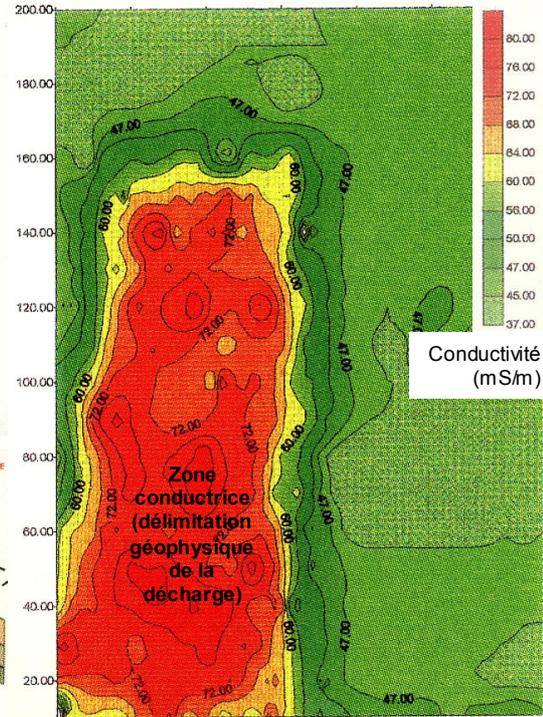
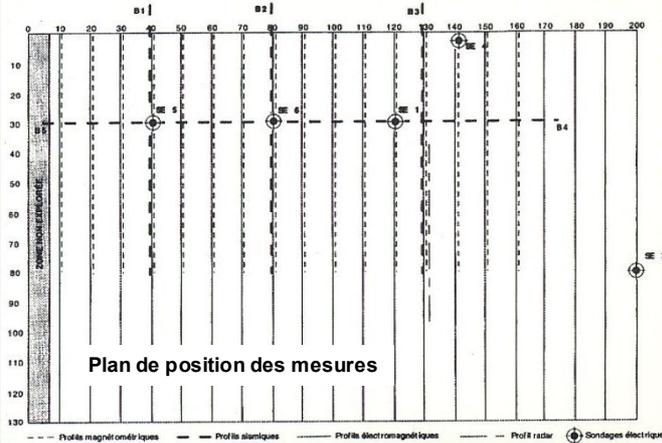


Fiche d'exemple d'étude géophysique appliquée à la caractérisation des lagunes à hydrocarbures



Etude de décharges sauvages

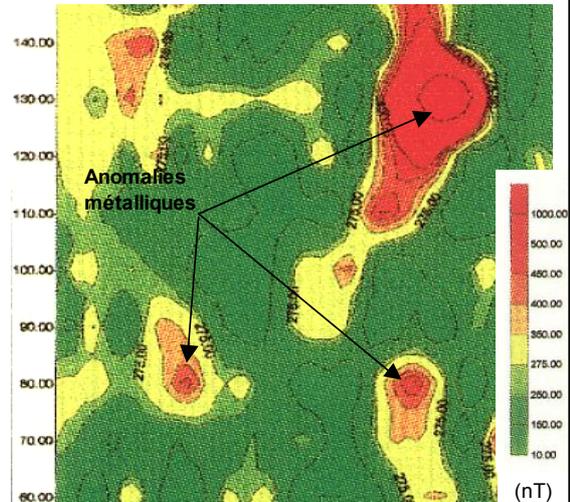
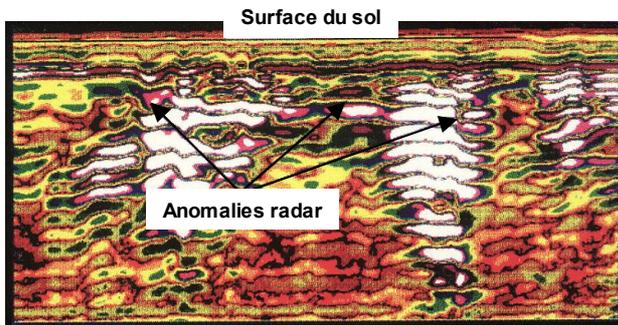
Délimitation des zones de dépôt : contours et profondeur



Ci-dessus : électromagnétisme – carte de conductivité des terrains.

Ci-contre : sismique réfraction – coupes déterminant l'épaisseur des horizons.

Recherche d'objets enfouis : déchets métalliques ou autres



Ci-dessus : section radar – détection d'hétérogénéités.

Ci-contre : carte de magnétisme – recherche d'anomalies métalliques.

### 8.3.3 – Commentaires et conclusions sur les fiches d'exemple

Cette section commente, méthode par méthode, les études présentées en exemple, avec des précisions sur l'atteinte des objectifs de caractérisation des zones polluées.

- L'électromagnétisme, fiche 1, a permis de représenter sous forme de carte les contours de la lagune et/ou de la pollution environnante. Dans le cas présent, cette méthode est parvenue à individualiser les différentes lagunes (L1, L2, L3) présentes sur le site, en surlignant le passage d'une ancienne digue de séparation entre les lagunes L2 et L3. La carte donne également des informations sur la nature de L1 : sa conductivité moins élevée, traduisant une pollution moins importante que celle de ses voisines, conforte l'hypothèse de son traitement, ou de son utilisation en temps que lagune de stockage temporaire.
- Le panneau électrique a été mis en œuvre pour apporter une composante verticale à l'information précédente. Le panneau P2, présenté sur la fiche 1 et dont l'implantation traverse les trois lagunes, met en évidence deux alvéoles très conductrices qui correspondent aux lagunes L2 et L3 (elle distingue donc également la présence de l'ancienne digue de séparation). A nouveau, L1 apparaît beaucoup moins conductrice que ses voisines. Les zones résistantes correspondent au terrain naturel environnant, et la présence d'une telle zone, limitée au terrain superficiel à l'aplomb de L1, pourrait suggérer qu'un traitement ait été appliqué à cette dernière. Les fonds de L2 et L3 ne sont pas correctement représentés, car le caractère très conducteur du remplissage fait « écran » à la pénétration du courant, et rend difficile l'accès à des informations en profondeur à l'aplomb des lagunes.
- Le radar, dans le cadre de cette étude, n'a pas une pénétration suffisante pour atteindre l'objectif du toit des goudrons acides. Cependant, il a permis de visualiser une interface (phase de recouvrement ?) et, sur certains profils, de détecter des anomalies pouvant correspondre à des déchets enfouis.
- La polarisation spontanée et la mise à la masse, dont les cartes sont présentées sur la fiche 2, ont permis de délimiter les contours du plumeau de pollution en aval de la zone de lagunes, et de mettre en évidence des axes préférentiels de circulation de fluides pollués. Ces méthodes, qui présentent des résultats qualitativement convergents, sont complémentaires, au sens où la mise à la masse permet de mieux suivre l'évolution réelle de la concentration des polluants, alors que la PS est davantage influencée par les fluides en circulation.

A titre indicatif, le coût de cette étude était d'environ 20000 €.

La seconde étude (fiche 3) présente une autre combinaison de méthodes géophysiques, appliquées dans le contexte d'une décharge sauvage remblayée qui présente des similarités avec les lagunes à goudrons acides, notamment le caractère conducteur et bien délimité de son remplissage. La carte d'électromagnétisme a permis comme précédemment de dégager très nettement les contours de la décharge. Les autres méthodes employées dans cette étude sont :

- La sismique réfraction, dont les 4 profils entrecroisés ont permis de déterminer les limites de la décharge, sa profondeur, ainsi que différentes interfaces liées à son remplissage.
- La méthode électrique est intervenue pour confirmer et compléter les informations fournies par la sismique (ses résultats sont intégrés aux représentations des coupes sismiques).
- Le magnétisme a permis de mettre en évidence la présence d'objets métalliques enfouis, dont le radar a ensuite précisé la profondeur et les dimensions.

8.4 – Tableau synoptique d'adéquation des méthodes géophysiques à la  
Caractérisation des lagunes à hydrocarbures

(pages suivantes)



## TABLEAU SYNOPTIQUE D'ADEQUATION DES METHODES GEOPHYSIQUES APPLIQUEES A LA CARACTERISATION DES LAGUNES A HYDROCARBURES

Ce tableau a été réalisé à partir du questionnaire « lagune » figurant en annexe 2.1

A. Géométrie de la lagune à hydrocarbures		
	<i>Critères initiaux pris en compte</i>	<i>Objectifs et techniques d'investigation géophysiques</i>
A1.	<p>Surface de la lagune</p> <p>Inférieure à 1 ha Comprise entre 1 et 5 ha Supérieure à 5 ha</p>	<p><b>Objectif :</b> détermination de l'extension de la lagune</p> <p><b>Techniques d'investigation :</b> méthodes fournissant des cartes et des profils.</p> <p><u>Electromagnétisme</u> <u>Microgravimétrie</u> <u>Traîné électrique</u> <u>Panneau de résistivité</u></p>
A2.	<p>Profondeur moyenne de la lagune</p> <p>Comprise entre 0 et 2 m Comprise entre 2 et 4 m Supérieure à 4 m Indéterminée</p>	<p><b>Objectif :</b> détermination de la profondeur de la lagune</p> <p><b>Techniques d'investigation :</b> méthodes fournissant des coupes ou sections.</p> <p><u>Radar</u> (0 à 5 m de profondeur) <u>Panneau de résistivité</u> (0 à 50 m) <u>Sondages électriques</u> (0 à 50 m) <u>Sismique réfraction</u> (0 à 15 m) <u>Sismique réflexion</u> (plus de 10 m)</p>
A3.	<p>Observations</p> <p><b>Surface de la lagune :</b> La surface de la lagune ne joue pas sur le choix des méthodes géophysiques, mais uniquement sur le volume des travaux. En fonction du volume des travaux, le choix de la méthode sera influencé par le critère financier. Par contre, en milieu aquatique, l'agrandissement de la surface d'étude entraîne nécessairement un alourdissement logistique.</p> <p><b>Profondeur moyenne de la lagune :</b> A l'exception du radar et de la sismique réflexion, les méthodes géophysiques peuvent être adaptées à des profondeurs d'investigation variables, par ajustement des paramètres de mesure.</p>	

### Commentaires

*Géométrie de la lagune (critères de la série A) : On fait l'hypothèse que la taille de la lagune peut être supérieure à celle du dépôt d'hydrocarbures, ce dernier pouvant n'occuper qu'une partie de la lagune. Les critères de la série A s'appliquent ainsi à la lagune au sens du « réceptacle ».*

B. Historique de la lagune à hydrocarbures		
	<i>Critères initiaux pris en compte</i>	<i>Objectifs et techniques d'investigation géophysiques</i>
B1.	Mise en place du premier dépôt d'hydrocarbures à l'intérieur de la lagune Récente (< 10 ans) Ni récente, ni ancienne (entre 20 et 30 ans) Ancienne (au-delà de 30 ans) Si connue Indéterminée	Non applicable
B2.	Date du dernier dépôt d'hydrocarbures à l'intérieur de la lagune Déterminée Indéterminée Si déterminée, date	Non applicable
B3.	Exploitation de la lagune à hydrocarbures Ponctuelle avec 1 seul dépôt d'hydrocarbures (ex : produit issu d'un accident unique) Ponctuelle avec plusieurs dépôts successifs d'hydrocarbures (ex : produits issus de plusieurs accidents) Semi continue Continue Non documentée	<b>Objectif</b> : définir un phasage des dépôts en étudiant les limites de couches. <b>Techniques d'investigation</b> : - Recherche d'interfaces <u>Radar</u> (0 à 5 m de profondeur) <u>Sismique réfraction</u> (0 à 15 m) <u>Sismique réflexion</u> (éventuellement) - Recherche de couches <u>Sismique réfraction</u> (0 à 15 m) <u>Panneau de résistivité</u> (0 à 50 m)
B4.	Mode de dépôt des déchets d'hydrocarbures Gravitaire Moyens hydrauliques (pompages) Moyens mécaniques (chargeur, pelle hydraulique, etc.) Moyens multiples (hydraulique, mécanique)	Non applicable
B5.	Origine des hydrocarbures pétroliers 1 seule origine de produit (produit identifié) 2 origines de produits (produits identifiés) Plusieurs origines de produits (produits indéterminés)	Idem B3.
B6.	Evolution du dépôt d'hydrocarbures Déchets d'hydrocarbures « décantables » Déchets d'hydrocarbures « non décantables »	Non applicable
B7.	Traitement du dépôt d'hydrocarbures Hydrocarbures partiellement ou totalement traités dans le passé Hydrocarbures n'ont fait l'objet d'aucun traitement particulier	<b>Objectif</b> : Déterminer les zones où les hydrocarbures ont été traités <b>Techniques d'investigation</b> : cartographie. Les hydrocarbures traités sont moins conducteurs que les non traités <u>Electromagnétisme</u> <u>Panneau de résistivité</u>
B8.	Observations	
	Les méthodes géophysiques citées en B3, B5 et B7 ne pourront être opérationnelles que si le contraste du paramètre étudié est suffisant. D'une manière générale, les applications envisagées pour ces objectifs sont en limite d'utilisation de la géophysique, en raison de la haute résolution exigée.	

**Commentaires :**

*Historique de la lagune (critères de la série B) : On fait référence à la période écoulée entre le premier dépôt d'hydrocarbures à l'intérieur de la lagune et la situation actuelle. Les critères de la série B comprennent l'ancienneté du dépôt, le mode d'exploitation, la présence d'aménagements initiaux (compartimentage), l'origine des hydrocarbures, l'évolution du dépôt ainsi que le traitement éventuel des hydrocarbures.*

C. Caractérisation du terme source		
	<i>Critères initiaux pris en compte</i>	<i>Objectifs et techniques d'investigation géophysiques</i>
C1.	Emprise des déchets d'hydrocarbures à l'intérieur de la lagune Equivalente à celle de la lagune Inférieure à celle de la lagune	Idem A1.
C2.	Surface du dépôt de déchets d'hydrocarbures (si inférieure) Inférieure à 1 ha Comprise entre 1 et 5 ha Supérieure à 5 ha Indéterminée	Idem A1.
C3.	Epaisseur moyenne des déchets d'hydrocarbures à l'intérieur de la lagune Comprise entre 0 et 0,5 m Comprise entre 0,5 et 1,0 m Supérieure à 1,0 m Indéterminée	Idem A2.
C4.	Répartition horizontale des déchets d'hydrocarbures à l'intérieur de la lagune Continue Discontinue	Idem A1.
C5.	Consistance des déchets d'hydrocarbures Présence de déchets à dominante aqueuse Hydrocarbures sous forme liquide seule Hydrocarbures sous forme boueuse seule Hydrocarbures sous forme pâteuse seule Existence de croûtes indurées Plusieurs consistances de déchets suspectées (aqueuse, liquide, boue, pâte) Indéterminée	<b>Objectif</b> : détermination de la consistance des déchets <b>Techniques d'investigation</b> : <u>Sismique réfraction</u>  Techniques non géophysiques : <u>Pénétromètres</u> <u>Carottages</u>
C6.	Surface des déchets à dominante aqueuse Inférieure à 1 ha Comprise entre 1 et 5 ha Supérieure à 5 ha Non applicable	Idem A2.
C7.	Epaisseur moyenne des déchets à dominante aqueuse Inférieure à 0,2 m Comprise entre 0,2 et 0,4 m Supérieure à 0,4 m Non applicable	<b>Objectif</b> : déterminer l'épaisseur moyenne des déchets à dominante aqueuse. <b>Techniques d'investigation</b> : - épaisseurs < 1 m : <u>Radar</u> - épaisseurs > 1 m : Idem A2.
C8.	Présence de déchets autres que les hydrocarbures Hydrocarbures pétroliers seuls Présence de déchets métalliques au sein des hydrocarbures Présence de déchets autres que les hydrocarbures pétroliers et les déchets métalliques	<b>Objectif</b> : détection d'objets <b>Techniques d'investigation</b> : - Déchets métalliques : <u>Magnétisme</u> , <u>Radar</u> <u>Electromagnétisme</u> <u>Polarisation provoquée</u> - Autres déchets : <u>Radar</u> , <u>Panneau de résistivité</u>

**Commentaires :**

Caractérisation du terme source (critères de la série C) : Le terme source est le dépôt d'hydrocarbures à l'intérieur de la lagune. Les critères de la série C décrivent la géométrie du dépôt (surface, épaisseur), sa répartition horizontale, le mode de dépôt, la consistance des déchets d'hydrocarbures, la présence de déchets à dominante aqueuse associés aux hydrocarbures (surface, épaisseur) ainsi que la présence de déchets autres.

<b>D. Conditions de milieux prévalent</b>		
	<i>Critères initiaux pris en compte</i>	<i>Objectifs et techniques d'investigation géophysiques</i>
D1.	<p>Confinement latéral de la lagune</p> <p>Naturel (dépression fermée)</p> <p>Aménagements périphériques (digues, infrastructures routières, autres)</p> <p>Lagune ouverte</p>	<p>Idem A1.</p> <p><b>Objectif</b> : Diagnostic des digues :</p> <p><b>Techniques d'investigation</b> :</p> <p><u>Radar</u></p> <p><u>Electromagnétisme</u></p> <p><u>Polarisation spontanée</u></p> <p><u>Panneau de résistivité</u></p> <p><u>Microgravimétrie</u></p> <p><u>Tomographie sismique</u></p> <p><u>Tomographie électrique</u></p>
D2.	<p>Confinement vertical de la lagune</p> <p>Substratum de la lagune imperméable</p> <p>Substratum de la lagune semi-perméable</p> <p>Substratum de la lagune perméable</p> <p>Non renseigné</p>	<p>Idem A2.</p> <p>Si extension possible du terme source à l'extérieur de la lagune (migration des contaminants) :</p> <p><u>Panneau de résistivité</u> (0 à 50 m)</p> <p><u>Electromagnétisme</u> (0 à 30 m)</p> <p><u>Polarisation spontanée</u> (0 à 50 m)</p> <p><u>Mise à la masse</u> (0 à 50 m)</p>
D3.	<p>Nature de la série géologique constitutive du substratum</p> <p>Dominante sable ou grès</p> <p>Dominante carbonates (calcaires, dolomite)</p> <p>Dominante argiles ou marnes</p> <p>Indéterminé</p>	<p><b>Objectif</b> : détermination de la nature du substratum</p> <p><b>Techniques d'investigation</b> : techniques fournissant des sections.</p> <p><u>Panneau de résistivité</u> (0 à 50 m de profondeur)</p> <p><u>Sismique réfraction</u> (0 à 15 m)</p>
D4.	<p>Présence d'une nappe d'eau souterraine</p> <p>Présence d'une nappe d'eau souterraine</p> <p>A moins de 15 m de profondeur</p> <p>Entre 15 et 30 m de profondeur</p> <p>Au-delà de 30 m de profondeur</p> <p>Non déterminé</p>	<p><b>Objectif</b> : Détection de nappe d'eau souterraine</p> <p><b>Techniques d'investigation</b> : techniques fournissant des sections.</p> <p><u>Radar</u> (0 à 5 m de profondeur)</p> <p><u>Panneau de résistivité</u> (0 à 50 m)</p> <p><u>Sismique réfraction</u> (0 à 15 m, en terrain meuble uniquement)</p>

**Commentaires :**

*Conditions de milieux prévalent (critères de la série D) : Les conditions de milieux décrivent le confinement du terme source : confinement latéral, confinement vertical, nature de la série géologique soubassement de la lagune ainsi que la présence d'une nappe d'eaux souterraines. Le confinement vertical fait référence à la qualité d'étanchéité naturelle des séries géologiques. Il est en effet fait l'hypothèse que les lagunes étudiées ne sont pas équipées d'une étanchéité artificielle (géomatériaux compactés, liners, etc.) si bien que ce cas de figure n'apparaît pas dans le questionnaire. Si cela était le cas, cette caractéristique peut être rapportée par le critère D5.*

<b>E. Conditions d'accès au terme source</b>		
	<i>Critères initiaux pris en compte</i>	<i>Objectifs et techniques d'investigation géophysiques</i>
E1.	Caractéristiques des abords de la lagune Topographie naturelle douce Topographie naturelle accidentée Structures anthropiques (route, voie ferrée) Zones remblayées faiblement compactées Présence d'une végétation arbustive dense	<b>Restriction d'application des techniques géophysiques :</b>  - Radar interdit sur terrain accidenté - Magnétisme et Electromagnétisme interdits si présence de masses métalliques non recherchées - Sismique interdite en présence de vibrations - Débroussaillage nécessaire si végétation arbustive dense (voir commentaire).
E2.	Terme source sous une lame d'eau Lamme d'eau temporaire (0-0,5 m) Lamme d'eau permanente (épaisseur moyenne comprise entre 0,5 et 1 m) Lamme d'eau permanente (épaisseur moyenne comprise entre 1 et 5 m)	<b>Restriction d'application des techniques géophysiques :</b>  - Pas de restrictions, sauf microgravimétrie. - Adaptation du matériel - Adaptation de la zone d'étude : nécessité soit d'accéder à pied, soit en embarcation. - Problèmes d'accès si présence exclusive de matériaux « vaseux » (accès piéton ou embarqué impossible)
E3.	Remblaiement postérieur au dépôt Remblaiement partiel de la lagune à hydrocarbures Remblaiement complet de la lagune à hydrocarbures Construction implantée sur une zone remblayée de la lagune à hydrocarbures	Idem A2.
E4.	Présence suspectée d'une phase gazeuse significative (composés organiques volatils) Composés organiques volatils identifiés Composés organiques volatils non identifiés	Définition des mesures de sécurité et de santé à adopter lors des investigations

**Commentaires :**

*Conditions d'accès au terme source (critères de la série E) : Les critères de cette série présentent les conditions d'accès au dépôt d'hydrocarbures (abords, présence d'une lame d'eau, remblaiement) ainsi que les risques éventuels vis-à-vis liés à la présence de composés volatils à des concentrations demandant le port d'appareil respiratoire.*

**Débroussaillage :**

- Le radar nécessite un débroussaillage suffisamment soigné pour garantir un bon couplage (contact) entre le sol et les antennes (si possible, faire un passage de lame).
- Pour les autres méthodes, un débroussaillage normal sur 1 m de large avec enlèvement des branches suffit pour permettre le passage et le lever topographique.
- Si la maille de mesures est serrée, il est préférable de faire passer un engin sur la totalité de la surface à étudiée.

## **9 – Conclusions**

L'étude a consisté en l'élaboration d'une typologie des lagunes à hydrocarbures, puis la réalisation d'un inventaire des techniques d'investigations géophysiques applicables à la caractérisation des volumes et des masses hétérogènes stockées.

Un premier recensement des sites BASOL a permis d'identifier les sites français pour lesquels la présence de goudrons est documentée ou possible, et / ou, se rattachant à la définition des lagunes à hydrocarbures au sens de l'étude. Ce recensement a identifié vingt deux sites en France métropolitaine et trois sites en Outremer.

Les origines des lagunes à hydrocarbures ont été balayées et regroupées en cinq catégories : l'exploration et la production pétrolière, le raffinage des produits pétroliers, la pyrolyse de la houille, les accidents impliquant des hydrocarbures, et les origines autres. Les sites BASOL recourent les quatre dernières origines précitées.

Les caractéristiques physico-chimiques des produits stockés pour chacun des origines étudiées ont été précisées avec une emphase portant sur les goudrons acides issus du raffinage des produits pétroliers. Les lagunes à goudrons acides représentent le cas le plus fréquent des sites identifiés et incorporés à la typologie.

La documentation rassemblée montre une grande variabilité des caractéristiques des produits stockés à l'intérieur des lagunes à goudrons acides. Quatre phases (organiques, acides, eaux, impuretés) y sont présentes avec une importance très variable d'un site à un autre, ainsi qu'à l'intérieur d'une même lagune selon les lentilles. Les résultats des caractérisation disponibles aujourd'hui au sein de la littérature technique et scientifique mettent peu l'accent sur la compréhension des hétérogénéités présentes.

La typologie des lagunes inventoriées est élaborée à partir d'une grille de lecture incorporant cinq critères appliqués au terme source : origine, tonnage, répartition, nature, et accessibilité. Elle incorpore les sites référencés par BASOL pour lesquels les informations sont suffisantes, complétés par des sites autres pour lesquels une documentation a pu être rassemblée. Il s'agit de dix sites de lagunes localisés en France métropolitaine, un site en Outremer, deux sites en Belgique, trois sites au Royaume Uni, un site en République Tchèque, un site en Ukraine, et un site au Canada. Un total de douze des dix neuf sites de lagunes est issu du raffinage des produits pétroliers, trois de la pyrolyse de la houille, et quatre des origines autres.

La partie géophysique des travaux de ce projet a permis d'établir un inventaire des méthodes géophysiques applicables en vue de la caractérisation des lagunes à hydrocarbures. Cet inventaire se présente sous la forme de fiches (1 fiche par méthode), complétées par deux exemples concrets d'investigation de sites.

Afin d'assister les décideurs dans le choix des méthodes géophysiques à appliquer dans un contexte de lagune à hydrocarbures, ces documents sont complétés par un tableau de synthèse générale des méthodes, permettant une rapide vue d'ensemble, ainsi qu'un tableau synoptique établissant de façon plus détaillée une relation entre les problèmes à résoudre et les méthodes à appliquer.

Durant ces travaux, les aspects concrets et pratiques ont toujours été privilégiés par rapport aux aspects théoriques. Notamment, le critère de sécurité s'est avéré être, dans ce contexte d'étude, le facteur primordial lors du choix, et ultérieurement, de la mise en œuvre des méthodes géophysiques. Ce critère de sécurité, en plus de conditionner la faisabilité d'une étude, sera bien souvent un des facteurs principaux influençant son coût.

## **Liste des Annexes**

Annexe-2.1 : Questionnaire « lagunes »

Annexe-3.1 : Inventaire des lagunes à hydrocarbures référencées par BASOL (France)

Annexe-4.1 : Liste non exhaustive des composés chimiques susceptibles d'être présents dans les lagunes à goudrons acides

## **Bibliographie**

Audibert, F. (2003) – Les huiles usagées : Re raffinage et valorisation énergétique. Ed. Technip, Paris.

Barde P., Van Dorpe F. (1999) – Evolution d'une pollution historique en goudron. Rapport CNRSSP/99/42.

Baruah, J.P. ; Phukan P. (1995) – An approach to Treatment, Disposal and End Use of Digboi Refinery Tarry Waste. Proceedings of PETROTECH-95, New Delhi.

BP France (1995) – Rapport confidentiel.

CECA ATO (1994) – GERLAND : Friche de Malebarge. Etude diagnostic de l'état de contamination du sous-sol. SC/OM 0142/94.

Costes J.M., Druelle V. (1984) – Les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'environnement : la réhabilitation des anciens sites industriels. Revue de l'Institut Français du Pétrole, Vol. 52, N°4.

DRIRE (2003) – Projet d'arrêté préfectoral complémentaire concernant la lagune de Total France à Gonfreville l'Orcher. Rapport de l'inspection des installations classées au Conseil Départemental d'Hygiène, 8 juillet 2003.

DRIRE (2004) – Prescriptions complémentaires relatives à la lagune n°2 de Total France à Gonfreville l'Orcher. Rapport de l'inspectrice des installations classées au Conseil Départemental d'Hygiène, 8 avril 2004.

Environment Agency (2001) – Land contamination : Technical Guidance on Spécial Sites : Acide Tar Lagoons. R&D Technical Report P5-042/TR/04 – DJ Nancarrow, NJ Slade & JE Steeds. Research Contractor : WS Atkins Consultants Limited.

Furimsky E. (2002) – Sydney Tar Ponds : Some Problems in Quantifying Toxic Waste. Environmental Management, Vol. 30, Number 6.

Griffiths L., Charles W. H.R., LaPierre L. (2006) – Joint Review Panel Environmental Assessment Report : Sydney Tar Ponds and Coke Oven Sites Remediation Project.

Inertec (2006) site internet – Les lagunes à hydrocarbures : un marché porteur. Inertec News, n°10, novembre 2005.

Milne D.D., Clark A.I., Perry R. (1986) – Acid tars : Their production, treatment and disposal in the UK. *Waste Management & Research* Vol. 4, 407-418.

Nesbit N.L., Mallett S.H., Pollard S.J.T. (1995) – Resolving the heterogeneity of tarry wastes during investigation of acid tar pits. *International Conference on Contaminated Soil*, 5/IV : 243-244.

Nichol D. (2000) – Geo-engineering problems at Hoole Bank Acid Tar Lagoon, Cheshire, U.K. *Land Contaminated & Reclamation*, 8(3).

NSW EPA (2003) – Draft Guidelines for the Assessment of the Former Gasworks Sites.

Pitout C. (2000) – Conception et utilisation d'un système d'Information Géographique pour l'étude et le suivi des sites industriels pollués. *Analyse spatiale 2D-3D – Analyse multiparamètre*. Thèse, Université des Sciences et Technologies de Lille.

Portet F. (2004) – Monitoring continu de site pollué. Mise au point d'une méthodologie de contrôle en continu d'un site pollué en phase de surveillance ou de dépollution. Thèse présentée devant l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon et Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (ENSM-SE).

Solenenvironnement (2006) site internet – Note de présentation de la réhabilitation de la lagune de Brest par enceinte active et stabilisation in situ disponible.

Topilnitskij P.I., Bratychak M.M., Yevgen O.D. (1996) – Utilisation of ponded acid tars obtained at oil distillates refining. *Int. Cof. On Analysis & Utilisation of Oily Wastes (AUZO'96)*.

TPH Criteria Working Group (1998) – Composition of Petroleum Mixtures. Volume 2.

URS France (2005) – Remediation options for acid tar contaminated sites. Final Report – Issue N°2 – Project N°32752-002-412.

URS France (2006) – Investigation of Acid Tar Lagoons : Dury (62) France. Final Report. Project N°43741935.

URS France (2005) – Investigation of Acid Tar Lagoons : Noyelles-sous-Bellonne (62) France. Final Report. Project N°43741934.

URS France (2005) – Investigation of Acid Tar Lagoons : Courchelettes (62) France. Final Report. Project N°43741916.

---

**Annexe-2.1**

**Questionnaire « lagunes »**



## QUESTIONNAIRE « LAGUNE » - Version finale

Numéro de la lagune	.....	
---------------------	-------	--

Compagnie exploitante ou propriétaire de la lagune aujourd'hui	..... .....
--	----------------

Date de remplissage du questionnaire	.....	
--------------------------------------	-------	--

### Commentaires portant sur le système de numérotation proposé

Exemple : TOTAL/01-FR avec 01 pour le numéro d'attribution de la lagune par la compagnie pétrolière exploitante ou propriétaire de la lagune aujourd'hui, l'extension Fr ou UK informant de sa localisation.

A. Géométrie de la lagune à hydrocarbures		Réponses
	<i>Critères initiaux pris en compte</i>	
A1.	Surface de la lagune	
	Inférieure à 1 ha	<input type="checkbox"/>
	Comprise entre 1 et 5 ha	<input type="checkbox"/>
	Supérieure à 5 ha	<input type="checkbox"/>
A2.	Profondeur moyenne de la lagune	
	Comprise entre 0 et 2 m	<input type="checkbox"/>
	Comprise entre 2 et 4 m	<input type="checkbox"/>
	Supérieure à 4 m	<input type="checkbox"/>
	Indéterminée	<input type="checkbox"/>
A3.	Observations	

### Commentaires

Géométrie de la lagune (critères de la série A) : On fait l'hypothèse que la taille de la lagune peut être supérieure à celle du dépôt d'hydrocarbures, ce dernier pouvant n'occuper qu'une partie de la lagune. Les critères de la série A s'appliquent ainsi à la lagune au sens du « réceptacle ».

Critères A1 et A2 : Cochez la case correspondant à la lagune  
Critère A3 : Réponse libre si souhaitez

B. Historique de la lagune à hydrocarbures		
B1.	Mise en place du premier dépôt d'hydrocarbures à l'intérieur de la lagune	
	Récente (< 10 ans)	<input type="checkbox"/>
	Ni récente, ni ancienne (entre 20 et 30 ans)	<input type="checkbox"/>
	Ancienne (au-delà de 30 ans)	<input type="checkbox"/>
	Si connue	
	Indéterminée	<input type="checkbox"/>
B2.	Date du dernier dépôt d'hydrocarbures à l'intérieur de la lagune	
	Déterminée	<input type="checkbox"/>
	Indéterminée	<input type="checkbox"/>
	Si déterminée, date	Date :
B3.	Exploitation de la lagune à hydrocarbures	
	Ponctuelle avec 1 seul dépôt d'hydrocarbures (ex : produit issu d'un accident unique)	<input type="checkbox"/>
	Ponctuelle avec plusieurs dépôts successifs d'hydrocarbures (ex : produits issus de plusieurs accidents)	<input type="checkbox"/>
	Semi continue	<input type="checkbox"/>
	Continue	<input type="checkbox"/>
	Non documentée	<input type="checkbox"/>
B4.	Mode de dépôt des déchets d'hydrocarbures	
	Gravitaire	<input type="checkbox"/>
	Moyens hydrauliques (pompages)	<input type="checkbox"/>
	Moyens mécaniques (chargeur, pelle hydraulique, etc.)	<input type="checkbox"/>
	Moyens multiples (hydraulique, mécanique)	<input type="checkbox"/>
B5.	Origine des hydrocarbures pétroliers	
	1 seule origine de produit (produit identifié)	<input type="checkbox"/>
	2 origines de produits (produits identifiés)	<input type="checkbox"/>
	Plusieurs origines de produits (produits indéterminés)	<input type="checkbox"/>
B6.	Evolution du dépôt d'hydrocarbures	
	Déchets d'hydrocarbures « décantables »	<input type="checkbox"/>
	Déchets d'hydrocarbures « non décantables »	<input type="checkbox"/>
B7.	Traitement du dépôt d'hydrocarbures	
	Hydrocarbures partiellement ou totalement traités dans le passé	<input type="checkbox"/>
	Hydrocarbures n'ont fait l'objet d'aucun traitement particulier	<input type="checkbox"/>
B8.	Observations	

**Commentaires :**

*Historique de la lagune (critères de la série B) : On fait référence à la période écoulée entre le premier dépôt d'hydrocarbures à l'intérieur de la lagune et la situation actuelle. Les critères de la série B comprennent l'ancienneté du dépôt, le mode d'exploitation, la présence d'aménagements initiaux (compartimentage), l'origine des hydrocarbures, l'évolution du dépôt ainsi que le traitement éventuel des hydrocarbures.*

Critères B1 à B7 : Cochez la case correspondant à la lagune

Critère B8 : Réponse libre si souhaitez

*Caractérisation des lagunes à hydrocarbures  
(Caractérisation des volumes et des masses hétérogènes stockées)*

<b>C.</b>	<b>Caractérisation du terme source</b>	
C1.	Emprise des déchets d'hydrocarbures à l'intérieur de la lagune	
	Equivalente à celle de la lagune	<input type="checkbox"/>
C2.	Inférieure à celle de la lagune	<input type="checkbox"/>
	Surface du dépôt de déchets d'hydrocarbures (si inférieure)	
	Inférieure à 1 ha	<input type="checkbox"/>
	Comprise entre 1 et 5 ha	<input type="checkbox"/>
	Supérieure à 5 ha	<input type="checkbox"/>
C3.	Indéterminée	<input type="checkbox"/>
	Epaisseur moyenne des déchets d'hydrocarbures à l'intérieur de la lagune	
	Comprise entre 0 et 0,5 m	<input type="checkbox"/>
	Comprise entre 0,5 et 1,0 m	<input type="checkbox"/>
	Supérieure à 1,0 m	<input type="checkbox"/>
C4.	Indéterminée	<input type="checkbox"/>
	Répartition horizontale des déchets d'hydrocarbures à l'intérieur de la lagune	
C5.	Continue	<input type="checkbox"/>
	Discontinue	<input type="checkbox"/>
C6.	Consistance des déchets d'hydrocarbures	
	Présence de déchets à dominante aqueuse	<input type="checkbox"/>
	Hydrocarbures sous forme liquide seule	<input type="checkbox"/>
	Hydrocarbures sous forme boueuse seule	<input type="checkbox"/>
	Hydrocarbures sous forme pâteuse seule	<input type="checkbox"/>
	Existence de croûtes indurées	<input type="checkbox"/>
	Plusieurs consistances de déchets suspectées (aqueuse, liquide, boue, pâte)	<input type="checkbox"/>
Indéterminée	<input type="checkbox"/>	
C7.	Surface des déchets à dominante aqueuse	
	Inférieure à 1 ha	<input type="checkbox"/>
	Comprise entre 1 et 5 ha	<input type="checkbox"/>
	Supérieure à 5 ha	<input type="checkbox"/>
	Non applicable	<input type="checkbox"/>
C8.	Epaisseur moyenne des déchets à dominante aqueuse	
	Inférieure à 0,2 m	<input type="checkbox"/>
	Comprise entre 0,2 et 0,4 m	<input type="checkbox"/>
	Supérieure à 0,4 m	<input type="checkbox"/>
	Non applicable	<input type="checkbox"/>
C8.	Présence de déchets autres que les hydrocarbures	
	Hydrocarbures pétroliers seuls	<input type="checkbox"/>
	Présence de déchets métalliques au sein des hydrocarbures	<input type="checkbox"/>
	Présence de déchets autres que les hydrocarbures pétroliers et les déchets métalliques	<input type="checkbox"/>

*Caractérisation des lagunes à hydrocarbures  
(Caractérisation des volumes et des masses hétérogènes stockées)*

C.	Caractérisation du terme source	
C9.	Observations	

**Commentaires :**

*Caractérisation du terme source (critères de la série C) : Le terme source est le dépôt d'hydrocarbures à l'intérieur de la lagune. Les critères de la série C décrivent la géométrie du dépôt (surface, épaisseur), sa répartition horizontale, le mode de dépôt, la consistance des déchets d'hydrocarbures, la présence de déchets à dominante aqueuse associés aux hydrocarbures (surface, épaisseur) ainsi que la présence de déchets autres.*

Critères C1 à C8 : Cochez la case correspondant à la lagune  
Critère C9 : Réponse libre si souhaitez

*Caractérisation des lagunes à hydrocarbures  
(Caractérisation des volumes et des masses hétérogènes stockées)*

D.	Conditions de milieux prévalent	
D1.	Confinement latéral de la lagune	
	Naturel (dépression fermée)	<input type="checkbox"/>
	Aménagements périphériques (digues, infrastructures routières, autres)	<input type="checkbox"/>
	Aménagements périphériques (digues, infrastructures routières, autres)	<input type="checkbox"/>
D2.	Confinement vertical de la lagune	
	Substratum de la lagune imperméable	<input type="checkbox"/>
	Substratum de la lagune semi-perméable	<input type="checkbox"/>
	Substratum de la lagune perméable	<input type="checkbox"/>
	Non renseigné	<input type="checkbox"/>
D3.	Nature de la série géologique constitutive du substratum	
	Dominante sable ou grès	<input type="checkbox"/>
	Dominante carbonates (calcaires, dolomite)	<input type="checkbox"/>
	Dominante argiles ou marnes	<input type="checkbox"/>
D4.	Présence d'une nappe d'eau souterraine	
	Présence d'une nappe d'eau souterraine	<input type="checkbox"/>
	A moins de 15 m de profondeur	<input type="checkbox"/>
	Entre 15 et 30 m de profondeur	<input type="checkbox"/>
	Au-delà de 30 m de profondeur	<input type="checkbox"/>
D5.	Observations	

**Commentaires :**

*Conditions de milieux prévalent (critères de la série D) : Les conditions de milieux décrivent le confinement du terme source : confinement latéral, confinement vertical, nature de la série géologique soubassement de la lagune ainsi que la présence d'une nappe d'eaux souterraines. Le confinement vertical fait référence à la qualité d'étanchéité naturelle des séries géologiques. Il est en effet fait l'hypothèse que les lagunes étudiées ne sont pas équipées d'une étanchéité artificielle (géomatériaux compactés, liners, etc.) si bien que ce cas de figure n'apparaît pas dans le questionnaire. Si cela était le cas, cette caractéristique peut être rapportée par le critère D5.*

Critères D1 à D4 : Cochez la case correspondante

Critère D5 : Réponse libre si souhaitez

<b>E.</b>	<b>Conditions d'accès au terme source</b>	
E1.	Caractéristiques des abords de la lagune	
	Topographie naturelle douce	<input type="checkbox"/>
	Topographie naturelle accidentée	<input type="checkbox"/>
	Structures anthropiques (route, voie ferrée)	<input type="checkbox"/>
	Zones remblayées faiblement compactées	<input type="checkbox"/>
	Présence d'une végétation arbustive dense	<input type="checkbox"/>
E2.	Terme source sous une lame d'eau	
	Lame d'eau temporaire (0-0,5 m)	<input type="checkbox"/>
	Lame d'eau permanente (épaisseur moyenne comprise entre 0,5 et 1 m)	<input type="checkbox"/>
	Lame d'eau permanente (épaisseur moyenne comprise entre 1 et 5 m)	<input type="checkbox"/>
E3.	Remblaiement postérieur au dépôt	
	Remblaiement partiel de la lagune à hydrocarbures	<input type="checkbox"/>
	Remblaiement complet de la lagune à hydrocarbures	<input type="checkbox"/>
	Construction implantée sur une zone remblayée de la lagune à hydrocarbures	<input type="checkbox"/>
E4.	Présence suspectée d'une phase gazeuse significative (composés organiques volatils)	
	Composés organiques volatils identifiés	<input type="checkbox"/>
	Composés organiques volatils non identifiés	<input type="checkbox"/>
E5.	Observations	

**Commentaires :**

*Conditions d'accès au terme source (critères de la série E) : Les critères de la série D présentent les conditions d'accès au dépôt d'hydrocarbures (abords, présence d'une lame d'eau, remblaiement) ainsi que les risques éventuels vis-à-vis liés à la présence de composés volatils à des concentrations demandant le port d'appareil respiratoire.*

Critères E1 à E4 : Cochez la case correspondant à la lagune

Critère E5 : Réponse libre si souhaitez

*Caractérisation des lagunes à hydrocarbures  
(Caractérisation des volumes et des masses hétérogènes stockées)*

<b>F.</b>	<b>Critères libres</b>	
F1.	Observations	

**Commentaires :**

*Autres caractéristiques (critère de la série F) : Cette page est proposée pour que puisse être introduit toute description pertinente ou schéma n'entrant pas dans les critères fixes proposés préalablement (série des critères A à F).*

---

**Annexe-3.1**

**Inventaire des lagunes à hydrocarbures référencées  
par BASOL (France)**

## INVENTAIRE DES LAGUNES A HYDROCARBURES REFERENCEES PAR BASOL (France métropolitaine)

Nom du site	Dernier exploitant	Propriétaire site	Commune	BASOL	Origine	Description	Situation
Station de déballastage	CCI	Etat (DDE) concession CCI Brest	Brest (29)	8	Lagune de traitement des eaux de ballasts polluées par les hydrocarbures	Surface lagune : 2,2 ha Volume lagune : 80000 m3 - 14000 m3 de boues et sédiments pollués par les hydrocarbures - 11000 m3 d'eaux boueuses	Réhabilitée (2005) : stabilisation in situ (procédé Inertec)
Friche Carbolux (Cokerie de Gosnay)	Cokerie de Gosnay	SCI du Bois des Dames EMMAUS Artois - Cdf	Bruay La Buisnière (62)	11	Pyrolyse de la houille (cokerie minière)	Mares à goudrons et produits phénolés (environ 5000 tonnes)	Extraction et destruction à l'extérieur des poches de goudrons visibles
Site de la Société Chimique de Gerland	Société Chimique de Gerland	Mairie de Saint Louis du Rhône	Port Saint Louis du Rhône (13)	12	Distillation des goudrons de houille puis unité de fabrication d'engrais arrêtée en 1962 (surface : 6 ha)	Soils et nappe polluée par les hydrocarbures, dépôt de brais et de goudrons	Traitement en incinération des brais et goudrons (290 t) (1995) Traitement par voie biologique des terres polluées par les hydrocarbures (environ 40000 m3) (1995) Neutralisation à la chaux et confinement sur site d'une partie des terres polluées (2002 à 2005)
Ancienne usine Esso	Esso	Société Termapol	Le Trait (la Mailleraye) (76)	13	Anciennes lagunes de <b>décantation</b> utilisées par un procédé de fabrication d'huiles (arrêt de l'activité de l'usine en 1974)	-	Première lagune neutralisée à la chaux en 1990 Seconde lagune vidangée et hydrocarbures incinérés chez Sedibex
Solunor	Solunor	Solunor	Baisieux (59)	16	Re raffinage des huiles usées	Soils et eaux souterraines de l'ancienne usine de traitement et de régénération des huiles usées pollués par les hydrocarbures et les solvants	Surveillance des eaux souterraines
Terri 205	CdF	CdF	Henin Beaumont (62)	20	Anciennes mares à goudrons exploitées par la cokerie de Drocourt entre 1972 et 1981	15 000 t de goudrons	Réhabilité : - Elimination des goudrons en incinération (2001) - Absence de pollution en fond de fouille - Traitement des bassins et remblaiement

## INVENTAIRE DES LAGUNES A HYDROCARBURES REFERENCEES PAR BASOL (France métropolitaine)

Nom du site	Dernier exploitant	Propriétaire site	Commune	BASOL	Origine	Description	Situation
Gerland	-	Société Gerland	Noyelles-sous-Bellone (62)	21	Dépôt de goudrons acides et terres souillées	13000 t de goudrons acides et terres souillées	Stabilisation sur site en 1983
Gerland	-	Société Gerland	Dury (62)	22	Dépôt de goudrons acides et terres souillées	Superficie de 2500 m <sup>2</sup> : 3500 t de goudrons acides et de terres souillées	Traitement physico-chimique et stabilisation sur site en 1985
Usine Cray Valley	Cray Valley	Société Cray Valley	Drocourt (62)	23	2 anciennes lagunes de décantation	Produits pâteux organiques	Résorption des dépôts réalisée par enlèvement et destruction des déchets à l'extérieur
Ancienne mare à hydrocarbures	BP France	Etat (DDE)	Coudekerque Branche (59)	29	Décharge sauvage (1957 à 1977)	Mare d'huiles usagées et d'hydrocarbures (surface 800 m <sup>2</sup> ) : goudrons sulfuriques et sols pollués	Réhabilité - Neutralisation des goudrons sulfuriques à la chaux - Traitement biologique des sols débuté en 1996
Ancienne lagune d'hydrocarbures Total RD	Total	Port Autonome du Havre	Gonfreville l'Orcher (76)	31	Ancienne fosse (lagune) ayant recueilli des hydrocarbures	Surface : 7100 m <sup>2</sup> , volume de produits de l'ordre de 1 1000 m <sup>3</sup>	Stabilisation in situ par procédé inertec en 2002 / 2003
Ancienne lagune d'hydrocarbures Mobil	Mobil	Mobil Oil France	Notre Dame de Gravanchon (76)	36	Ancienne fosse ayant recueilli des résidus d'hydrocarbures de la raffinerie Mobil	Terres et eaux souillées	Réhabilitation entre 1980 et 1990 : enlèvement et traitement externe
Société Esso	Esso	SCI Delattre	Notre Dame de Gravanchon (76)	34	Ancienne décharge	Déchets d'hydrocarbures provenant de terres de filtration	Enlèvement des déchets liquides pour incinération et stabilisation à la chaux des déchets solides (1998)
Ancienne raffinerie d'huiles minérales Okoil	Okoil	SA Hirsondis	Ville de Fourmies (59)	40	-	Sols pollués par des goudrons sulfuriques	Travaux de démolition en 1989 ayant aggravés la pollution des sols Elimination des déchets
Terrain CBL joutant Eco Huile	CBL	CBL	Lillebonne (62)	43	Dépôt lié au re raffinage des huiles usées (surface : 1, 1 ha)	30000 m <sup>3</sup> de déchets industriels incluant des cendres, des mâchefers d'incinération et des goudrons sulfuriques	Suivi des eaux souterraines
Ancienne cokerie d'Auby	CdF	-	Auby (59)	55	Pyrolyse de la houille (cokerie minière)	Sols pollués et dépôts de goudrons (environ 1600 m <sup>3</sup> )	Fin des travaux prévue en 2005

## INVENTAIRE DES LAGUNES A HYDROCARBURES REFERENCEES PAR BASOL (France métropolitaine)

Nom du site	Dernier exploitant	Propriétaire site	Commune	BASOL	Origine	Description	Situation
Ancienne raffinerie BP	BP France	BP France AXTER SIPC particuliers	Courchelettes (59)	58	2 lagunes de goudrons acides (dépot entre 1951 et 1973) recouvertes par 1 m de sables et graviers et géotextile	Lagon n°1 : 2300 m <sup>2</sup> , épaisseur 1,1 m, 2550 m <sup>3</sup> de goudrons Lagune n°2 : 2500 m <sup>2</sup> , 2 m d'épaisseur, 5000 m <sup>3</sup> de goudrons	Ancienne raffinerie BP
Ancienne cokerie SIM BAIL	SIM BAIL	Ville de Monchecourt	Monchecourt (59)	63	Pyrolyse de la houille (cokerie sidérurgique)	Sols pollués et mare de goudrons (environ 10000 m <sup>3</sup> )	Début 2004 : 1 <sup>ère</sup> phase de travaux terminée. Nouveau confinement en cours de préparation
Décharge Lemahieu	Liloil	Liloil	Abscon (59)	66	Ancienne carrière de craie (800 m <sup>2</sup> ) utilisée comme décharge	Ordures ménagères et goudrons sulfuriques (2000 m <sup>3</sup> )	Traitement physico chimique et confinement des goudrons sulfuriques en 1984
Raffinerie Shell de Berre – Shell Pétrochimie Méditerranée (SPM)	Shell	Shell	Berre l'Etang (13)	70	Source J28 : Fuite probable	Source J28 : mélange d'hydrocarbures (< 1 ha) Source H20 : mélange d'hydrocarbures avec présence de benzène (1 à 10 ha)	En l'état
Ancienne cokerie de Lourches	CdF	CdF	Lourches (59)	70	Pyrolyse de la houille (cokerie minière)	Stockages de boues polluées et mares à goudrons	Requalification sommaire par EPF
Raffinerie de Bourron	Société des Raffineries de Bourron	SOGEFIM (propriétaire parcelle H205)	Bourron Marlotte (77)	82	Mare d'hydrocarbures constituée par déversement de déchets (distante d'1 km de la raffinerie)	Déversement de déchets sur parcelle H205 (zone boisée)	Enlèvement pour traitement externe de 25000 tonnes de déchets liquides ou visqueux en 1985. Stabilisation des résidus visqueux sur place

## INVENTAIRE DES LAGUNES A HYDROCARBURES REFERENCEES PAR BASOL (France outremer)

Nom du site	Dernier exploitant	Propriétaire site	Commune	BASOL	Origine	Description	Description
Pripris de la centrale EdF de Dégrad des Cannes	EdF	-	Rémire-Montjoly (973)	1	Réception des eaux pluviales de la centrale thermique	Terrains marécageux pollués par des hydrocarbures provenant de la centrale thermique voisine	En l'état
Centrale thermique EdF	EdF	-	Saint-Laurent du Maroni (973)	2	Réception des eaux pluviales de la centrale thermique	Terrains marécageux pollués par des hydrocarbures provenant de la centrale électrique voisine	En l'état
Pripris de la centrale EdF de Pariacabo :	EdF	CSG	Kourou (973)	3	Réception des eaux pluviales de la centrale thermique	Etang et terrains marécageux (prispris) sont pollués par des hydrocarbures provenant de la centrale électrique voisine	En l'état

---

**Annexe-4.1**

**Liste non exhaustive des composés chimiques susceptibles  
d'être présents dans les lagunes à goudrons acides**

1,1,1-Trichloroethane	Cadmium	Naphthalene
1,1,2-Trichloro-1-propene	Carbon disulphide	Nickel
1,1,Thiobismethane	Chloroform	Nonane
1,4-Dichlorobenzene	Chloromethane	Octane
1-Cyclohexen-1-ol	Chromium	o-Xylène
1-Methyl-2-propolidimone	Chrysene	p-chloro-m-cresol
1-Methylcyclohexane	Cobalt	Pentamethylbenzene
1-Methylthiobutane	Copper	Phenanthrene
1-Methylthiopropene	Cyclohexane	Phenol
2,3,Dimethyl-2,5-cyclohexadiene-1,4-dione	Decane	Polychlorinated biphenyls
2,4,6-Trichlorophenol	Dibenzo(a,h)anthracene	Anthracene
2-Azodi-2,3,3-trimethylbutane	Diethyl disulphide	Potassium
2-butanone	Diethylphthalate	Propane
2-Cyclohexen-1-one	Dimethyl sulphide	Propylbenzene
2-Hexanone	Dimethylbenzene	Propylene
2-methyl-2-butanol	Dimethylcyclohexane	p-Xylene
2-Methyl-2-propanol	Dimethylcyclopropane	Pyrene
2-Methylnaphthalne	Dimethylhexane	Selenium
2-Methylphenol	Dimethylpentane	Silver
2-Methylthiobutane	Dimethylthiocyclohexane	Sodium
3-Methylthiophene	Di-n-butylphthalate	Sulphate
4-Chloro-trans-hexanol	Di-n-octylphthalate	Sulphur dioxide
4-Methylphenol	Esters	Sulphuric acid
4-Nitrophenol	Ethane	Sulphurous acid
Acenaphthene	Ethene	Tetraethylester diphosphoric acid
Acenaphthylene	Ethylbenzene	Tetrahydro-2-methyl-2thiopyrane
Acetone	Ethylhexane	Tetrahydro-2-methylthiophene
Acetylene	Ethylmethylbenzene	Tertrahydro-3-methylthiophene
Aluminium	Fluoranthene	Tetrahydrodimethylthiophene
Arsenic	Fluorene	Tetrahydrothiophene
Barium	Heptane	Tetramethylbenzene
Benzene	Hexane	Tetramethylcyclohexane
Benzo(a)anthracene	Iron	Thallium
Benzo(a)pyrene	Isobutane	Thiophene
Benzo(b)fluoranthene	Isopentane	Toluene
Benzo(g,h,i)perylene	Lead	Trimethylbenzene
Benzo(k)fluoranthene	Magnesium	Trimethylcyclohexane
Benzoic acid	Manganese	Trimethylcyclopropane
Beyllium	Mercury	Trimethylhexane
Bis(2-ethylhexyl)phthalate	Methane thiol	Trimethylpentane
Butadiene	Methyl cyclohexane	Vanadium
Butane	Methylcyclopentane	Zinc
Butene	Methylheptane	
Butylbenzene phthalate	Methylhexanes	
C3-benzene, C4-benzene, C5-benzene	Methylmercaptan	
C3-cyclohexane	Methylpentanes	
	Methylthiocyclohexane	
	m-Xylene	