



**ETUDE N° 04-0511/1A**

**SYNTHESE DE L'ETUDE**

**FRANÇAIS / ANGLAIS**

**SUIVI DE LA PERFORMANCE DES BIOPROCEDES  
DE TRAITEMENT DES SOLS**

**juin 2006**

**O. SCHOEFS – UTC**

# Suivi de la performance des bioprocédés de traitement des sols

## 1 Contexte de l'étude

Les bioprocédés de traitement des sols sont reconnus pour être des alternatives bon marché aux procédés thermiques ou physico-chimiques. Pourtant depuis une dizaine d'années, ils sont de moins en moins utilisés dans le secteur de la restauration des sites pollués. Cette diminution est principalement due à l'utilisation d'alternatives moins incertaines notamment pour les restaurations de sites *in situ*. L'utilisation des techniques biologiques est donc en grande partie limitée par les incertitudes liées :

- au succès qualitatif de la technologie (biodégradation du polluant en composés moins toxiques),
- au succès quantitatif de la technologie en fonction du niveau de dépollution visé,
- à la durée du traitement (très variable et peu prévisible),
- aux conditions optimales d'opération (souvent méconnues).

## 2 Objectif et plan de l'étude

### 2.1 Objectif

L'objectif principal de l'étude a consisté à sélectionner ou développer un outil fiable et bon marché capable de réduire les incertitudes liées à l'efficacité des bioprocédés de traitement des sols, permettant ainsi à ces bioprocédés d'être une alternative fiable aux autres technologies plus coûteuses (économiquement, environnementalement et socialement). Les outils, ou combinaisons d'outils, éligibles ont été évalués selon leur capacité à atteindre les deux objectifs suivants :

1. Suivre la performance globale du procédé en termes d'atteinte des objectifs de dépollution.

2. Suivre la performance du bioprocédé dans une optique de conduite optimale du procédé.

Sur la base d'avis d'experts, l'étude devait mener à des propositions d'axes de recherche et/ou de développement.

## 2.2 Cadre et limites de l'étude

L'étendue de l'étude a été limitée par les considérations suivantes :

1. Suivi de la performance une fois le bioprocédé sélectionné.
2. Phases libre et volatile préalablement extraites.
3. Pollution organique (sans autre restriction *a priori*).

## 2.3 Méthodologie de travail

La première étape a consisté à cerner l'étendue des outils disponibles en identifiant les grandes catégories.

En fonction des catégories d'outils identifiées, la deuxième étape a consisté à constituer un comité d'experts capable d'évaluer ces outils par rapport à l'objectif visé.

La troisième étape a visé à élaborer un questionnaire permettant à l'expert consulté :

- d'exposer sa vision générale sur la situation actuelle concernant le suivi de la performance des bioprocédés de traitement des sols,
- de compléter la liste d'outils métrologiques disponibles,
- de remplir des fiches d'évaluation des outils et combinaisons d'outils,
- d'exposer son opinion sur la méthodologie à suivre pour rencontrer l'objectif visé.

La quatrième étape a consisté en une analyse des réponses des experts et à proposer des axes de recherche pour le développement d'un outil permettant le suivi de la performance des bioprocédés de traitement des sols. Cette étape comprend ainsi une réunion de discussion entre les experts consultés.

# 3 Exposé des principaux résultats obtenus

## 3.1 Revue des outils existants et des initiatives en cours

### Identification des catégories d'outils

On distingue deux types d'outils : les outils métrologiques et les outils d'interprétation.

Les outils métrologiques, caractérisés par la quantification de grandeurs mesurables, peuvent être classés en fonction des principes de mesure suivants :

- Méthodes analytiques réalisées sur des échantillons de sol (réalisées sur site ou hors site),
- Sondes ou capteurs géotechniques installés dans la matrice de sol,
- Outils géophysiques installés sur ou dans la matrice de sol.

Une analyse des principales caractéristiques de ces trois catégories d'outils a montré clairement qu'aucune catégorie d'outils métrologiques ne permet de suivre tous les facteurs contrôlant la biodégradation dans le sol. De plus, certains facteurs ne sont mesurés que localement et/ou de façon discontinue dans le temps. A noter également qu'aucun outil ne constitue à lui seul un outil prédictif.

Les outils d'interprétation rassemblent tous les outils traitant les données brutes fournies par les outils métrologiques dans le but d'estimer d'autres indicateurs. Malgré la diversité des outils d'interprétation possibles, trois catégories peuvent être distinguées :

- Outils géostatistiques,
- Outils mathématiques (modèles phénoménologiques ou empiriques),
- Expérience du gestionnaire.

Une analyse des caractéristiques des outils d'interprétation a montré que les outils d'interprétation ont tous des avantages et des inconvénients et qu'aucun ne permet de satisfaire à lui seul tous les objectifs visés.

### **Revue des initiatives en cours**

L'expertise sur le suivi de la performance des bioprocédés de traitement des sols existe aussi bien au niveau européen, qu'au niveau international. Toutefois, les initiatives menées durant les dernières années en terme de métrologie a plus porté sur les eaux souterraines que sur les sols. Ainsi l'élaboration de projets spécifiques sur les sols pollués à l'échelle européenne est pertinente.

## **3.2 Synthèse des réponses au questionnaire, des réunions des comités d'experts et des entrevues**

Le questionnaire est divisé en trois parties :

- Partie A : Diagnostic sur la situation actuelle
- Partie B : Synthèse des outils métrologiques existants
- Partie C : Perspectives

Dans la partie A, trois sections comportant des questions différentes ont été créés selon la fonction de l'expert :

- Questions aux gestionnaires de sites pollués ou de biocentres
- Questions aux acteurs directs de la réglementation
- Questions aux chercheurs, prestataires de services et développeurs de technologies

### **Constitution des comités d'experts**

Deux comités d'experts ont été constitués, l'un européen (13 experts), l'autre canadien (10 experts). Le choix des experts a été réalisé en s'assurant d'une bonne représentativité du monde industriel, universitaire et réglementaire, d'une part, et des différentes disciplines concernées (bioprocédés, microbiologie, géotechnique, géophysique, géostatistique).

### **Avis des gestionnaires de sites**

L'outil le plus utilisé, et de loin, pour suivre la performance des bioprocédés de traitement des sols est l'analyse en laboratoire (physico-chimique, biologique et (éco-)toxicologique)

d'échantillons prélevés à l'aide d'outils géotechniques. C'est en effet l'outil le plus fiable en ce qui concerne l'atteinte des objectifs de dépollution. Toutefois, malgré la fiabilité reconnue des méthodes analytiques à partir d'échantillons de sol, elles ne constituent pas, et de loin, l'outil de suivi idéal. En particulier, les difficultés suivantes sont toujours rencontrées et constituent un frein au développement des bioprocédés de traitement des sols :

- Coût élevé des campagnes d'échantillonnage et des analyses effectuées
- Impossibilité de prédire de façon fiable les niveaux de pollution et de risque résiduels en fonction du temps de traitement
- Réduction de l'incertitude spatiale sur l'atteinte des objectifs souvent limitée par des contraintes budgétaires
- Impossibilité d'optimiser le procédé en temps réel
- Absence (ou presque) d'information fiable sur plusieurs phénomènes potentiellement limitants : activité de microbienne, biodisponibilité, oxygénation, etc.

### **Avis des prescripteurs de réhabilitation de sites**

La réglementation en France repose plus sur une obligation de résultats que sur une obligation de moyens. Ainsi, les outils de suivi des niveaux de pollution et de risque résiduels sont les seuls outils nécessaire d'un point de vue réglementaire. En ce sens, les campagnes d'échantillonnages et les analyses en laboratoire répondent adéquatement aux besoins de la réglementation d'autant plus que les guides de prélèvement, d'échantillonnage et d'analyse sont bien établis.

Toutefois, le régulateur et le gestionnaire de sites sont souvent confrontés à la difficulté de réduire l'incertitude spatiale (due à l'hétérogénéité du site) à un coût acceptable. Aussi, le délai entre les prélèvements et les résultats d'analyse constitue un frein à une gestion dynamique des sites. L'utilisation d'outils d'analyse de chantier permet de réduire aussi bien les coûts que les délais mais ces outils demeurent encore très imprécis.

### **Avis des chercheurs, prestataires de services et développeurs de technologie**

Outre les campagnes d'échantillonnages et d'analyses, d'autres outils métrologiques ou d'interprétation sont disponibles mais peu utilisés au niveau industriel. On peut en particulier citer les catégories d'outils suivantes :

- les outils géophysiques,
- les outils géotechniques,
- les outils géostatistiques,
- les outils mathématiques.

L'intérêt des outils géophysiques réside dans la non intrusivité du principe de mesure. Ils permettent également d'obtenir une distribution spatiale de la variable mesurée ainsi qu'une acquisition de données en temps réel. Toutefois, le nombre de variables clés mesurées reste faible et l'exactitude et la précision des mesures sont limitées par les techniques de traitement du signal. Enfin, l'applicabilité des outils géophysiques est étroitement liée à la topographie du sol. Néanmoins, les outils géophysiques ont déjà été utilisés avec succès pour estimer l'étendue d'une pollution sur un site et identifier les zones fortement polluées.

Plusieurs outils géotechniques, consistant en des sondes installés dans la matrice de sol, sont bien établis mais sous-utilisés en France comparativement à l'Amérique du Nord et même au reste de l'Europe.

Les outils géostatistiques ont connus un développement rapide et sont prêts à être utilisés au niveau industriel. Or ces outils d'interprétation sont encore sous-utilisés. Ceci est principalement dû à une mauvaise réputation établie par des études passées décevantes, une certaine réticence à l'utilisation de méthodes statistiques perçues comme complexes et l'absence d'une culture de valorisation des données acquises.

Enfin, les outils mathématiques consistent principalement en des modèles phénoménologiques ou empiriques et en des capteurs-logiciels. Les capteurs-logiciels sont des algorithmes d'estimation en temps réel de variables non mesurées ou de paramètres inconnus à partir d'un modèle phénoménologique et de mesures en ligne.

### 3.3 Fiches d'évaluation des outils métrologiques et d'interprétation

#### Élaboration des fiches d'évaluation

Deux fiches d'évaluation des outils métrologiques et d'interprétation ont été créées. La première concerne l'évaluation des outils en terme de capacité à vérifier si les objectifs de dépollution sont atteints ou non. La deuxième fiche vise à évaluer les outils par rapport à leur capacité à suivre les variables clés dans une optique de conduite optimale du bioprocédé.

En ce qui concerne l'évaluation relative à l'atteinte des objectifs de dépollution, les outils ont été évalués selon les critères suivants :

- Exactitude de la mesure
- Précision de la mesure
- Représentativité spatiale par rapport au coût
- Robustesse, confiance
- Prédiction de la durée du traitement

En ce qui concerne l'évaluation relative à la conduite du bioprocédé dans des conditions optimales, les outils ont été évalués selon les critères suivants :

- Quantification de la concentration en polluant
- Quantification du contenu en eau
- Quantification de la concentration en nutriments
- Quantification de l'oxygène disponible
- Quantification des microorganismes dégradeurs
- Identification du phénomène limitant
- Coût par rapport à la représentativité spatiale
- Coût par rapport à la fréquence de la mesure

Les outils métrologiques sujets à évaluation ont été les suivants :

1. Echantillonnage et analyse en laboratoire
2. Echantillonnage et analyse sur site

3. Analyse de la phase gaz au moyen d'outils géotechniques
4. TDR (Time Domain Reflectometry)
5. Tensiomètres
6. Sondes de conductivité électrique
7. GPR (Ground Penetrating Radar)
8. Méthodes géophysiques électriques
9. Méthodes géophysiques électro-magnétiques

Les outils métrologiques peuvent être couplés entre eux. La contribution d'un outil utilisé en couplage avec un autre a donc aussi été évaluée dans les fiches. Aussi des outils peuvent être utilisés pour extrapoler des mesures ou estimer des variables non mesurées et des paramètres inconnus en se basant sur les mesures faites par les outils métrologiques. La contribution de tels outils, appelés ici outils d'interprétation, a donc aussi été évaluée dans les fiches. Les outils d'interprétation sujets à évaluation ont été les suivants :

1. Expérience personnelle du gestionnaire de site
2. Méthodes géostatistiques
3. Modèles mathématiques phénoménologiques
4. Modèles empiriques

### **Synthèse des réponses**

Les fiches d'évaluation des outils métrologiques et d'interprétation ont permis de mettre en évidence plusieurs constats.

Tout d'abord, aucun outil ne permet à lui seul de répondre aux exigences aussi bien du point de vue de la vérification de l'atteinte des objectifs de dépollution que du point de vue de la conduite du bioprocédé. Cependant, le couplage d'outils est prometteur pour répondre aux critères sur l'atteinte des objectifs. Ainsi, d'après l'avis des experts, le couplage d'outils géophysiques et géostatistiques à des analyses en laboratoire permettrait de vérifier l'atteinte des objectifs de dépollution avec une exactitude, une précision et une représentativité spatiale satisfaisante et ce à un coût acceptable. Ceci doit être validé par une ou plusieurs démonstrations de terrain avant de pouvoir statuer définitivement sur l'adéquation des outils existants pour le suivi de la performance en termes de vérification de l'atteinte des objectifs de dépollution. Il est également important de noter que la faiblesse des outils disponibles réside encore sur leur incapacité à prédire précisément la fin du traitement. Cette incertitude constitue un frein important à l'utilisation des procédés biologiques de traitement des sols et devra faire l'objet d'une attention particulière dans les recherches à venir.

Ensuite, autant les outils métrologiques et d'interprétation disponibles sont prometteurs vis à vis de la vérification de l'atteinte des objectifs de dépollution, autant ils s'avèrent moins bien adaptés dans un contexte de conduite de procédé. Une attention particulière doit être apportée à l'acquisition en temps réel et à moindre coût de données pertinentes, fiables et

utilisables pour la conduite optimale des bioprocédés. En particulier, les outils de suivi de l'activité microbienne et de l'évolution du risque (éco-)toxicologique résiduel font cruellement défaut. Il est peu probable que les outils existants puissent faire face à ces difficultés de sorte que la conduite des bioprocédés de traitement des sols dans la zone vadoze passe très probablement par le développement de nouveaux outils métrologiques et d'interprétation.

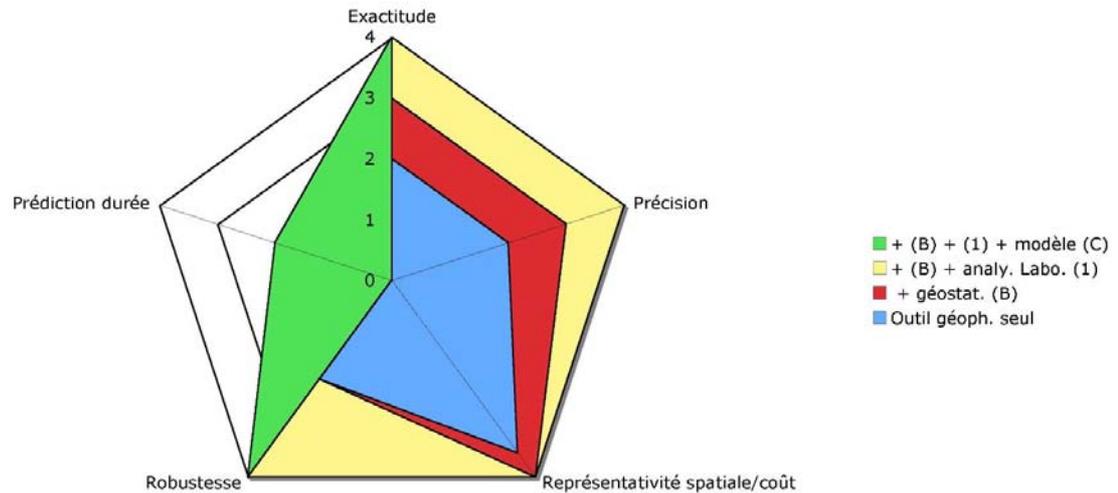


FIG. 1: *Évaluation estimée d'une combinaison d'outils / objectifs de dépollution.*

### 3.4 Proposition d'axes de recherche

Les axes de recherche et/ou de développement proposés sont les suivants :

1. Validation par une démonstration de terrain de l'efficacité de la combinaison d'outils géophysiques, géostatistiques, analytique et mathématique pour le suivi de la performance des bioprocédés en termes d'atteinte des objectifs de dépollution.
2. Aide à la recherche pour le développement d'un nouvel outil ou l'amélioration significative des outils existants pour le suivi de la performance dans une optique de conduite des bioprocédés.
3. Organisation d'un atelier de travail international et pluridisciplinaire.
4. Développement d'un module d'aide à la sélection d'outils métrologiques et d'interprétation utilisables par les gestionnaires de sites et les prestataires de service.
5. Développement d'outils d'analyse de chantiers permettant 1) de réduire le délai entre les prises d'échantillons et les résultats d'analyse, et 2) d'augmenter la fiabilité des mesures.
6. Augmentation du niveau de connaissance sur les phénomènes mis en jeu.

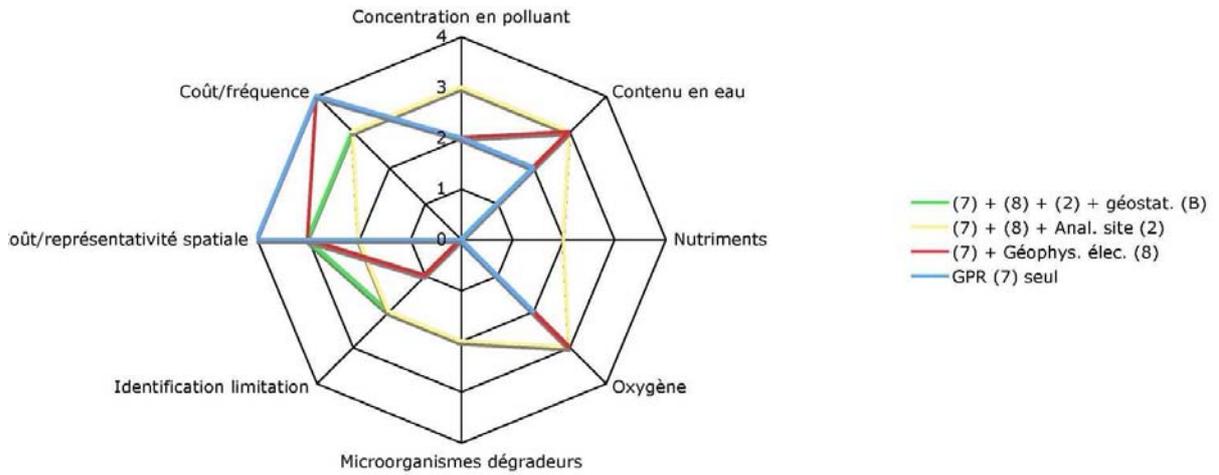


FIG. 2: *Évaluation estimée d'une première combinaison d'outils / conduite du bioprocédé.*

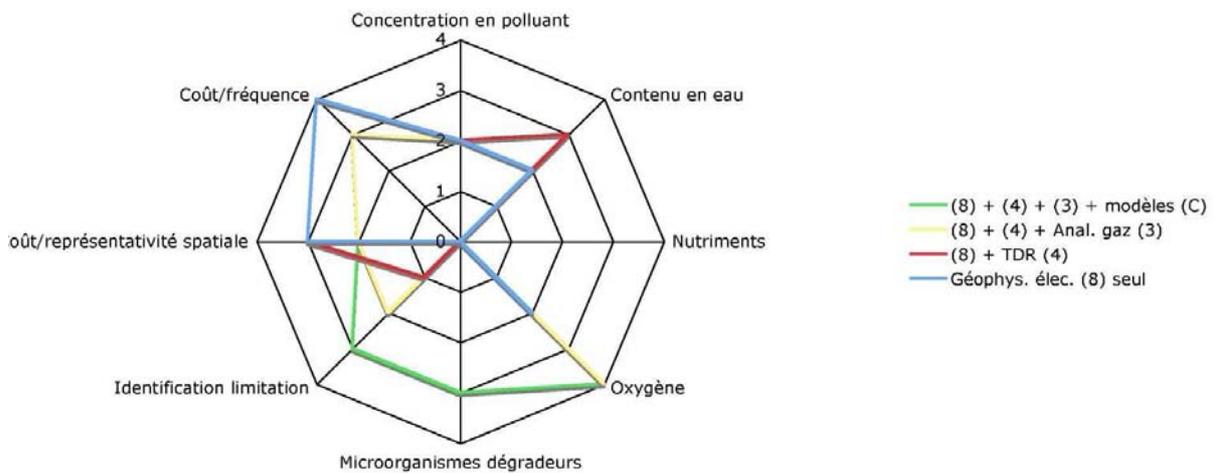


FIG. 3: *Évaluation estimée d'une seconde combinaison d'outils / conduite du bioprocédé.*

# Monitoring the Efficiency of Soil Clean-up Bioprocesses

## 1 Background

Soil clean-up bioprocesses are known to be low cost alternatives to physico-chemical and thermal processes. Nevertheless, during the past decade, *in situ* soil clean-up bioprocesses, and to a lesser extent *ex situ* soil clean-up bioprocesses, are less and less chosen by site managers. This can be partly attributed to different uncertainties during their use. The use of biological techniques is then limited by uncertainties related to :

- the qualitative success of the process (contaminant biodegradation into less toxic compounds),
- the quantitative success of the process (i.e. to reach the decontamination objectives),
- the duration of the treatment (variable and difficult to predict),
- the optimal operating conditions (most of the time unknown).

## 2 Objective and limits

### 2.1 Objective

The main objective of this study was to select or develop a cheap and reliable tool capable of reducing the uncertainties related to the efficiency of soil clean-up bioprocesses, in order to make them be alternatives to other costly soil-clean up processes (economically, environmentally and socially). These eligible tools, or combinations of tools, were evaluated according to their capacity to reach the following objectives :

1. Monitoring the global efficiency of the process in terms of reaching the decontamination objectives
2. Monitoring the process efficiency in order to operate it under optimal operating conditions.

Based on experts points of view, this study was supposed to lead to propositions of research and/or development axes.

## 2.2 Limits of the study

The study was limited considering that :

1. the choice of the clean-up process is done.
2. free and volatile phases were previously removed.
3. the contamination is an organic one without any other restriction.

## 2.3 Methodology

The first step consisted in listing the eligible tools and of identifying the main categories.

The second step consisted in constituting an experts committee who will be in charge of evaluating the selected tools.

In the third step, a questionnaire was elaborated in order to help the experts to :

- expose general opinion to the state of the art,
- to complete the list of eligible tools,
- to fill the tool evaluation sheets,
- to suggest future actions.

The last step consisted in analysing the experts answers and to propose future actions in research and development that will lead to the development of a tool capable of monitoring the efficiency of soil-clean-up bioprocesses.

# 3 Results

## 3.1 Revue of the existing tools and of current initiatives

### Identification of the tool categories

Two types of tools can be distinguished : the metrological tools and interpretation tools.

The metrological tools, that aimed at quantifying measurable variables, can be classified depending on the following principles of measurement :

- *on site* or *ex situ* analytical methods performed on soil sampled,
- geotechnical probes or sensors installed in the soil matrix,
- geophysical tools installed on the soil top surface or inside the soil matrix.

An analysis of the main characteristics of these three tool categories have shown that none of them permits to monitor the efficiency of soil clean-up bioprocesses if one tool is used alone. Moreover some variables are measured locally and/or off-line. Finally, metrological tools cannot be used for prediction purpose.

Interpretation tools correspond to tools that are used for data processing provided be metrological tools in order to estimate other variables or parameters. One can distinguish three categories :

- Geostatistical tools,
- Mathematical tools (phenomenological and empirical models),
- Site manager experience.

Une analyse des caractéristiques des outils d'interprétation a montré que les outils d'interprétation ont tous des avantages et des inconvénients et qu'aucun ne permet de satisfaire à lui seul tous les objectifs visés.

### **Revue of current initiatives**

Expertise on monitoring of the efficiency of soil clean-up bioprocesses exist at the international level as well as at the European level. However, most of previous investigation and development activities were applied to site remediation in the aquifer and only few activities were applied for remediation activities in vadose zone. It is then relevant to promote specific studies applied to the vadose zone.

## **3.2 Synthesis of questionnaire responses and of individual/group experts meeting**

The questionnaire is divided into three parts :

- Part A : Diagnostic on the current situation
- Part B : Synthesis of existing metrological and interpretation tools
- Part C : Perspectives

In part A, three sections were identified, each of them dedicated to the three categories of expertise : regulation, scientific research, and industrial site management and remediation.

### **Constitution of the experts committee**

Two committees were constituted, an European one formed by 13 experts and a Canadian one formed by 10 experts. The experts selection procedure was realized in order to get a good representativity of the industrial and academic world, and of the different scientific domains involved : bioprocesses, microbiology, geotechnics, geophysics and geostatistics).

### **Opinion of site managers**

The most accepted tool to monitor the efficiency of soil clean-up bioprocesses, is, by far, the *ex situ* analytical measurement of physico-chemical and biological parameters form soil samples. It is the most reliable tool but it is not the perfect one. Indeed the following drawbacks curbs the use of bioprocesses :

- Analytical measurement and sampling campaigns are very expensive
- Prediction of treatment duration is impossible
- Reduction of the spatial uncertainty is limited by cost considerations
- Real time process optimization is impossible
- Information concerning the limiting phenomena is very limited because the delay of analysis

### Opinion of regulators

In France, regulation is based on results achievement rather than on means obligations. It results that tools that are able to characterize correctly the site contamination at a given time are sufficient. Therefore sampling campaigns and *ex situ* analytical measurements are appropriate and sampling and analytical guides are well-established.

However, regulators are confronted with the same drawbacks revealed by site managers. Some on-site analytical tools permit to reduce characterization costs but the measurement is not precise enough to be accepted by regulators.

### Opinion of the scientific community and site remediation professionals

Sampling campaigns and *ex situ* analytical measurements are the most commonly used techniques to monitor the efficiency of soil clean-up bioprocesses. However, other techniques are also available but are used for site pre-characterization rather than for bioprocess monitoring. These tools can be classified into three categories :

- Geophysical tools
- Geotechnical tools
- Geostatistical tools
- Mathematical tools

Geophysical tools are very interesting because of their non-intrusivity. Advantages are also that they permit a spatial and on-line measurement. However, the number of key parameters is very limited and the measurements are not very accurate and precise due to strong interference in soil matrices, which leads to the use of advanced signal processing techniques. Finally, the applicability of geophysical tools depends on soil topography. Such techniques are appropriate to estimate the extent of a contaminated zone and to identify the highest contaminated ones.

Several geotechnical tools, consisting in measuring variables from probes installed in the soil matrix, are well-established but are not widely used in France compared to North-America and the rest of Europe.

Geostatistical tools were developed in the past decades and are ready to use at the industrial level. However, these tools are not very used. This is mainly due to prejudice caused by past non-convincing studies and to ignorance of the tool capacities. Indeed, geostatistical tools are often considered as complex tools and site managers are not convinced by the culture of the valorization of collected data.

Finally, mathematical tools mainly consist in phenomenological or empirical models and in software sensors. Software sensors are mathematical algorithms that permit to estimate in real time unknown parameters or non measured variables based on mathematical model and on-line measurement of key variables.

### 3.3 Evaluation sheets of metrological and interpretation tools

#### Design of the evaluation sheets

Two evaluation sheets were created. The first one concerns the evaluation of metrological and interpretation tools according to their capacity to check whether the decontamination objectives are encountered or not. The second one aims at evaluating the tools according to their capacity to monitor the bioprocess in order to operate it under optimal conditions.

Concerning the evaluation related to the decontamination objectives, the criteria are the following ones :

- Measure accuracy
- Measure precision
- Spatial representativity compared to the cost
- Measure robustness and confidence
- Prediction of treatment duration

Concerning the evaluation related to the process operation under optimal conditions, the criteria are the following ones :

- Quantification of the contaminant concentration
- Quantification of water content
- Quantification nutrients concentration
- Quantification of available oxygen
- Quantification of contaminant degraders
- Identification of the limiting phenomena
- Cost compared to the spatial representativity
- Cost compared to the sampling frequency

Metrological tools, that were evaluated, are the following ones :

1. Sampling and laboratory analytical measurement
2. Sampling and on site analytical measurement
3. Gas phase analysis from geotechnical tools
4. TDR (Time Domain Reflectometry)
5. Tensiometers
6. Electrical conductivity probes
7. GPR (Ground Penetrating Radar)
8. Electrical geophysical methods
9. Electromagnetic geophysical methods

Metrological tools can be coupled together and have then also been evaluated when coupled. In the same way, metrological tools coupled with interpretation tools have been evaluated. Interpretation tools considered in this study are :

1. Professionnel experience of site manager

2. Geostatistical tools
3. Phenomenological mathematical models
4. Empirical models

### Synthesis of responses

The evaluation sheets have revealed several statements.

First, no tool permits to monitor the efficiency of soil clean-up bioprocesses when the tool is used alone. However, monitoring the efficiency in terms of evaluating the decontamination objectives can be considered if several tools are coupled. Based on the experts points of view, one promising tool to monitor efficiency in terms of decontamination objectives would be a coupling between a geophysical tool, a geostatistical tool, and sampling and analytical measurements in laboratory. The efficiency of such a coupling, including the evaluation of accuracy, precision, spatial representativity and cost, should be validated by field studies. It must be noted that even if the coupled tools are promising, they cannot be used as predictive tools. This drawback constitutes a significant break to large use of soil clean-up bioprocesses and should be considered in future works.

Second, while existing metrological and interpretation tools are promising to monitor soil clean-up bioprocesses in terms of evaluating the decontamination objectives, these tools appear to be less adapted in a context of process optimal regulation. Future works should focus on on-line data acquisition systems to monitor at low cost key process parameters. In particular, on-line monitoring of the microbial activity and of the (eco-)toxicological impact is a real challenge. To the experts opinion, existing tools cannot cope with this challenge so that development of new metrological and interpretation tools is to encourage.

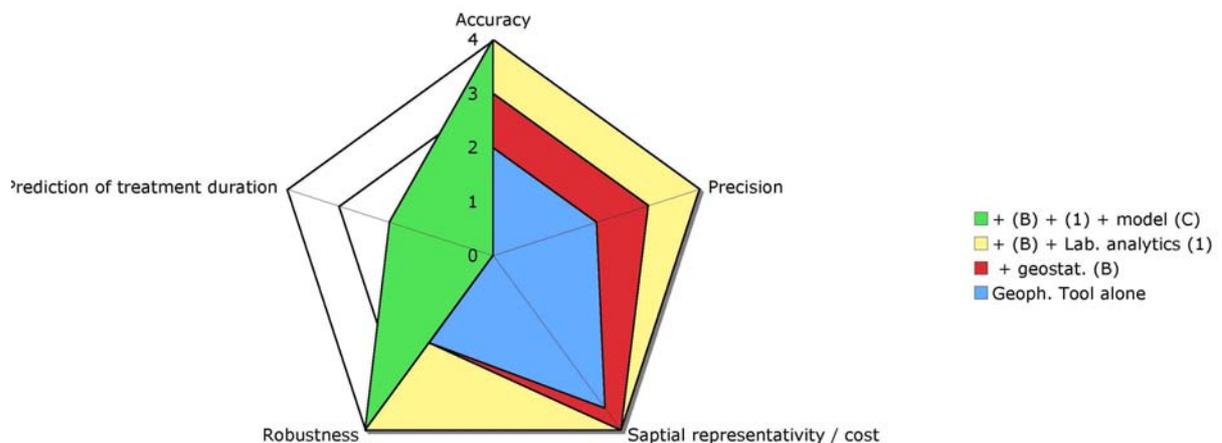


FIG. 1: *Evaluation of a set of coupled tools / decontamination objectives.*

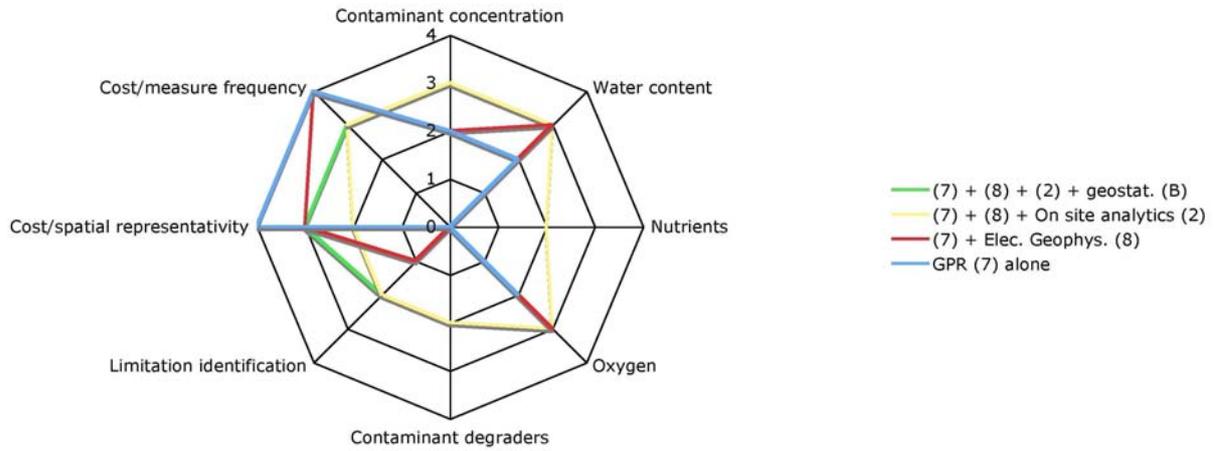


FIG. 2: Evaluation of a first set of coupled tools / process regulation.

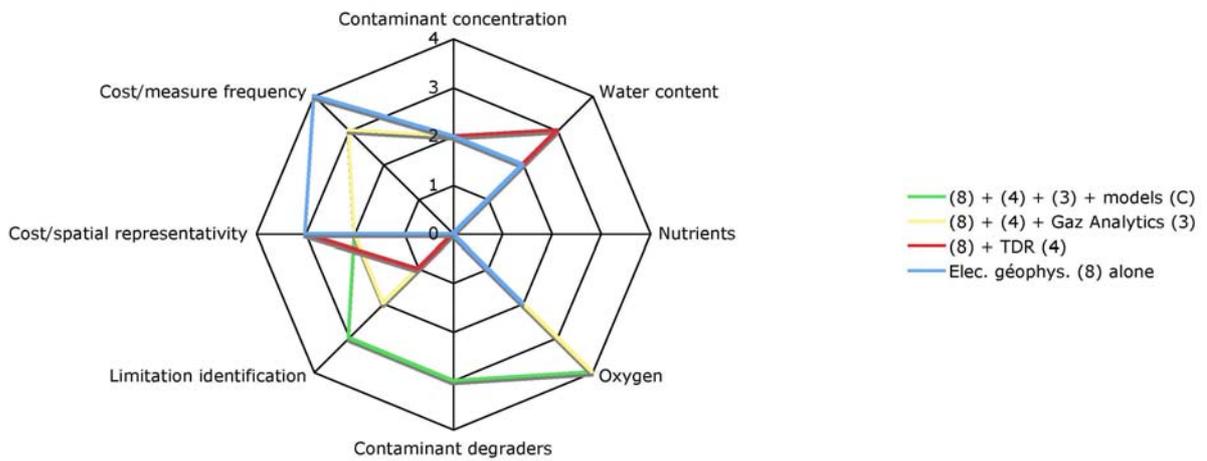


FIG. 3: Evaluation of a second set of coupled tools / process regulation.

### 3.4 Proposals of research orientations

Proposals of research orientations are :

1. Validation of the efficiency of coupling geophysical, geostatistical, analytical and mathematical tools for the monitoring of the performance of soil clean-up bioprocesses in terms of decontamination objectives - large scale study.
2. Support research orientations for the development of new metrological and interpretation tools capable of providing on-line robust information for process regulation.
3. Organization of an international multidisciplinary workshop on metrology of soil clean-up bioprocesses.
4. Development of a toolbox of decision-making aid in order to help site managers and consulting firms choosing the appropriate metrological and interpretation tools.
5. Development of on-site metrological tools in order to 1) reduce time delay between sampling and analytical results, and 2) increase measure reliability.
6. Support studies leading to a better understanding of the phenomena involved during biodegradation in the vadoze zone.