

Suivi de la performance des bioprocédés de traitement des sols



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

RAPPORT FINAL

juillet 2006

O. SCHOEFS – UTC

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, Suivi de la performance des bioprocédés de traitement des sols, 2006, 53 p, n°04-0511/1A.

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

© RECORD, 2006

Résumé

Les bioprocédés de traitement des sols sont reconnus pour être des alternatives bon marché aux procédés thermiques ou physico-chimiques. Or depuis les dix dernières années, les bioprocédés *in situ* et, dans une moindre mesure, les bioprocédés *ex situ* sont de moins en moins utilisés par les gestionnaires de sites. Le recul des bioprocédés de traitement est en partie attribuable aux différentes incertitudes liées à leur utilisation. En particulier, les outils disponibles pour savoir si les objectifs de dépollution sont atteints ou pour une conduite optimale du bioprocédé présentent tous un ou plusieurs inconvénients majeurs (coût, mauvaise représentativité spatiale, mesure hors ligne, paramètre clé non-mesuré, etc.).

Les outils métrologiques et d'interprétation disponibles pour le suivi de la performance des bioprocédés de traitement des sols sont nombreux et issus de disciplines bien distinctes : analytique, géotechnique, géophysique, géostatistique, mathématiques. En revanche, ces outils sont souvent utilisés seuls et ne permettent pas, dans la situation actuelle, de suivre adéquatement les bioprocédés de traitement de sol, aussi bien vis à vis de la vérification de l'atteinte des objectifs de dépollution que vis à vis de la conduite optimale du bioprocédé. Des fiches d'évaluation des outils ont alors été créées et remplies par des experts des différentes disciplines. Elles ont permis de mettre en évidence les lacunes des différents outils métrologiques et d'interprétation et de faire apparaître les combinaisons d'outils qui permettraient de répondre aux objectifs de suivi de la performance des bioprocédés de traitement. Les résultats des évaluations montrent que le suivi de la performance des bioprocédés en termes de vérification de l'atteinte des objectifs est possible à moindre coût à condition de coupler plusieurs outils. Ainsi, l'utilisation séquentielle d'outils géophysiques, géostatistiques, analytiques et mathématiques est très prometteuse de l'avis des experts. Toutefois cette stratégie doit être validée par des recherches et des démonstrations dans l'avenir. En ce qui concerne les chances de succès pour le suivi de la performance vis à vis de la conduite (optimale) des bioprocédés, les experts sont beaucoup plus prudents. En effet, dans l'état actuel du développement des outils métrologiques et d'interprétation, il ne semble pas possible d'avoir un suivi adaptée à la conduite des bioprocédés. Ceci est dû non seulement manque d'outils de mesure en ligne, suffisamment précis et peu onéreux mais aussi à la méconnaissance des phénomènes mis en jeu et des conditions optimales d'opération. Sur la base des avis des experts, des axes de recherche prioritaire sont donc proposés. Les trois principaux axes sont les suivants :

- Développement d'un outil de vérification de l'atteinte des objectifs de dépollution
- Développement d'outils innovants utilisables pour la conduite optimale des bioprocédés de traitement
- Développement d'un module d'aide à la sélection d'outils métrologiques et d'interprétation

Summary

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. In particular, tools available 1) to know whether decontamination objectives are encountered or not, and 2) to permit process operation under optimal conditions, all have one or several serious drawbacks (cost, weak spatial representativity, off-line measurement, key parameter not measured, etc.).

Metrological and interpretation tools available for the performance monitoring of soil clean-up bioprocesses come from distinct areas : analytics, geotechnics, geophysics, geostatistics and mathematics. However these tools are often used separately and do not presently permit to monitor adequately soil clean-up bioprocesses to check the decontamination objectives as well as to regulate the process. Tools evaluation sheets have then been developed and filled by the experts. They have allowed to exhibit deficiencies of the different metrological and interpretation tools and to reveal the possible tools combinations that would permit to reach the objectives.

Results presented in this study show that it is possible to monitor the performance of soil clean-up bioprocesses in terms of verification of the decontamination objectives providing that geophysical, geostatistical, analytical and mathematical tools are coupled. However this has to be confirmed by future research and demonstration studies. Concerning the (optimal) process operation, experts are less optimistic. Indeed they claim that tools presently available are not adapted to monitor soil clean-up bioprocess for control purposes. This is mainly due to the lack of relevant, robust, on-line and cheap measurements and to the lack of knowledge concerning the phenomena involved.

Finally, based on the experts points of view, main research subjects are proposed. The three most important ones are the following :

- Development of a tool for the verification of decontamination objectives
- Development of innovative tools for the bioprocess on-line regulation
- Development of a selection-making module for the metrological and interpretation tools

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Problématique	3
1.2	Objectifs	4
1.3	Cadre et limites de l'étude	4
2	Méthodologie de travail	5
3	Résultats	9
3.1	Revue des outils existants et des initiatives en cours	9
3.1.1	Identification des catégories d'outils	9
3.1.2	Revue des initiatives en cours	11
3.2	Élaboration du questionnaire et constitution du comité d'experts	12
3.2.1	Élaboration du questionnaire	12
3.2.2	Constitution des comités d'experts	15
3.3	Synthèse des réponses au questionnaire, des réunions des comités d'experts et des entrevues	17
3.3.1	Avis des gestionnaires de sites	17
3.3.2	Avis des prescripteurs de réhabilitation de sites	18
3.3.3	Avis des chercheurs, prestataires de services et développeurs de technologie	18
3.3.4	Conclusion	20
3.4	Fiches d'évaluation des outils métrologiques et d'interprétation	21
3.4.1	Élaboration des fiches d'évaluation	21
3.4.2	Synthèse des réponses	26
3.4.3	Conclusion	46
3.5	Proposition d'axes de recherche	47
3.5.1	Développement d'un outil de vérification de l'atteinte des objectifs de dépollution	47
3.5.2	Développement d'un outil de suivi pour la conduite des bioprocédés de traitement de sols	47
3.5.3	Organisation d'un atelier de travail international et pluridisciplinaire	47
3.5.4	Développement d'un module d'aide à la sélection d'outils métrologiques et d'interprétation	48

3.5.5	Outils d'analyse de chantiers	48
3.5.6	Augmentation du niveau de connaissance phénoménologique	48
4	Conclusion	49

Chapitre 1

Introduction

1.1 Problématique

Les bioprocédés de traitement des sols sont reconnus pour être des alternatives bon marché aux procédés thermiques ou physico-chimiques. Pourtant leur utilisation reste encore limitée dans le secteur de la restauration des sites pollués. A titre d'exemple, aux États-unis, le pourcentage de sites restaurés par une technique biologique est passé de 37% en 1992 à 20% en 2002 (US EPA, Technology Innovative Office, *Innovative Treatment Technologies*, Semi-Annual and Annual Status Report, 1992 and 2002). 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).

La question se pose donc de savoir s'il existe une façon de remédier à ces difficultés et de garder les bioprocédés de traitement de sols parmi les techniques efficaces et viables tant au niveau économique, social et environnemental. Un des constats flagrants concernant les difficultés rencontrées réside dans le manque d'outils permettant au gestionnaire de site de caractériser en temps réel la performance du bioprocédé et de prédire son évolution (en particulier, durée du traitement et assurance de l'atteinte du niveau de dépollution désiré). Ainsi les outils métrologiques et d'aide à la gestion disponibles à ce jour permettent-ils de caractériser la performance des bioprocédés de traitement des sols de façon à réduire les incertitudes mentionnées ci-dessus ?

1.2 Objectifs

L'objectif principal de l'étude consiste 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). L'outil sera évalué selon deux critères distincts :

1. Capacité à suivre la performance globale du procédé. Il s'agit ici pour le gestionnaire de site de savoir si l'objectif de dépollution est atteint. L'outil devrait donc être capable de suivre le taux d'abattement du polluant primaire ainsi que l'évolution des polluants secondaires.
2. Capacité à suivre les paramètres biologiques, physico-chimiques et hydrodynamiques contrôlant la biodégradation du polluant dans une optique de conduite optimale du procédé.

Sur la base d'avis d'experts, les objectifs spécifiques sont :

- de faire une revue des outils existants et des initiatives en cours,
- d'évaluer les outils existants,
- de proposer des axes de développement et/ou de recherche.

1.3 Cadre et limites de l'étude

D'une part, l'étude repose sur l'hypothèse que l'applicabilité du bioprocédé de traitement a été préalablement démontrée. Les outils concernés par cette étude ne visent donc pas à justifier l'utilisation d'un traitement biologique mais à suivre sa performance une fois qu'il a été choisi comme mode de gestion du site.

D'autre part, l'étude n'est pas restreinte à un polluant en particulier ou à des conditions de traitement prédéfinies (géologie, climat, ...). Elle devra donc traiter de l'applicabilité des outils de suivi de la performance en fonction des polluants et des conditions *in situ* de traitement.

Aussi, l'efficacité d'un bioprocédé sera définie par rapport à l'abattement de la pollution (critères génériques) et non par rapport à des critères d'analyse de risque. En effet, ces derniers, plus difficile à utiliser, contribueraient à ajouter inutilement des incertitudes à l'étude.

Enfin, le suivi de la performance du bioprocédé intervient une fois la phase libre et la plupart des volatils extraits, c'est-à-dire lorsque le phénomène de biodégradation devient prédominant.

Chapitre 2

Méthodologie de travail

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

En fonction des catégories d'outils identifiées, la deuxième étape consiste à constituer un comité d'experts capable d'évaluer ces outils par rapport à l'objectif visé. A noter qu'étant donnée l'expérience québécoise dans ce domaine, des experts ont été spécialement consultés au Québec.

La troisième étape vise 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,
- d'appliquer les critères d'évaluation à chacun de ces outils,
- d'exposer son opinion sur la méthodologie à suivre pour rencontrer l'objectif visé.

La quatrième étape consiste en une analyse des réponses des experts et, en fonction de leurs réponses et en concertation avec eux, de 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.

Cette méthodologie en quatre étapes a subi une modification suite aux réponses au questionnaire. En effet, celui-ci n'a pas permis lors de la réunion d'experts de dégager précisément des axes de recherche car plusieurs points restaient à clarifier notamment sur l'évaluation des outils. Il a donc été décidé d'établir un nouveau questionnaire, sous forme de fiches d'évaluation, à remplir par les experts et consacré à l'évaluation des outils de suivi de la performance des bioprocédés de traitement des sols. Les raisons et les conséquences de cette décision sont précisées dans la section "Synthèse des réponses au questionnaire, des réunions des comités d'experts et des entrevues" du chapitre "Résultats". La méthodologie générale de l'étude est illustrée à la figure 2.1.

La figure 2.2, tirée de l'annexe technique du projet, présente le calendrier tel que proposé initialement. Des ajustements ont également dû être apportés au calendrier initial. En particulier, la réunion d'experts a été déplacée de fin août à début décembre (8 décembre) afin de permettre au plus grand nombre d'experts contactés d'y être présents. Ce changement a eu pour conséquence de déplacer la réunion finale du projet du 10 janvier 2006 au 30 janvier

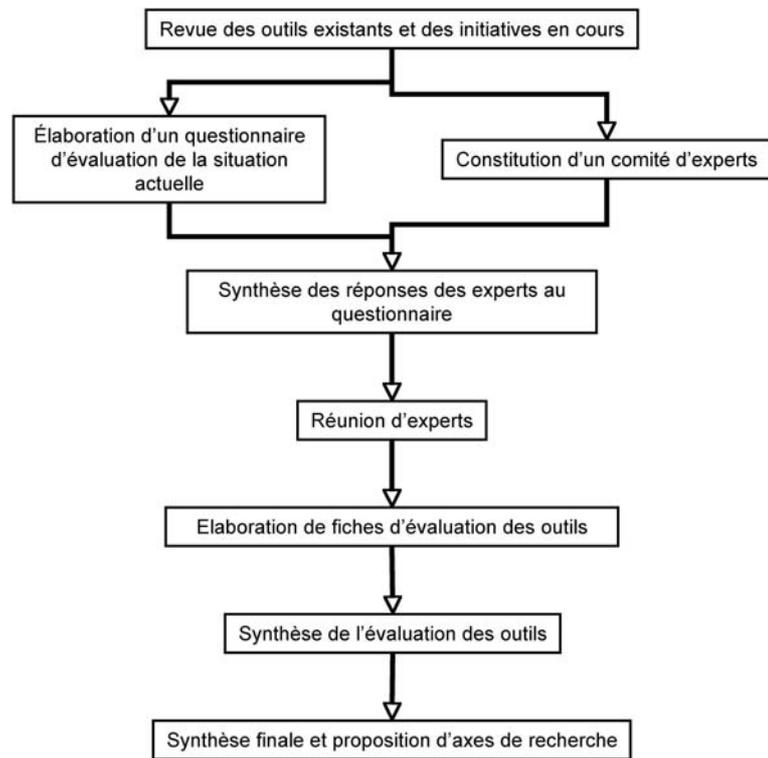


FIG. 2.1: *Méthodologie générale.*

2006. Aussi, suite à l'ajout du deuxième questionnaire, la phase 2 a été étendue jusqu'à la fin du mois de janvier 2006. Le calendrier modifié est présenté à la figure 2.3.

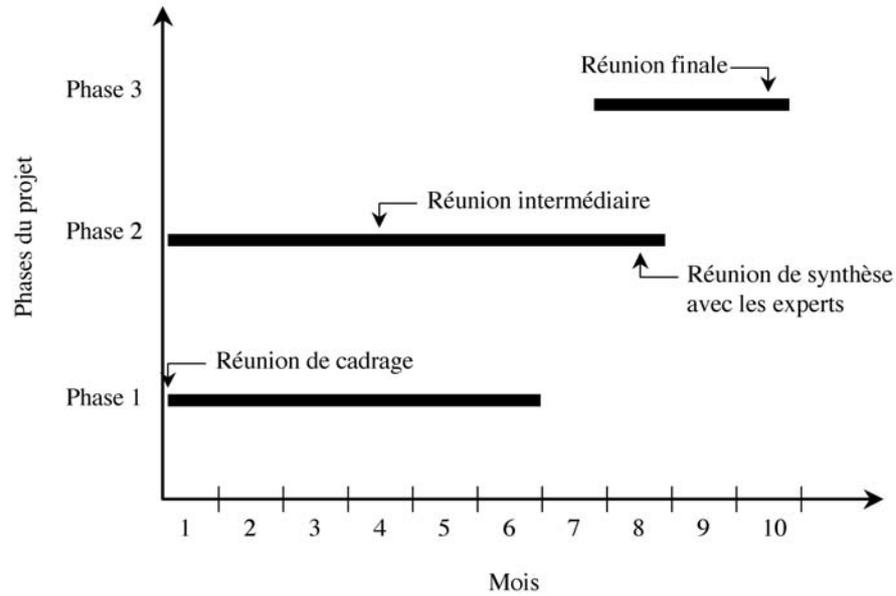


FIG. 2.2: *Calendrier initial de l'étude.*

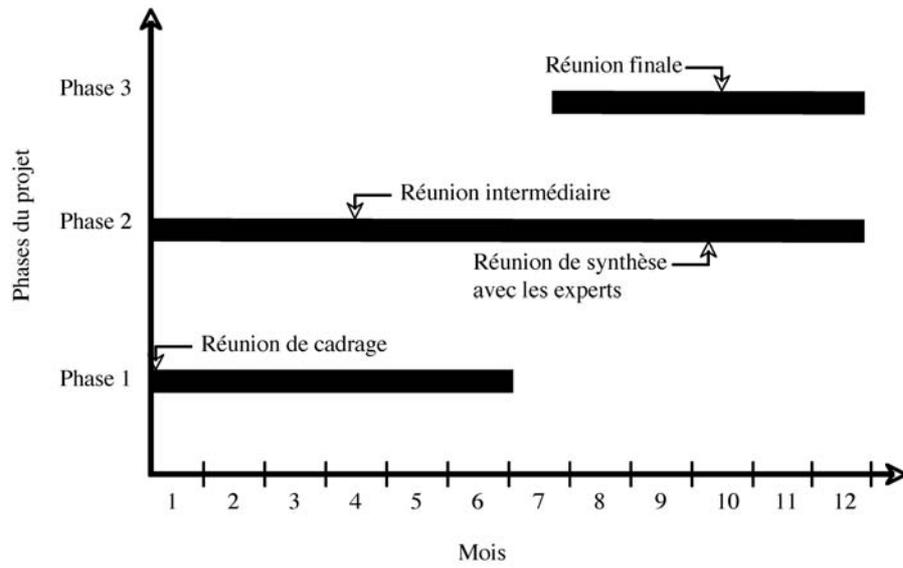


FIG. 2.3: *Calendrier modifié de l'étude.*

Chapitre 3

Résultats

3.1 Revue des outils existants et des initiatives en cours

Cette section vise à identifier des catégories à l'intérieur desquelles les outils de suivi de la performance des bioprocédés de traitement des sols peuvent être rangés. Ceci apportera une aide au choix des experts à consulter et à la classification des outils identifiés.

3.1.1 Identification des catégories d'outils

On peut tout d'abord classer les outils en fonction de la nature même de l'outil. Ainsi on peut distinguer les outils qui mesurent directement un indicateur dans l'environnement, appelés **outils métrologiques** des outils qui permettent d'estimer des indicateurs à partir de mesures directes, appelés **outils d'interprétation**.

Les outils métrologiques peuvent alors être distingués en fonction des techniques de mesure suivantes :

- 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.

Les principales caractéristiques de ces trois catégories d'outils sont rassemblées dans le tableau 3.1. Ce tableau montre 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 sont très variés puisqu'ils rassemblent tous les outils traitant les données brutes fournies par les outils métrologiques dans le but d'estimer d'autres indicateurs. En particulier, ils permettent d'estimer des variables non mesurées, d'estimer des variables en deux points de mesure géographiques, d'extrapoler des mesures dans le temps, d'estimer la durée de traitement, ou encore d'identifier le phénomène limitant, etc. Malgré la diversité des outils d'interprétation possibles, trois catégories peuvent être distinguées :

TAB. 3.1: *Caractéristique des outils métrologiques par catégorie*

Catégorie	Caractéristiques
Méthodes analytiques	Mesure en un point géographique précis Mesure hors ligne Mesure relativement exacte et précise des principaux paramètres physico-chimiques Estimation de certains paramètres biologiques Non suivi des phénomènes hydrodynamiques Coût élevé (en fonction du nombre d'échantillons)
Sondes ou capteurs géotechniques	Mesure en un point géographique précis Mesure en ligne Mesure relativement exacte et précise de certains paramètres physico-chimiques Estimation de l'activité microbienne Suivi relativement précis et exact des phénomènes hydrodynamiques Coût relativement élevé en équipement et peu élevé en opération
Outils géophysiques	Mesure en tout point sur la zone couverte Mesure en ligne Mesure relativement exacte et précise de certains paramètres physico-chimiques Estimation de l'activité microbienne dans des situations très spécifiques Suivi possible des phénomènes hydrodynamiques Coût élevé en équipement et peu élevé en opération

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

Les caractéristiques des outils d'interprétation sont présentées dans le tableau 3.2. Une fois encore, on peut remarquer 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.

TAB. 3.2: *Caractéristique des outils d'interprétation par catégorie*

Catégorie	Caractéristiques
Outils géostatistiques	Interpolation entre points de mesure Évaluation de l'incertitude sur les mesures Outil d'aide à la décision pour l'échantillonnage (optimisation) Coût associé à l'échantillonnage très variable selon les situation
Outils mathématiques	Modélisation du bioprocédé Outil prédictif Outil très peu robuste et donc non fiable si utilisé seul Coût très élevé pour la calibration, peu élevé en utilisation
Expérience du gestionnaire	Prédiction de la durée du traitement et du niveau de dépollution atteint Ajustement des conditions d'opération au cours du traitement Faillible Coût très variable

Les caractéristiques des métrologiques et d'interprétation et leur évaluation seront précisées dans les section "Synthèse des réponses au questionnaire, des réunions des comités d'experts et des entrevues" et "Fiches d'évaluation des outils métrologiques et d'interprétation".

3.1.2 Revue des initiatives en cours

Plusieurs projets et réseaux concernant la biorestauration des sols et des eaux souterraines existent à l'échelle européenne. Ainsi le projet européen Senspol visait à développer des outils métrologiques pour la caractérisation des eaux souterraines principalement. Parmi les réseaux européens, on peut mentionner le réseau NICOLE qui regroupe les principaux

acteurs à l'échelle européenne. La liste des membres a d'ailleurs été prise en compte pour la constitution du comité d'experts.

A l'échelle internationale, les publications de l'organisme américain US EPA constituent une source importante d'information concernant non seulement les outils métrologiques existants ou en voie de développement mais aussi les projets de recherche et de développement dans ce domaine.

Les conférences du domaine de la biorestauration des sites pollués sont disciplinaires et ne facilitent pas un échange entre les professionnels des différentes disciplines. De plus, les activités de recherche sur la zone vadoze (zone non-saturée) semblent de moins en moins nombreuses si on se fie aux principales conférences qui se sont déroulées au cours de l'année 2005 (*8th International On Site and In Situ Bioremediation Conference, Baltimore, USA ; 3rd European Bioremediation Conference, Chania, Grèce ; Consoil, Bordeaux, France*).

En résumé, 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 Élaboration du questionnaire et constitution du comité d'experts

3.2.1 Élaboration du questionnaire

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 créées 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

Les questions posées dans chacune des parties sont présentées dans les pages suivantes. Le questionnaire a été envoyé le 25 juillet 2005 à tous les experts et les réponses ont été recueillies jusqu'au 15 novembre 2005 (environ trois semaines avant la réunion du comité d'experts).

Questionnaire

Partie A : Diagnostic sur la situation actuelle

Section A-1 : Questions aux gestionnaires de sites pollués ou de biocentres

Question A-1.1 : Quels procédés biologiques utilisez-vous pour le traitement de vos sols pollués (zone non-saturée) ? En particulier, s'agit-il de procédés in situ ou ex situ ?

Question A-1.2 : Êtes-vous satisfait de la performance des bioprocédés de traitement des sols en général, de vos bioprocédés en particulier ? Si non, pourquoi ? En particulier, quelles sont les limites des bioprocédés de traitement des sols ?

Question A-1.3 : Quels outils métrologiques utilisez-vous pour suivre la performance de vos bioprocédés de traitement des sols pollués ? Utilisez-vous en complément des outils géostatistiques et/ou mathématiques (modèles en particulier) ? Si oui, lesquels ?

Question A-1.4 : Vous sentez-vous limité par les outils de suivi des bioprocédés de traitement des sols ? Si non, quels sont les outils qui vous donnent pleine satisfaction ? Si oui, quelles sont ces limitations ?

Section A-2 : Questions aux acteurs directs de la réglementation

Question A-2.1 : Les outils de suivi des bioprocédés de traitement des sols répondent-ils bien à la réglementation en vigueur ? Si non, pour quelles raisons ?

Question A-2.2 : La mise en place de règlements liés aux sites pollués est-elle limitée par le manque d'outils disponibles pour le suivi des bioprocédés de traitement des sols ? Si oui, quelles sont ces limitations ?

Section A-3 : Questions aux chercheurs, prestataires de services et développeurs de technologies

Question A-3.1 : Les outils existants permettent-ils de suivre de façon fiable et robuste la performance des bioprocédés de traitement des sols ? Si oui, quels sont-ils ? Si non, pour quelle(s) raison(s) ?

Question A-3.2 : Selon vous, quels sont actuellement les outils les plus performants pour rencontrer l'objectif ?

Question A-3.3 : Quels sont les principaux freins au développement d'un outil de suivi de la performance des bioprocédés de traitement des sols, fiable et robuste ?

Question A-3.4 : Quelle importance donnez-vous aux outils mathématiques et géostatistiques en complément des outils métrologiques ? Parmi eux, quels sont ceux les plus utilisés ?

Partie B : Synthèse des outils métrologiques existants

Il s'agit dans cette partie de remplir le tableau 3.3 pour chaque outil identifié.

TAB. 3.3: *Évaluation des outils métrologiques existants*

OUTIL :	
Paramètre suivi :	
Application	
Suivi en tout point ?	
Suivi en tout temps ?	
Polluant suivi / plage :	
Identification du phénomène limitant ?	
Estimation de la fin de traitement ?	
Variable contrôlable ?	
Avantages et inconvénients :	

3.2.2 Constitution des comités d'experts

La constitution des comités d'experts européens et canadiens est présentée respectivement dans le tableau 3.4 et le tableau 3.5. Les experts canadiens ont été consultés dans la semaine du 12 au 17 juin 2005 (réunion à l'École Polytechnique de Montréal le 15 juin et entrevues individuelles).

TAB. 3.4: *Constitution du comité d'experts français*

NOM Prénom	Domaine d'expertise	Organisme
BELKESSAM Laurence	Dépollution des sols	CNRSSP
BLANCHET Denis	Dépollution des sols	IFP
BUREAU Jacques	(Eco-)toxicologie	INERIS
CROZE Véronique	Prestataire de services	ICF Environnement
de FOUQUET Chantal	Géostatistique	ENSMP
HELD Thomas	Prestataire de services	ARCADIS (Allemagne)
HENRY Hugues	Prestataire de services	SITA
MORIN Dominique	Dépollution des sols	BRGM
MOUNIER Sébastien	Régulateur	DRIRE Haute-Normandie
PALLARES Fernando	Gestionnaire de bio-centre	GRS Valtech
ROGGE Michel	Développeur de technologie	Geoprobe (Belgique)
SAADA Alain	Dépollution des sols	BRGM
TABBAGH Alain	Géophysique	Université de Jussieu

TAB. 3.5: *Liste des experts canadiens*

NOM Prénom	Domaine d'expertise	Organisme
AUBERTIN Michel	Hydrogéologie	École Polytechnique de Montréal
BAGE Gontran	Outils d'interprétation	École Polytechnique de Montréal
BARBEAU Carole	Gestionnaire de Bio-centres	Biogénie Inc.
CHASSÉ Reynald	Ecotoxicologie	CEAEQ Gouvernement du Québec
CHOUTEAU Michel	Géophysique	École Polytechnique de Montréal
D'AMOURS Dominic	Génie des bioprocédés	École Polytechnique de Montréal
MARCOTTE Denis	Géostatistique	École Polytechnique de Montréal
MILLETTE Denis	Prestataire de services	HydrogéoPlus
SAMSON Réjean	Outils d'interprétation	École Polytechnique de Montréal
ZAGURY Gérald	Géochimie	École Polytechnique de Montréal

3.3 Synthèse des réponses au questionnaire, des réunions des comités d'experts et des entrevues

De juin 2005 à décembre 2005, les experts ont répondu au questionnaire et/ou ont participé à des entrevues individuelles. Deux biocentres ont été visités : le biocentre de Biogénie à Montréal-Est (Québec, Canada) et le biocentre de GRS-Valtech à Courrières (France). Une réunion entre experts Canadiens (Michel Aubertin, Gontran Bage, Doninic D'Amours, Michel Chouteau, Denis Marcotte et Gérald ZAGURY) s'est tenue le 15 janvier à l'École Polytechnique de Montréal et la réunion du comité d'experts européens (Laurence Belkessam, Véronique Croze, Chantal de Fouquet, Rémy Gourdon, Yves Le-Corfec, Guillaume Louchez, Sébastien Mounier et Alain Saada) s'est tenue le 8 décembre à l'IMI-UTC. Dans cette section, la synthèse des différentes initiatives auprès des experts (questionnaire, entrevues individuelles, visite de sites, réunion) est présentée.

3.3.1 Avis des gestionnaires de sites

Les bioprocédés utilisés dans le traitement des sols sont aussi bien des procédés *ex situ*, tel le traitement en andin ou en biopile, que des procédés *in situ*, telles la bioventilation ou l'atténuation naturelle. Toutefois, autant les biopiles sont très largement utilisées pour le traitement des sols pollués aux hydrocarbures pétroliers (diesel, gazoil, essence), les bioprocédés *in situ* sont quant à eux peu utilisés. Hormis l'atténuation naturelle qui arrive à s'imposer dans des situations où les risques écotoxicologiques et toxicologiques sont faibles, la bioventilation *in situ* est de moins en moins utilisée au profit de techniques jugées plus efficaces et plus sûres telles l'excavation et le traitement *ex situ* ou encore le lavage de sols *in situ* qui jouit d'un certain regain d'intérêt au Québec. Le recul des bioprocédés *in situ* peut être attribué aux difficultés à garantir le succès de la technologie en termes d'atteinte des objectifs de dépollution (en particulier niveaux de pollution et de risque résiduels et durée de traitement). Les gestionnaires de sites faisant face à une incertitude élevée, choisissent alors une alternative plus sûre quitte à ce que le coût soit plus élevé. Ce recul est flagrant en Amérique du Nord et au Canada. Il n'est en revanche pas constaté dans les pays en voie de développement grâce à une réglementation, à tort ou à raison, plus souple. Ainsi, au Brésil, il est possible d'opter pour un bioprocédé *in situ* sans avoir à démontrer son efficacité *a priori*. Ainsi le bioprocédé *in situ* est opéré et son efficacité est suivie au cours du temps (niveaux de pollution et de risque résiduels). A tout moment, une autre option de gestion du site peut être adoptée. Par expérience, il arrive souvent, mais pas systématiquement, que le risque résiduel est nul lorsque le traitement biologique est terminé (atteinte d'un plateau pour la concentration en polluant). A noter également que les bioprocédés sont peu utilisés pour des pollutions aux HAP et encore moins aux organochlorés.

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. Dans certaines situations, des

outils géostatistiques (maillage 3D, krigeage 2D) et des mesures analytiques *in situ* (tests respirométriques) sont utilisés pour réduire le nombre d'échantillons à prélever non seulement dans l'espace mais aussi dans le temps. 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.

Enfin, un outil non négligeable utilisé dans le suivi de la performance des bioprocédés de traitement des sols est l'expérience du gestionnaire de site. Celle-ci permet en particulier de répondre partiellement aux difficultés mentionnées ci-dessus.

3.3.2 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.

3.3.3 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. Les outils géophysiques les plus pertinents pour cette étude sont les suivants :

- GPR (Ground Penetrating Radar)
- Méthodes électriques (potentiel spontané, polarisation provoquée,...)
- Méthodes électromagnétiques

Une pollution peut être suivie à condition qu'il existe un lien net entre le paramètre physique mesuré et la nature de la pollution. Le GPR mesure les variations de permittivité diélectrique. Les méthodes électriques permettent de suivre toute substance affectant la conductivité électrique du matériau. Le potentiel spontané permet notamment de suivre l'électrofiltration due à l'écoulement ou la présence d'un front actif d'oxydo-réduction. Enfin les méthodes magnétiques permettent de suivre les modifications des types d'oxydes et d'hydroxydes.

Les outils géophysiques permettent le suivi des hydrocarbures. Le seuil de détection dépend du type de polluant, du matériau géologique et de l'emplacement des sondes. Il doit donc être évalué au cas par cas. Le GPR et les méthodes électromagnétiques permettent en plus la mesure du contenu en eau moyennant une calibration à partir de points d'échantillonnage. De même, les méthodes électriques (résistivité électrique) couplées au radar permet d'estimer le contenu en eau et l'indice de vide.

Il est important de noter que les outils géophysiques sont en premier lieu des outils de caractérisation qualitatifs. Leur utilisation pour une caractérisation quantitative nécessite un calibrage à partir de points d'échantillonnage. Il en résulte qu'ils sont bien adaptés pour caractériser les sites pollués mais *a priori* peu adaptés au suivi des variables de contrôle dans un contexte de conduite du bioprocédé.

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 principaux outils géotechniques disponibles sont les suivants :

- TDR (Time Domain Reflectometry)
- Tensiomètres
- Sondes de conductivité électrique
- Sondes MIP (Membrane Interface Probe) couplées à un analyseur de gaz

Les sondes TDR permettent de déterminer la teneur en eau volumétrique du sol et dans certains cas très particuliers des concentrations d'espèces spécifiques. Couplées au tensiomètres pour la mesure de la succion, elles permettent également de caractériser les écoulements d'air et d'eau dans le sol. Les sondes de conductivité électrique permettent de classer ponctuellement les sols et les formations géologiques. Les sondes MIP permettent une interface entre le gaz interstitiel et la surface du sol où l'analyse de gaz est réalisée (oxygène

dioxyde de carbone, carbone organique volatil, ...).

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. Les modèles phénoménologiques et empiriques (comprenant les outils d'aide à la décision basés sur l'expérience) sont utilisés plus pour comprendre *a posteriori* les phénomènes mis en jeu que pour suivre ou prédire l'évolution du bioprocédé. Ceci est principalement dû au manque de robustesse des modèles étant donnée la complexité des phénomènes mis en jeu. Cette difficulté peut être surmontée grâce aux capteurs-logiciels qui utilisent des mesures en ligne pour calibrer en temps réel un modèle phénoménologique. Ce type d'outils a démontré son efficacité dans le domaine des bioréacteurs de production et de traitement des eaux mais son utilisation n'a pas encore été validée dans le domaine des bioprocédés de traitement des sols.

3.3.4 Conclusion

D'une part, parmi les outils géophysiques, géotechniques, géostatistiques et mathématiques, certains sont au stade de la recherche et d'autres ont déjà démontré leur potentiel. Pourtant ces outils sont globalement sous-utilisés dans les projets de dépollution. La faible utilisation de ces outils est principalement due à une méconnaissance des outils disponibles, en particulier en France. Contrairement à l'Amérique du Nord où les études de caractérisation de sites font souvent intervenir plusieurs outils métrologiques et/ou d'interprétation de disciplines différentes, il existe en France peu d'études de démonstration d'outils innovants seuls et encore moins d'études sur le couplage d'outils de disciplines différentes.

D'autre part, lors de la réunion du comité d'experts du 8 décembre 2005, le problème lié à la définition même du suivi de la performance des bioprocédés a été soulevé. En effet, les outils à utiliser ne sont pas les mêmes selon qu'on définit la performance en termes d'objectifs finaux à rencontrer (par exemple issus de contraintes réglementaires) ou en termes de conduite du procédé. La partie B du questionnaire, concernant l'évaluation des outils métrologiques existants, n'a pu être remplie adéquatement car elle ne séparait pas l'évaluation des outils en fonction de ces deux types d'objectifs (résultat et conduite). Il a donc été décidé de créer des fiches d'évaluations des outils métrologiques et d'interprétation en fonction des deux objectifs de suivi de la performance des bioprocédés de traitement de sol. L'élaboration et la synthèse de ces fiches sont traitées dans la section suivante.

3.4 Fiches d'évaluation des outils métrologiques et d'interprétation

3.4.1 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.

Ainsi des critères d'évaluation des outils métrologiques (couplés ou non à d'autres outils) ont été définis pour les deux types de suivi de la performance des bioprocédés de traitement des sols.

D'une part, les objectifs de dépollution s'expriment en termes de concentration en polluant mais aussi en termes de risque associé à la pollution résiduelle. Les outils doivent donc être évalués pour chacun des deux objectifs d'abattement selon les critères suivants :

- Exactitude de la mesure : l'outil permet-il de fournir une information exempte d'erreur, c'est-à-dire sans sous-estimation ni surestimation ?
- Précision de la mesure : l'outil permet-il de fournir une information avec un minimum d'incertitude ?
- Représentativité spatiale / coût : l'outil permet-il d'avoir une bonne représentativité spatiale de la variable mesurée (concentration ou risque) sur l'ensemble du site à restaurer à un moindre coût ?
- Robustesse : l'outil permet-il d'assurer que la valeur de la mesure restera en dessous d'un seuil donné ? Cette caractéristique n'a de sens que pour la variable « risque résiduel » qui, contrairement à la concentration en polluant, est susceptible d'augmenter ou de diminuer après une mesure à un instant donné.
- Prédiction de la durée : l'outil permet-il d'estimer la durée du traitement ? La durée du traitement peut en effet être un point sujet à négociation entre le gestionnaire de site et l'organisme de régulation.

D'autre part, la conduite du bioprocédé dans des conditions optimales nécessite le suivi de sa performance en termes de variables et paramètres de contrôle. Ainsi les critères d'évaluation des outils portent sur les caractéristiques suivantes :

- Concentration en polluant : l'outil permet-il de suivre la concentration en polluant avec suffisamment de fiabilité pour permettre la régulation du bioprocédé ?
- Contenu en eau : idem.
- Nutriments : idem.
- Oxygène : idem.
- Microorganismes dégradeurs : idem.
- Identification du phénomène limitant : l'outil permet-il d'identifier le phénomène limitant parmi : la carence en nutriments, la carence en oxygène, la carence en microorganismes dégradeurs et le manque de biodisponibilité.

- Coût / représentativité spatiale : l'outil permet-il de suivre spatialement les variables à moindre coût ?
- Coût / fréquence de la mesure : l'outil permet-il de suivre dans le temps les variables à moindre coût ?

Les outils métrologiques sujets à évaluation sont les suivants :

Outils analytiques :

1. Echantillonnage et analyse en laboratoire
2. Echantillonnage et analyse sur site
3. Analyse de la phase gaz aux puits d'injection et d'extraction d'air
4. Analyse de la phase gaz à l'aide de sondes MIP (Membrane Interface Probe)

Outils géotechniques :

5. TDR (Time Domain Reflectometry)
6. Tensiomètres
7. Sondes de conductivité électrique

Outils géophysiques :

8. GPR (Ground Penetrating Radar)
9. Méthodes de résistivité électrique
10. Potentiel spontané
11. Méthode électro-magnétique - conductivimétrie

Les outils métrologiques peuvent être couplés entre eux. La contribution d'un outil utilisé en couplage avec un autre est donc aussi 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, est donc aussi évaluée dans les fiches. Les outils d'interprétation sujets à évaluation sont les suivants :

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

Les critères et la pondération correspondante pour l'évaluation des outils vis à vis de l'atteinte des objectifs et vis à vis de la conduite du bioprocédé sont présentés dans les tableaux 3.6 et 3.7, respectivement.

Pour chaque outil, il est également demandé de préciser les points suivants :

- Polluants concernés
- Phénomènes limitants identifiables

TAB. 3.6: *Critères et pondération pour l'évaluation des outils vis à vis de l'atteinte des objectifs (pollution et risque résiduels)*

Exactitude	<ul style="list-style-type: none"> - 0 Variable non mesurée - 1 Mesure très inexacte (>50%) - 2 Mesure inexacte (>20%) - 3 Mesure relativement exacte (<20%) - 4 Mesure très exacte (<5%)
Précision	<ul style="list-style-type: none"> - 0 Variable non mesurée - 1 Mesure très imprécise (>50%) - 2 Mesure imprécise (>20%) - 3 Mesure relativement précise (<20%) - 4 Mesure très précise (<5%)
Représentativité spatiale / coût	<ul style="list-style-type: none"> - 0 Aucune possible - 1 Mesure ponctuelle onéreuse - 2 Mesure ponctuelle bon marché - 3 Mesure répartie onéreuse - 4 Mesure répartie bon marché
Robustesse	<ul style="list-style-type: none"> - 0 Aucune indication possible - 4 Encadrement dans le temps possible
Prédiction de la durée	<ul style="list-style-type: none"> - 0 Aucune possible - 2 Estimation grossière - 4 Estimation précise

TAB. 3.7: Critères et pondération pour l'évaluation des outils vis à vis de la conduite du bioprocédé

Concentration en polluant	<ul style="list-style-type: none"> - 0 Aucune possible - 2 Mesure inutilisable pour la conduite - 3 Mesure assez fiable - 4 Mesure très fiable
Contenu en eau	<ul style="list-style-type: none"> - 0 Aucune possible - 2 Mesure inutilisable pour la conduite - 3 Mesure assez fiable - 4 Mesure très fiable
Nutriments	<ul style="list-style-type: none"> - 0 Aucune possible - 2 Mesure inutilisable pour la conduite - 3 Mesure assez fiable - 4 Mesure très fiable
Oxygène	<ul style="list-style-type: none"> - 0 Aucune possible - 2 Mesure inutilisable pour la conduite - 3 Mesure assez fiable - 4 Mesure très fiable
Microorganismes dégradeurs	<ul style="list-style-type: none"> - 0 Aucune possible - 2 Estimation grossière - 4 Estimation précise
Identification du phénomène limitant	Combien parmi biodisponibilité, nutriments, oxygène, population adaptée? À préciser dans la partie commentaire
Coût / représentativité spatiale	<p>Pour obtenir une bonne représentativité spatiale des variables ci-dessus l'outil est :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 0 Variable non mesurée - 1 Très onéreux - 2 Onéreux - 3 Relativement bon marché - 4 Très bon marché
Coût / fréquence de la mesure	<p>Pour obtenir une mesure suffisamment fréquente pour la conduite du procédé, l'outil est :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 0 Variable non mesurée - 1 Très onéreux - 2 Onéreux - 3 Relativement bon marché - 4 Très bon marché

- Limites d'application
- Axes de recherche à privilégier
- Autres commentaires

3.4.2 Synthèse des réponses

L'évaluation des outils métrologiques et de différents couplages possibles vis à vis de l'atteinte des objectifs de dépollution est présentée aux figures 3.1 à 3.6. Seules les évaluations par rapport à l'abattement de la pollution sont présentées, celles concernant le risque résiduel n'ayant pas été remplies en nombre suffisant pour permettre une synthèse. Il peut être remarqué qu'aucun outil ne permet de répondre favorablement à tous les critères d'évaluation. Les outils géophysiques semblent être les outils les plus adaptés à répondre à l'objectif. Toutefois, ils nécessitent des points de calibration pour donner une réponse suffisamment précise aux prescripteurs de restauration de sites. Il est également intéressant de noter que plusieurs outils sont complémentaires ce qui suggère qu'une combinaison d'outils permettraient de répondre favorablement au suivi de la performance en termes de vérification de l'atteinte des objectifs de dépollution. Ainsi, la combinaison d'outils présentée à la figure 3.7, couplant outils géophysiques, géostatistique, analytique et mathématique, permettraient de répondre favorablement à tous les critères sauf, de façon précise, à celui de la prédiction du temps de traitement. Ceci est dû au manque de fiabilité des modèles phénoménologiques prédictifs. Une meilleure connaissance des phénomènes mis en jeu et le développement de techniques d'identification en ligne des modèles permettraient d'améliorer la prédictabilité des fins de traitement. Selon les experts, un tel outil pourrait être optimisé de façon à ce qu'il soit aussi financièrement acceptable. Ainsi, l'outil géophysique pourrait être utilisé dans un premier temps afin d'estimer l'étendue et le niveau de pollution. un outil géostatistique pourrait alors être utilisé afin d'optimiser une campagne d'échantillonnage qui augmenterait la précision des mesures géophysiques. Enfin, des outils géostatistiques et des modèles pourraient être utilisés pour caractériser la zone polluée avec une bonne représentativité spatiale et éventuellement estimer la fin du traitement.

Il en résulte que l'utilisation séquentielle d'outils géophysiques, géostatistiques, analytiques et mathématiques est très prometteuse pour le suivi de la performance des bioprocédés en termes de vérification de l'atteinte des objectifs de dépollution. Il est néanmoins de nécessaire de valider cette approche par une démonstration de terrain afin d'évaluer son efficacité et sa viabilité financière.

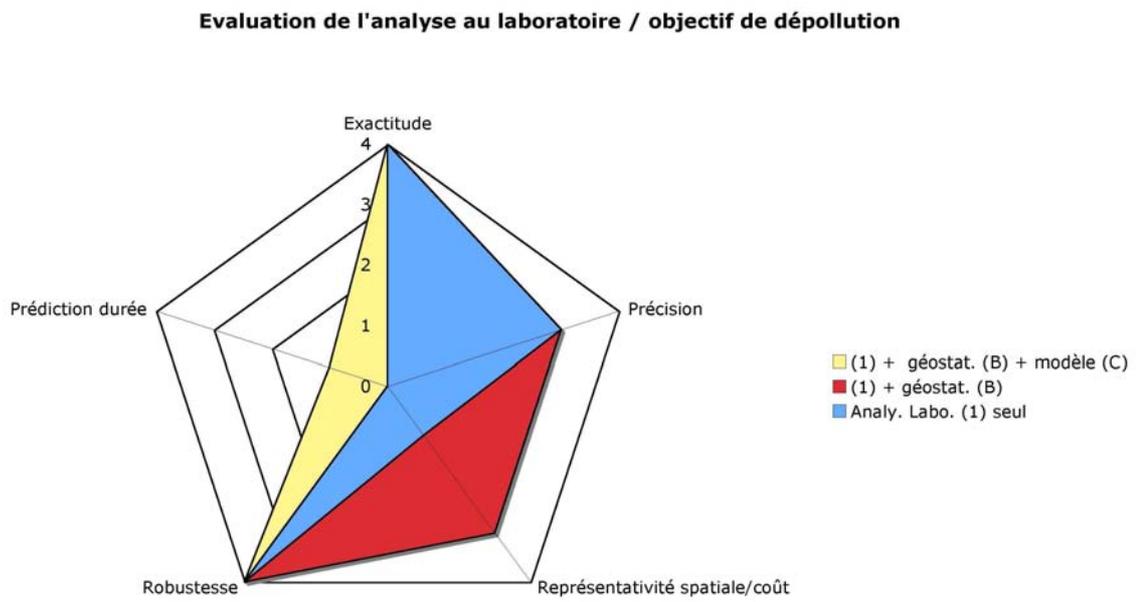


FIG. 3.1: *Évaluation de l'analyse au laboratoire / objectifs de dépollution.*

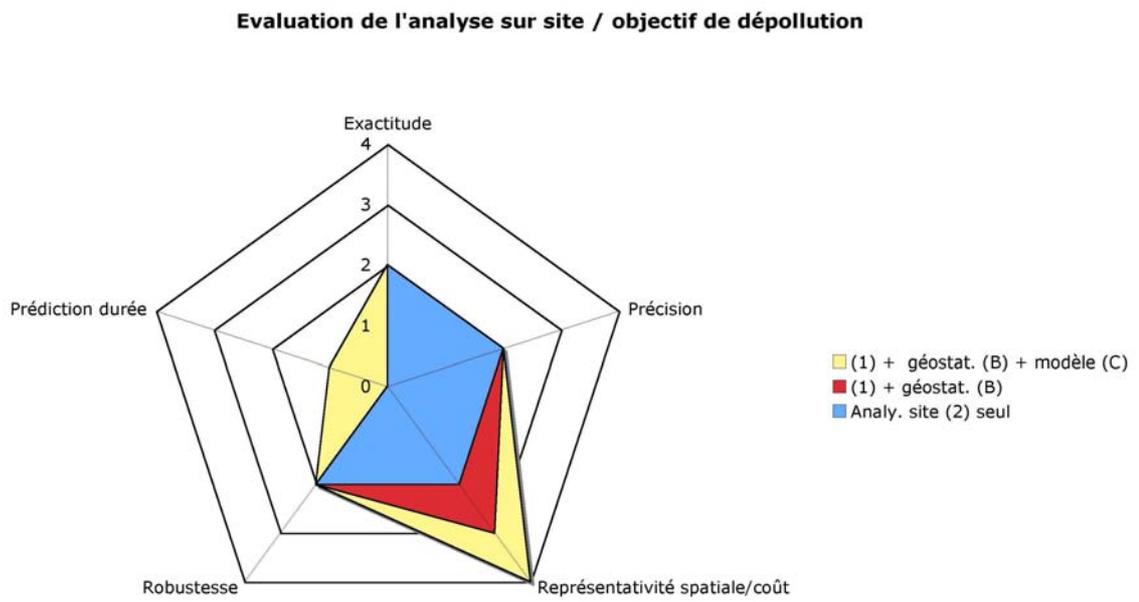


FIG. 3.2: *Évaluation de l'analyse sur site / objectifs de dépollution.*

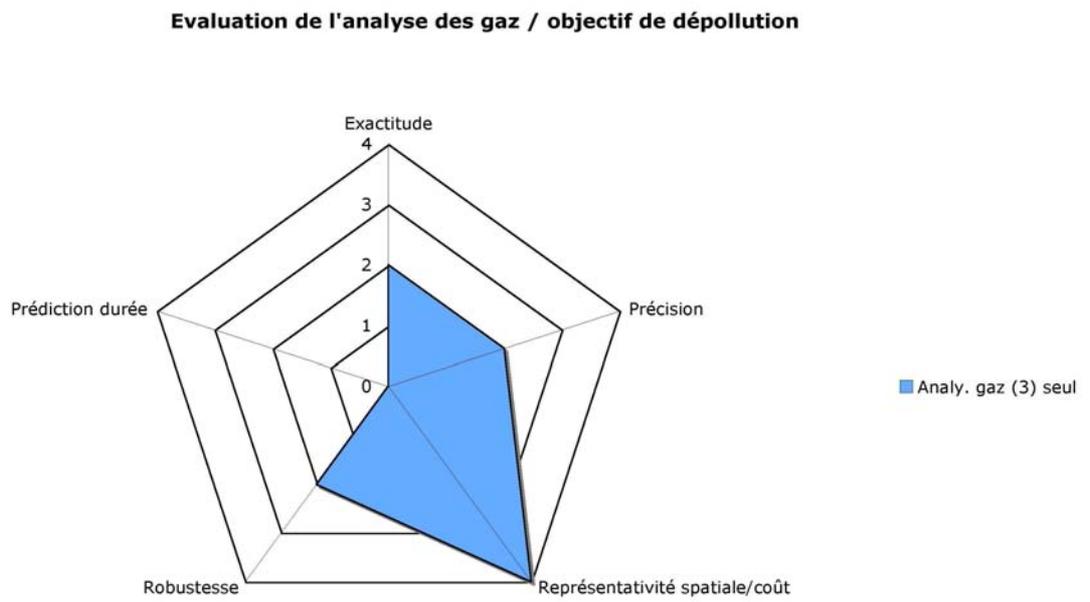


FIG. 3.3: *Évaluation de l'analyse du gaz interstitiel / objectifs de dépollution.*

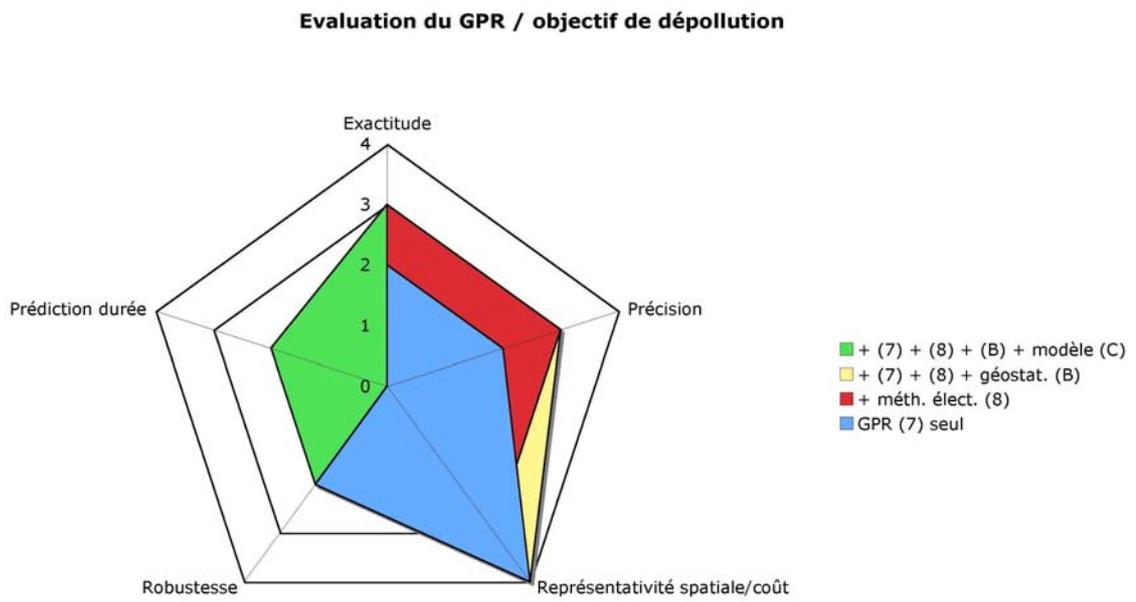


FIG. 3.4: *Évaluation du GPR / objectifs de dépollution.*

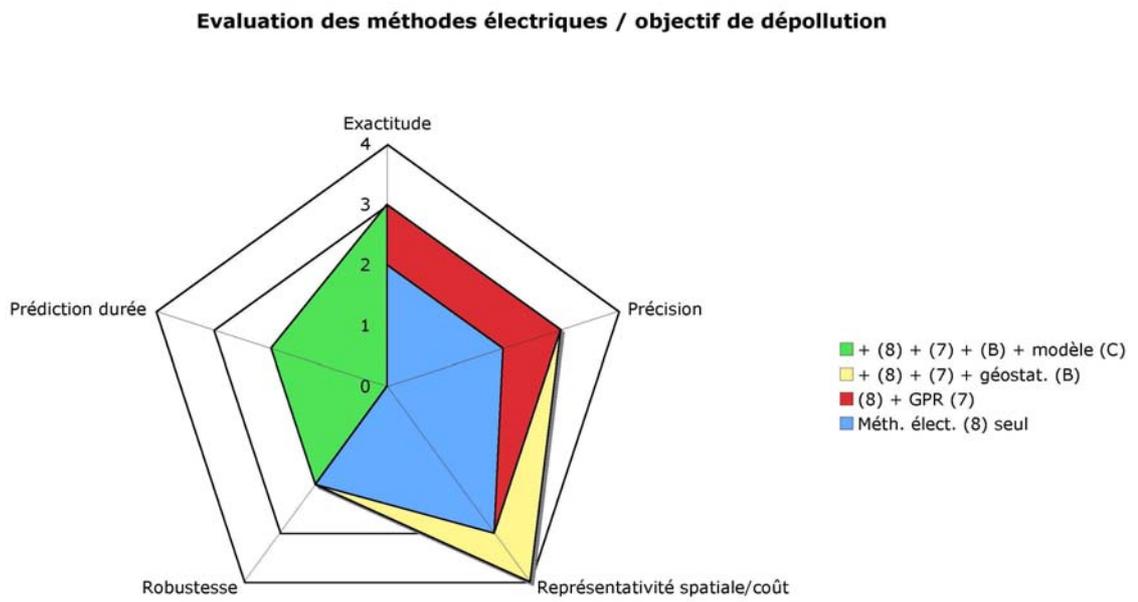


FIG. 3.5: *Évaluation des outils électriques géophysiques / objectifs de dépollution.*

Evaluation des méthodes électromagnétiques / objectif de dépollution

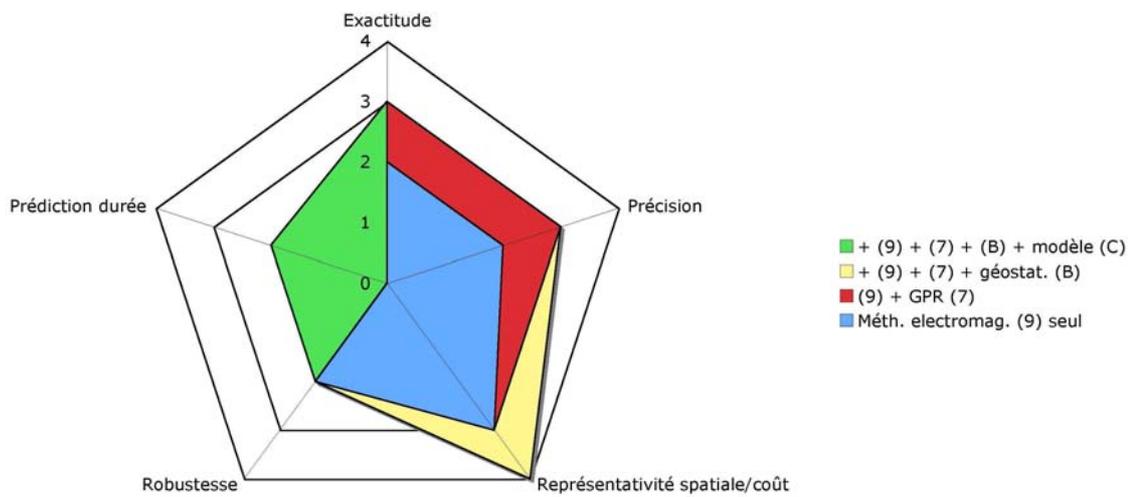


FIG. 3.6: *Évaluation des outils électromagnétiques géophysiques / objectifs de dépollution.*

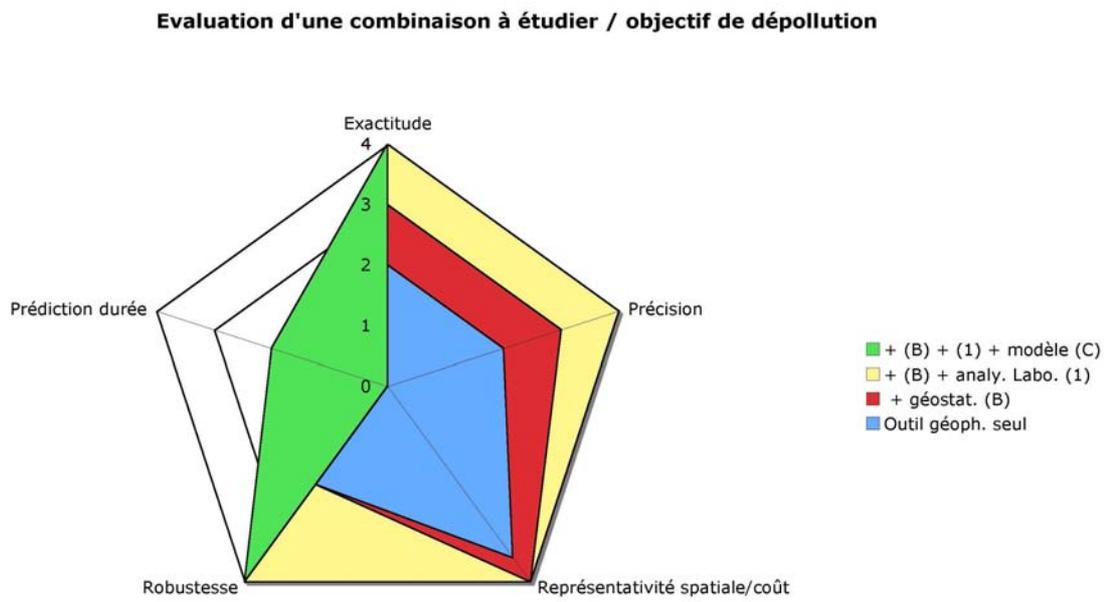


FIG. 3.7: *Évaluation estimée d'une combinaison d'outils / objectifs de dépollution.*

L'évaluation des outils métrologiques et de différents couplages possibles vis à vis de la conduite du bioprocédé est présentée aux figures 3.8 à 3.16. L'inadaptation des outils métrologiques à la conduite des bioprocédés de traitement des sols est flagrante. D'une part, les outils permettant le suivi des variables de contrôle fournissent des mesures ponctuelles dans l'espace et dans le temps, ce qui n'est pas adapté à une régulation en temps réel d'un procédé. D'autre part, les outils permettant une mesure en ligne et une bonne représentativité spatiale à moindre coût permettent le suivi d'un nombre limité de variable de contrôle avec une précision souvent insuffisante dans un contexte de régulation. Les combinaisons d'outils présentées aux figures 3.17 et 3.18 sont celles qui permettraient d'appliquer une stratégie de régulation du bioprocédé, sans que l'on puisse toutefois parler de conduite optimale. La première combinaison est basée sur un outil géophysique (le GPR) combiné à une méthode électrique géophysique, des analyses sur site et des outils géostatistiques. La seconde combinaison proposée repose sur l'utilisation d'une méthode électrique géophysique couplée à des sondes TDR, de analyses de gaz interstitiel et un modèle. Même si ces combinaisons d'outils sont intéressants, il est peu probable, selon l'avis des experts, qu'ils soient suffisants dans un contexte de conduite, optimale ou non, des bioprocédés de traitement des sols.

Il en résulte que les outils existants ne sont pas adaptés pour la conduite des bioprocédés de traitement des sols et qu'ils doivent donc être améliorés tant au niveau de la précision de la mesure, qu'au niveau de la représentativité spatiale et temporelle. Il est probable que cet objectif nécessite la passage par le développement de nouveaux outils.

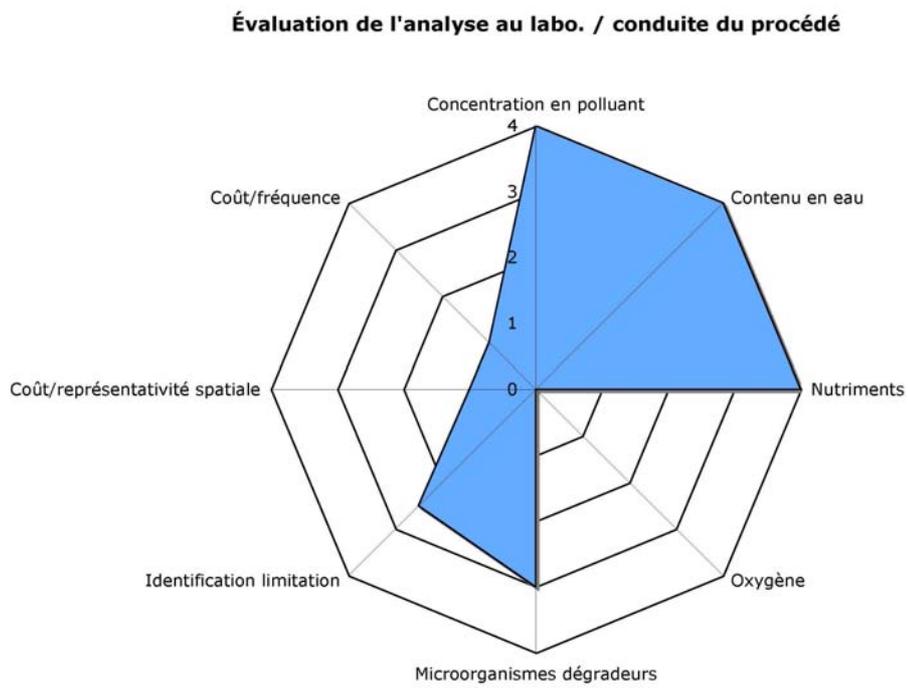


FIG. 3.8: *Évaluation de l'analyse au laboratoire / conduite du bioprocédé.*

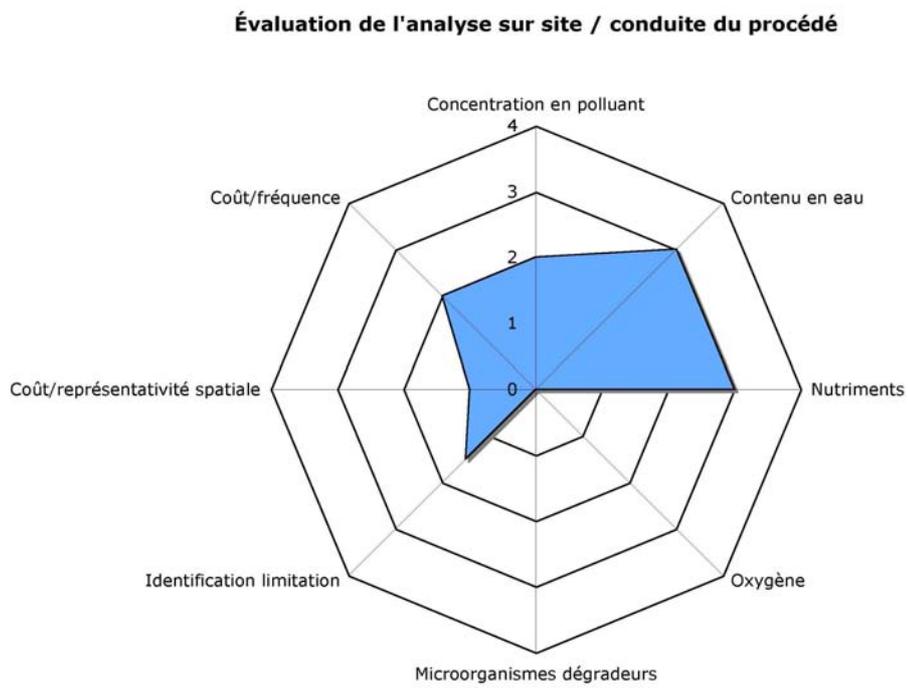


FIG. 3.9: *Évaluation de l'analyse sur site / conduite du bioprocédé.*

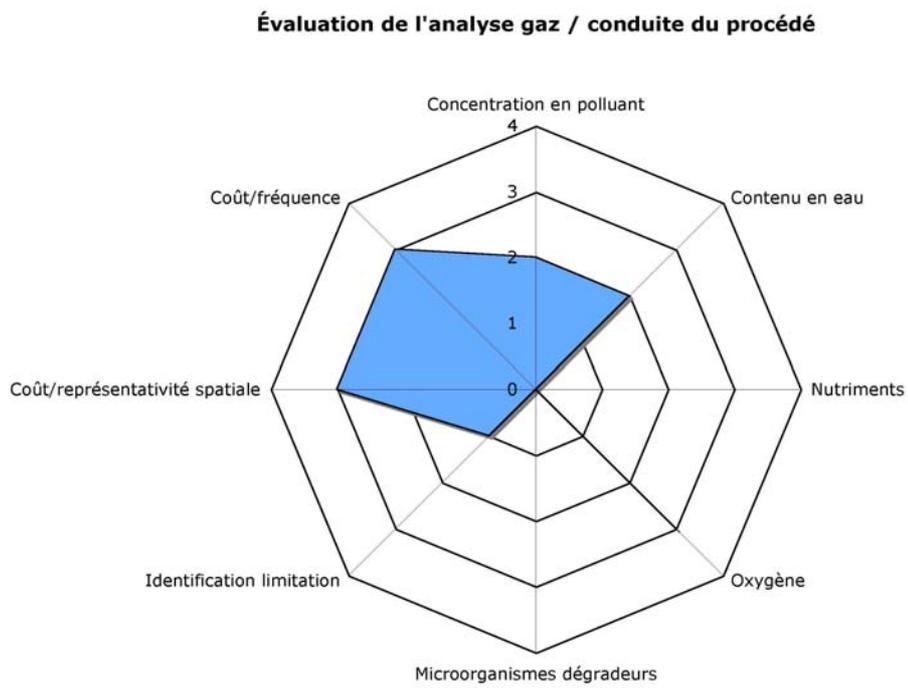


FIG. 3.10: *Évaluation de l'analyse du gaz interstitiel / conduite du bioprocédé.*

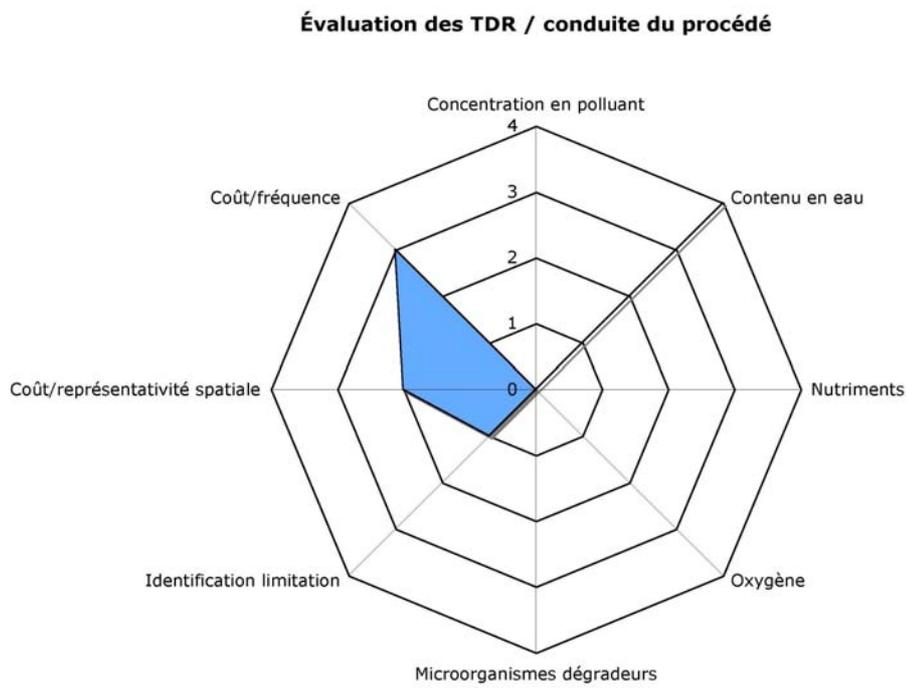


FIG. 3.11: *Évaluation du TDR / conduite du bioprocédé.*

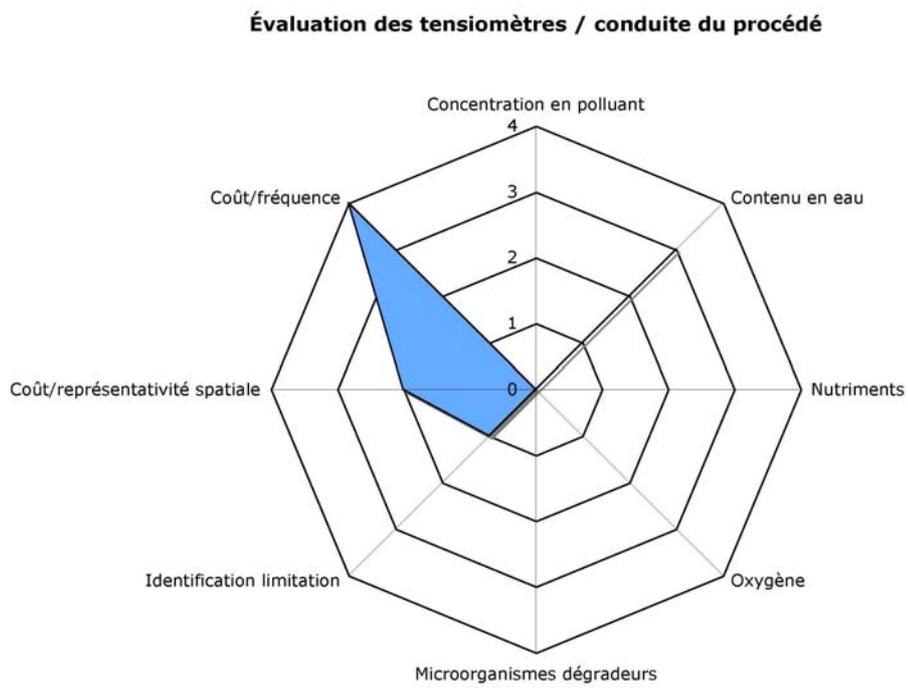


FIG. 3.12: *Évaluation des tensiomètres / conduite du bioprocédé.*

Évaluation des sondes de conductivité électrique / conduite du procédé

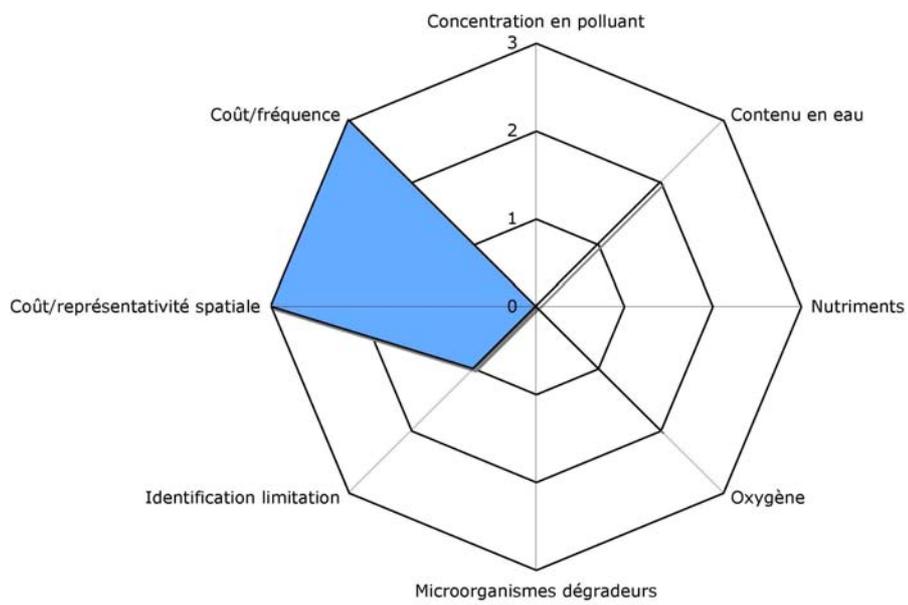


FIG. 3.13: *Évaluation des sondes de conductivités électriques / conduite du bioprocédé.*

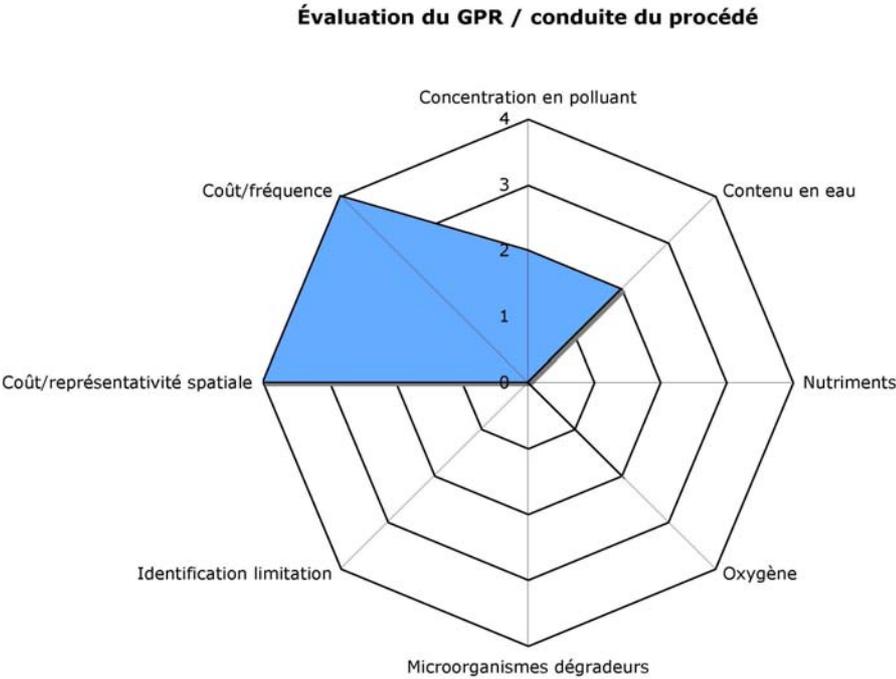


FIG. 3.14: *Évaluation du GPR / conduite du bioprocédé.*

Évaluation des méthodes électriques géophysiques / conduite du procédé

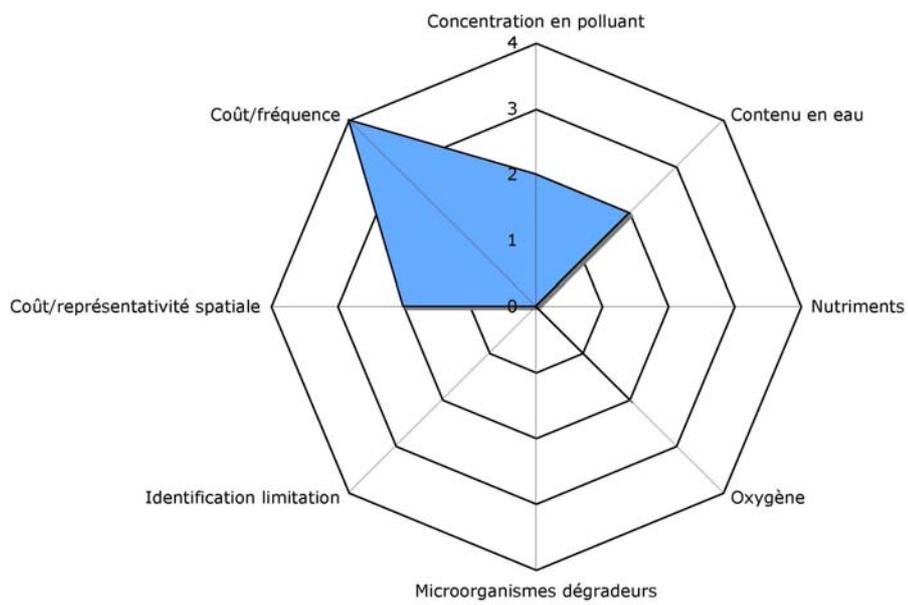


FIG. 3.15: *Évaluation des outils électriques géophysiques / conduite du bioprocédé.*

Évaluation des méthodes électromagnétiques géophysiques / conduite du procédé

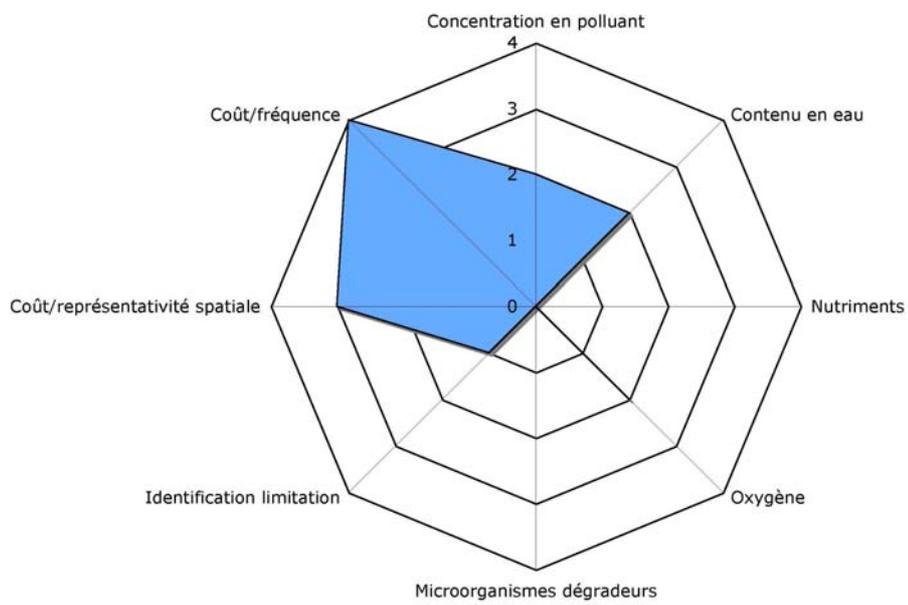


FIG. 3.16: *Évaluation des outils électromagnétiques géophysiques / conduite du bioprocédé.*

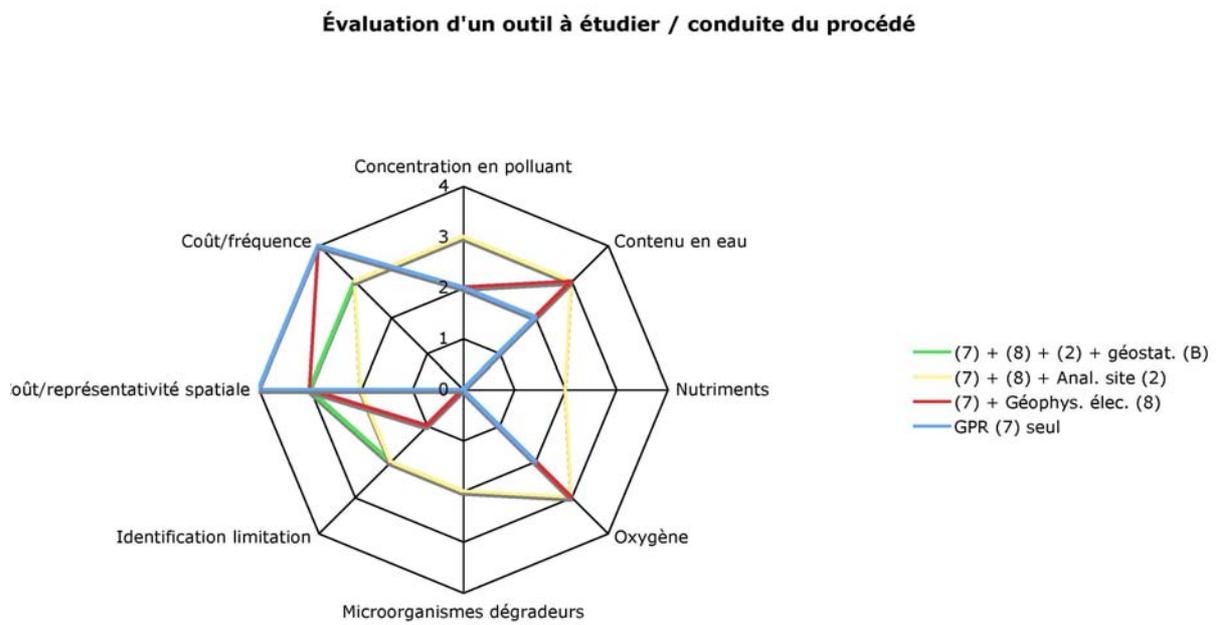


FIG. 3.17: *Évaluation estimée d'une première combinaison d'outils / conduite du bioprocédé.*

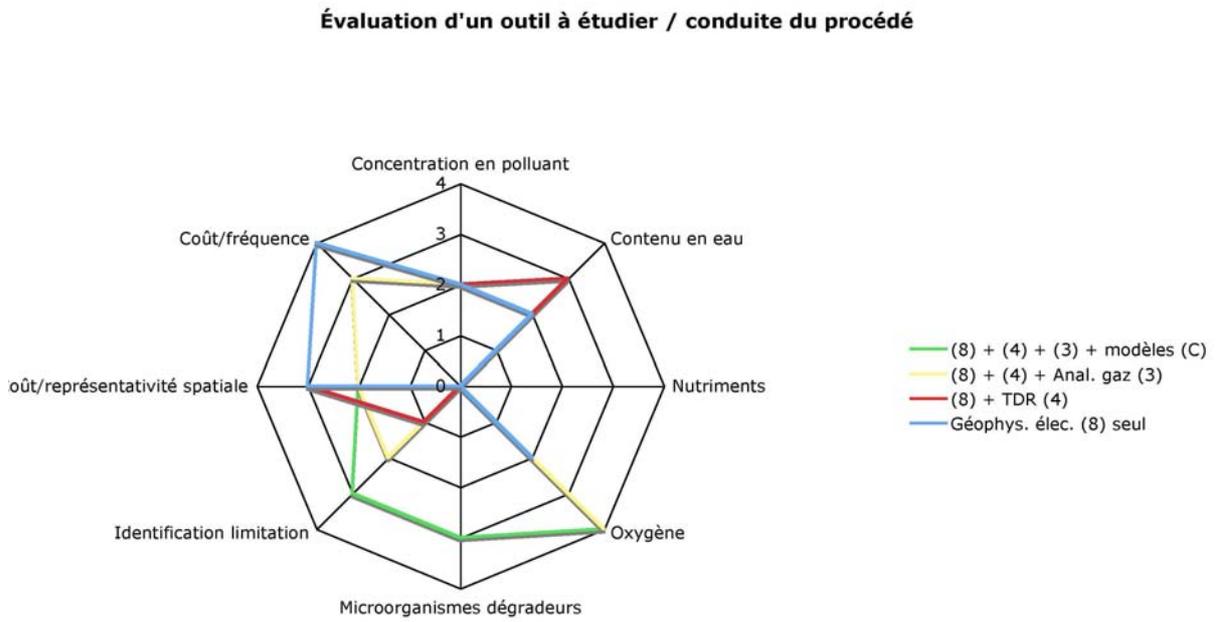


FIG. 3.18: *Évaluation estimée d'une seconde combinaison d'outils / conduite du bioprocédé.*

3.4.3 Conclusion

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.

3.5 Proposition d'axes de recherche

Cette section présente les axes de recherche à privilégier à court et moyen terme. Les propositions sont classées par ordre inverse d'importance (de plus important au moins important).

3.5.1 Développement d'un outil de vérification de l'atteinte des objectifs de dépollution

L'évaluation des outils métrologiques et d'interprétation a suggéré qu'une combinaison d'outils géophysique, géostatistique, analytique et mathématiques permettraient de suivre la performance des bioprocédés de traitement des sols vis à vis de la vérification de l'atteinte des objectifs de dépollution. Toutefois la nature des outils à utiliser reste à préciser et l'efficacité de la séquence proposée à démontrer. Une stratégie en deux étapes peut être proposée. Dans un premier temps, une étude impliquant des chercheurs des différentes disciplines permettraient de définir plus précisément la séquence d'outils et les outils eux-mêmes à utiliser. Des tests de validation à l'échelle semi-pilote en laboratoire pourraient apporter une première validation. Dans un deuxième temps, les outils sélectionnés par la première étude et la séquence à appliquer pourraient être testés à l'aide d'une démonstration de terrain impliquant des entreprises de développement de technologies. Etant donné le coût des études de terrain, il pourrait être envisagé de comparer différentes stratégies impliquant des outils différents.

3.5.2 Développement d'un outil de suivi pour la conduite des bioprocédés de traitement de sols

De l'avis des experts, les outils métrologiques et d'interprétation actuellement disponibles ne permettent pas de réaliser un suivi des bioprocédés adapté à leur conduite. Il en résulte que les outils existants doivent être améliorés pour permettre des mesures pertinentes, fiables et en ligne, tout en maintenant le coût de suivi à niveau de coût acceptable. De nouveaux outils innovants doivent donc être développés pour répondre à cet objectif spécifique. En particulier, des études devraient être encouragées pour développer de nouveaux outils permettant :

- de caractériser l'activité *in situ* microbienne et, en particulier, de biodégradation (biocapteurs),
- de suivre l'évolution de l'impact (éco-)toxique de la pollution résiduelle,
- de réduire l'incertitude sur la durée du traitement pour assurer l'avenir des procédés biologiques pour le traitement *in situ* des sols pollués.

3.5.3 Organisation d'un atelier de travail international et pluridisciplinaire

Les recherches sont actuellement menées discipline par discipline. De plus, les conférences existantes ne favorisent pas les échanges entre disciplines. Il serait donc pertinent d'organiser

un atelier de travail (de type *workshop* sur le suivi de la performance des bioprocédés de traitement des sols). En plus de présenter exhaustivement l'avancement de la recherche dans ce domaine spécifique, un tel atelier permettrait de réunir les différents acteurs, de favoriser les contacts et échanges interdisciplinaires et éventuellement de créer un réseau de compétences sur le sujet, qui pourrait être en charge d'établir une stratégie de développement des activités de recherche.

3.5.4 Développement d'un module d'aide à la sélection d'outils métrologiques et d'interprétation

Le choix des outils métrologiques et d'interprétation dépend de la nature du bioprocédé (en particulier *in situ* et *ex situ*), les caractéristiques géologiques du site, le type de polluant, etc. Il en résulte qu'il n'existe probablement pas un outil ou une combinaison d'outils qui puisse satisfaire tous les sites et toutes les situations. Un module évolutif d'aide à la sélection des outils métrologiques et d'interprétation serait donc utile pour le gestionnaire de sites. Une telle étude nécessiterait évidemment une collaboration étroite entre experts des différentes disciplines. Un tel module pourrait être éventuellement intégré au sein des outils d'aide à la décision disponibles pour les gestionnaires de sites, tel SITE 7.

3.5.5 Outils d'analyse de chantiers

D'une part, le délai entre le prélèvement d'échantillons et le résultat d'analyse ne permet pas une gestion dynamique du site. D'autre part, les outils de chantier disponibles sont chers et peu précis. Il serait donc pertinent de développer des sondes, capteurs et techniques d'analyse bon marché et sinon *in situ* au moins sur site.

3.5.6 Augmentation du niveau de connaissance phénoménologique

L'optimisation des bioprocédés de traitement de sol et le développement d'outils métrologiques et d'interprétation nécessite la connaissance des conditions optimales d'opération et donc une meilleure connaissance des phénomènes mis en jeu. En particulier, une meilleure connaissance des limitations et des façons d'y pallier est indispensable pour rendre les bioprocédés de traitement compétitifs et ainsi rendre le développement des outils de suivi pertinents.

Chapitre 4

Conclusion

Les outils métrologiques et d'interprétation disponibles pour le suivi de la performance des bioprocédés de traitement des sols sont issus de disciplines bien distinctes : analytique, géotechnique, géophysique, géostatistique, mathématiques. En revanche, ces outils sont souvent utilisés seuls et ne permettent pas, dans la situation actuelle, de suivre adéquatement les bioprocédés de traitement de sol, aussi bien vis à vis de la vérification de l'atteinte des objectifs de dépollution que vis à vis de la conduite optimale du bioprocédé. Des fiches d'évaluation des outils ont alors été créées et remplies par des experts des différentes disciplines. Elles ont permis de mettre en évidence les lacunes des différents outils métrologiques et d'interprétation et de faire apparaître les combinaisons d'outils qui permettraient de répondre aux objectifs de suivi de la performance des bioprocédés de traitement. Les résultats des évaluations montrent que le suivi de la performance des bioprocédés en termes de vérification de l'atteinte des objectifs est possible à moindre coût à condition de coupler plusieurs outils. Ainsi, l'utilisation séquentielle d'outils géophysiques, géostatistiques, analytiques et mathématiques est très prometteuse de l'avis des experts. En revanche, en ce qui concerne les chances de succès pour le suivi de la performance vis à vis de la conduite (optimale) des bioprocédés, les experts sont beaucoup plus prudents. En effet, dans l'état actuel du développement des outils métrologiques et d'interprétation, il ne semble pas possible d'avoir un suivi adaptée à la conduite des bioprocédés. Ceci est dû non seulement manque d'outils de mesure en ligne, suffisamment précis et peu onéreux mais aussi à la méconnaissance des phénomènes mis en jeu et des conditions optimales d'opération. Sur la base des avis des experts, des axes de recherche prioritaire sont donc proposés. Les trois principaux axes sont les suivants :

- Développement d'un outil de vérification de l'atteinte des objectifs de dépollution
- Développement d'outils innovants utilisables pour la conduite optimale des bioprocédés de traitement
- Développement d'un module d'aide à la sélection d'outils métrologiques et d'interprétation

Enfin, l'évaluation des outils par rapport à la vérification de l'atteinte des objectifs de dépollution est indépendante du procédé de traitement utilisé. Il en résulte que cette évaluation est valable quelle que soit la technologie de traitement choisie.