



SOLENV - Evaluation environnementale des technologies de traitement de sols et des eaux souterraines pollués

Synthèse

Novembre 2011

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par le BRGM dans le cadre de la convention
n°0872C0118

Coordination technique : Frédérique Cadière
Département : SFUSP - Direction : DVTD – ADEME (Angers)

Remerciements :

Le BRGM remercie l'ensemble des membres du comité scientifiques de pilotage. Ce comité est composé des personnes suivantes :

- Mme Christel de la Hougue déléguée générale de l'Union Professionnelle des Entreprises de Dépollution de Sites (UPDS),
- Mme Catherine Massiani, Professeur, directeur du Laboratoire Chimie et Environnement de l'université de Provence (CNRS),
- M. Jean-Louis Crabos directeur adjoint de l'APESA,
- M. Jérôme Payet, Maître de conférences à l'Ecole Polytechnique de Lausanne (EPFL),

Date de notification : 10 juin 2009.

Date d'achèvement de l'opération : 25 novembre 2011

Référence rapport BRGM : Vaxelaire S., Colombano S., et Ménard Y., (2011) – SOLENV – Évaluation environnementale des technologies de traitement de sols et eaux souterraines pollués, Synthèse : rapport final. BRGM/RP- 61246-FR, 53 p., 12 fig., 10 tab.

L'ADEME en bref

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables, et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines (la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit) et à progresser dans leurs démarches de développement durable.

www.ademe.fr

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Synthèse

La gestion des sites et sols pollués, au sens des textes ministériels de 2007, a comme premier objectif de gérer les risques sanitaires selon l'usage à l'échelle des sites ; les risques environnementaux encourus à des échelles géographiques et temporelles plus étendues sont traités plus marginalement. Mettre en œuvre des technologies de traitement intégrant les spécificités des sites pollués et visant à protéger la santé humaine et les écosystèmes, nécessite de vérifier que ces technologies, tout en réduisant les risques dans l'environnement immédiat des sites, n'augmentent pas de façon significative les risques collatéraux à une échelle géographique plus large et sur une plus longue durée que celle du traitement lui-même et ne génèrent par là-même pas de risque significatif pour l'environnement.

Le projet SOLENV a pour objectif d'élaborer une méthode de sélection de technologies de traitement des sites pollués en tenant compte de leurs performances dans le contexte du site mais également des impacts environnementaux qu'elles engendrent. Ces impacts, considérés en fonction de caractéristiques spécifiques au site, englobent une appréciation des gains de restauration des fonctions du sol et les impacts directs de la mise en œuvre de la technologie. L'objectif plus global du projet est donc de mettre en relation les notions « d'état du sol » et « d'impacts environnementaux ». Ce projet de recherche est soutenu par l'ADEME et s'inscrit dans la thématique « Sites et sols pollués ». Il est financé depuis juin 2009 par l'ADEME et le BRGM pour une durée de 2 ans.

Ce rapport final a pour objectif de faire la synthèse des travaux réalisés au cours du projet. Ce rapport donne une vision de ce qu'il est aujourd'hui possible de faire pour évaluer les impacts des technologies de traitements des sols et des eaux souterraines polluées illustré par l'évaluation des techniques de traitement d'une pollution des sols et des eaux souterraines par des COHV.

La démarche proposée, bien que pointue, se veut proche du cheminement du plan de gestion. Ainsi, l'évaluation des impacts primaires se fait sur la base d'une Analyse des Risques Résiduels (ARR) complétée par une analyse des risques écologiques. L'évaluation des impacts secondaires, impacts engendrés par la mise en œuvre des techniques, peut être déduite de l'Avant Projet Détaillé des travaux de dépollution (APD). Enfin, l'évaluation des indicateurs de qualité des sols, même si elle ne peut se faire quantitativement *a priori*, requerrait un faible investissement car les paramètres à quantifier en vue d'évaluer les technologies de traitement sont, pour certains, déjà mesurés pour mettre en œuvre les-dites technologies.

La méthodologie développée dans le projet SOLENV doit maintenant être appliquée sur un ou plusieurs cas concrets à l'échelle d'un site pollué en zone urbaine (petite taille a forte pression immobilière) et d'un site de plus grande taille (mégasite éventuellement) afin d'évaluer la pertinence de l'approche sur des cas concrets et différenciés.

Enfin, il serait pertinent de fournir aux professionnels des outils permettant de réaliser une meilleure évaluation environnementale des techniques de traitement soit à l'aide d'abaques permettant de relier directement la taille des opérations unitaires à mettre en œuvre sur site et les impacts qui leur seraient associés, soit par le développement d'un outil de quantification des impacts primaires, secondaires et sur les fonctions des sols à l'image de ce que propose, de manière sommaire, l'US EPA via l'outil SRT¹.

¹ Sustainable Remediation Tool : <http://www.gsi-net.com/software.asp>

Sommaire

1. Introduction	9
2. Synthèse des résultats	10
2.1. CAS D'ETUDES EVALUES.....	10
2.2. EVALUTION ENVIRONNEMENTALE DES TECHNOLOGIES PROPOSEES.	10
2.2.1. Description croisée des impacts / aires de protection	14
2.2.1. Mise en perspective de la méthode d'évaluation avec le choix du scénario de gestion	17
2.3. RESULTAT DE L'EVALUATION DU CAS D'UNE POLLUTION DES SOLS ET DE LA NAPPE PAR DES SOLVANTS CHLORES	19
2.3.1. Evaluation des impacts primaires	20
2.3.2. Evaluation des impacts secondaires	21
2.3.3. Evaluation des impacts tertiaires sur la qualité des sols	24
2.3.4. Agrégation des résultats à l'aide de l'analyse multicritère.....	29
2.3.5. Principaux « postes » ayant une forte influence sur le résultat de l'évaluation environnementale.	31
2.4. CONCLUSION	32
3. Recommandations pour évaluer des technologies de traitement dans le cadre d'un projet de dépollution	33
3.1. INTRODUCTION.....	33
3.2. PARAMETRES A PRENDRE EN COMPTE, DEFINITION DU SYSTEME	35
3.2.1. Définition du système	35
3.2.2. Principaux paramètres à prendre en compte pour une évaluation environnementale simplifiée	37
3.2.3. Paramètres à prendre en compte pour une évaluation environnementale détaillée.....	38
3.3. ANALYSE DES IMPACTS.....	39
3.3.1. Evaluation des impacts primaires	39
3.3.2. Evaluation des impacts secondaires	42
3.3.3. Evaluation de la qualité des sols	43
3.3.4. Hiérarchisation des technologies à l'aide de l'AMC	47
3.3.5. Schéma de synthèse de la démarche d'évaluation environnementale....	47
4. Conclusion	49

5. Bibliographie 51

Liste des figures

Figure 1 : Schéma de mise en œuvre combinée d'outils d'aide à la décision pour la sélection de la technologie de dépollution la plus appropriée dans un contexte donné.	11
Figure 2 : diagramme DPSIR appliqué aux sites et sols pollués.	13
Figure 3 : Chaîne de cause à effet reliant les impacts directs sur les sols, aux fonctions du sol et finalement aux impacts finaux sur l'environnement, inspiré de Milà i Canals (2003)	14
Figure 5 : Elaboration du Plan de Gestion (MEDD, 2007).	18
Figure 6 : Illustration des impacts primaires, secondaires et tertiaires.	33
Figure 7 : Schéma méthodologique du calcul d'impacts primaires sanitaires	40
Figure 8 : Schéma méthodologique du calcul d'impacts primaires écologiques	41
Figure 10 : Choix de l'horizon temporel pour le calcul d'impacts sur le fonctionnement et la structure des sols. (a) horizon temporel fixé à 100 ans, (b) horizon temporel = fin de la période de traitement la plus longue	45
Figure 11 : Schéma méthodologique du calcul d'impacts sur la qualité et la structure des sols	46
Figure 12 : Démarche d'évaluation des impacts adossée à la démarche d'interprétation de l'état des milieux et au plan de gestion.	48

Liste des tableaux

Tableau 1 : Lien entre les différents impacts évalués dans le projet et les domaines de protection sur lesquels ils ont une influence.	16
Tableau 2 : Résultats du calcul des indices de risques sanitaires pour l'évaluation des techniques de traitement de la pollution aux COHV.	20
Tableau 3 : Impacts secondaires normalisés des technologies de traitement.	23
Tableau 4 : Liste des indicateurs retenus pour l'évaluation des impacts sur les fonctions de sols	25
Tableau 5 : Liste des indicateurs à retenir en fonction d'exemples d'usages et de fonctions du sol	26
Tableau 6 : Estimation des effets des procédés sur la structure et le fonctionnement des sols au travers d'indicateurs chimiques, biologiques et physiques.....	28
Tableau 7 : Indice normalisé de la qualité des sols estimé à partir du tableau 5 pour les techniques de traitement des COHV.	29
Tableau 8 : Valeur des indices agrégés pour les différentes techniques évaluées en vue de traiter une pollution aux COHV.	30
Tableau 9 : Exemple de contribution aux impacts secondaires d'opérations/engins/ouvrages couramment utilisés en traitement des sols.	37
Tableau 10 : Liste des indicateurs retenus pour l'évaluation des impacts sur les fonctions de sols	39

Glossaire

ACV : analyse du cycle de vie

AICV : analyse des impacts du cycle de vie

AMC : analyse multicritère

APD : avant projet détaillé

AR : analyse de risque

ARR : analyse des risques résiduels

ARE : analyse des risques écologiques

ARS : analyse des risques sanitaires

BPR : barrière perméable réactive

CEC : capacité d'échange cationique

CMA : concentration maximale admissible

COHV : composés organiques halogénés volatils

DPSIR : Driving force, Pressure, State, Impact, Response.

ERI : excès de risque individuel

FOD : fioul ordinaire domestique

ICV : inventaire du cycle de vie

IEM : Interprétation de l'état des milieux

IFS : impact pondéré sur les fonctions des sols

IQS : indice de qualité des sols

ISCO : oxydation chimique *in situ*

MO : matière organique

PEC : predicted environmental concentration : concentration dans l'environnement

PNEC : predicted no effect concentration

QD : quotient de danger

VTR : valeurs toxicologiques de référence

1. Introduction

L'approche française pour la gestion des sites pollués (défini par les textes ministériels de 2007) repose sur le principe d'une gestion des sites au cas par cas en fonction des usages. Pour chaque site doivent être choisis les outils de gestion les mieux adaptés à partir d'une véritable réflexion autour du schéma conceptuel (ou modèle de fonctionnement) du site. Dans la méthodologie (datant du 08/02/2007), le plan de gestion requiert de réaliser un bilan coûts-avantages afin d'identifier et de comparer les différentes options de gestion/réhabilitation. Cette analyse a pour objectif d'atteindre le meilleur niveau de protection de l'environnement, humain et naturel, tout en évitant de mobiliser des ressources démesurées au regard des intérêts à protéger. D'un point de vue pratique, le processus de prise de décision dans le domaine de la remédiation est un processus séquentiel (itératif, évolutif et interactif). En premier lieu, les objectifs centraux du traitement sont fixés. Ces objectifs de traitement doivent permettre de se conformer aux réglementations en vigueur afin de redévelopper des zones, de supprimer ou limiter les impacts du passif environnemental d'anciennes zones d'activités industrielles et de rétablir la compatibilité entre la qualité environnementale du site et l'usage. Ces objectifs sont à mettre en parallèle avec les possibilités des techniques de remédiation capables d'atteindre ces objectifs centraux. Une liste de techniques pouvant être mises en application est alors établie. A ce niveau, des impacts et bénéfices collatéraux, non directement liés à la technologie de traitement sont considérés, de façon à sélectionner la technologie dont le bilan global offre le plus d'apport bénéfique et l'impact négatif le plus faible.

A l'heure actuelle, aucune méthode n'est communément employée pour apprécier, sur la base de données quantifiées, le caractère durable des projets de remédiation en prenant en compte les impacts des technologies de traitement sur l'environnement et plus spécifiquement sur le sol lui-même.

Le but de SOLENV est de développer une base méthodologique permettant d'évaluer les bénéfices et impacts environnementaux des technologies de traitement des sols et des eaux souterraines polluées, intégrant les pressions sur l'environnement et les impacts sur les fonctions du sol (dégradation ou restauration de son état) en fonction des types d'usages ultérieurs (agriculture, habitat ...). Cette méthodologie doit ainsi aider à la sélection des techniques de dépollution et constitue l'objectif principal du projet SOLENV.

Ce rapport, fait la synthèse du travail réalisé par le BRGM dans cette perspective. L'objectif est de définir une méthodologie permettant d'apprécier les bénéfices de l'utilisation des techniques de dépollution sur la restauration ou la dégradation des fonctions du sol que l'on cherche à préserver en fonction d'un usage ultérieur défini.

La première partie de ce document est consacrée à la présentation des résultats obtenus dans le projet, la seconde partie décrit une proposition de méthodologie de calculs des impacts environnementaux. Un indice final moyen pondéré peut alors être calculé et pourrait servir, dans certains cas, à alimenter le plan de gestion.

2. Synthèse des résultats

2.1. CAS D'ETUDES EVALUES

Dans le but de comparer les impacts de l'application des techniques de dépollution couramment appliquées, le BRGM a procédé au dimensionnement de 15 techniques de dépollution usuellement utilisées dans le domaine de sites et sols pollués. Pour se faire, 4 sites réels, ont été pris en considération :

- site 1 : pollution des sols et de la nappe par du FOD (fioul ordinaire domestique) avec présence de surnageant ; utilisation des techniques de dépollution/gestion suivantes : pompage/écrémage, tranchée drainante, extraction multiphase ;
- site 2 : pollution des sols par des métaux et des métalloïdes ; utilisation des techniques de dépollution/gestion suivantes : recouvrement de surface (terre végétale), recouvrement de surface (enrobé), recouvrement de surface (béton), encapsulation ;
- site 3 : pollution des sols par du FOD ; utilisation des techniques de dépollution/gestion suivantes : biotertre, compostage, landfarming ;
- site 4 : pollution des sols et de la nappe par des solvants chlorés ; utilisation des techniques de dépollution/gestion suivantes : sparging/venting, traitement biologique. anaérobie, ISCO, BPR, atténuation naturelle monitorée.

Seuls les résultats obtenus pour l'évaluation du cas d'une pollution des sols et de la nappe par des solvants chlorés sont présentés dans ce rapport. Les résultats obtenus pour les autres cas d'études sont détaillés dans le rapport portant sur évaluation des impacts secondaires (Rapport BRGM/RP-60386-FR, Vaxelaire S. et al 2011).

2.2. EVALUTION ENVIRONNEMENTALE DES TECHNOLOGIES PROPOSEES.

Les travaux menés dans le cadre du projet SOLENV avaient pour objectifs d'évaluer les impacts environnementaux des technologies de traitements des sols et des eaux souterraines polluées. L'évaluation environnementale prend en compte trois types d'impacts liés à un projet de dépollution :

- les impacts « primaires », ils sont directement liés à la présence de contaminants dans les sols et/ou les eaux souterraines et aux risques qu'ils engendrent. L'évaluation des impacts primaires vise à évaluer l'effet de la réduction des teneurs en contaminants dans les sols et/ou les eaux souterraines ou l'effet lié à la réduction de l'exposition aux contaminants, lors de la mise en œuvre des techniques de dépollution,
- les impacts « secondaires », ils résultent de la mise en œuvre des technologies de remédiation. Ces impacts peuvent être directs et associés aux rejets dans les milieux « eau », « air » et « sol » par exemple, les quantités de CO₂ rejetées à l'atmosphère, les consommations énergétiques, les rejets de composés contenant de l'azote ou du phosphore... ou indirects résultant par exemple des consommations de matières premières liées à la fabrication des équipements de traitement ou à la production de réactifs de traitement,
- les impacts « tertiaires » en lien avec la qualité du sol entre son état avant dépollution et celui résultant de l'opération de traitement. Des indicateurs spécifiques à la caractérisation de la qualité du sol ont été définis pour évaluer cet aspect. L'objectif est d'apprécier les bénéfices de l'utilisation des techniques de

dépollution sur la restauration ou la dégradation des fonctions du sol que l'on cherche à préserver en fonction d'un usage ultérieur.

Ces différents impacts ont été appréhendés à l'aide de plusieurs méthodes d'évaluation. Ces méthodes ont ainsi été utilisées et adaptées pour comparer, évaluer et sélectionner les technologies de traitement des sols et des eaux souterraines pollués. La figure 1 représente la démarche adoptée, qui combine l'utilisation de différents outils/méthodes d'évaluation afin de parvenir à une hiérarchisation des technologies :

- les impacts primaires sont évalués par une méthode dérivée de l'Analyse des Risques Sanitaires (ARS, dénommée Analyse des Risques Résiduels-ARR dans le Plan de Gestion) et l'Analyse des Risque Ecologique (ARE),
- les impacts secondaires sont évalués par la méthode de l'analyse du cycle de vie (ACV),
- la qualité des sols (impacts tertiaires) est évaluée via un volet d'indicateurs dédiés, inspirés par le test Cornell (cf. Schindelbeck *et al.*, 2008) et présentés plus en détail dans le rapport portant sur l'évaluation des impacts sur les fonctions des sols (rapport BRGM/RP-60091-FR, Ménard *et al.*, 2011).

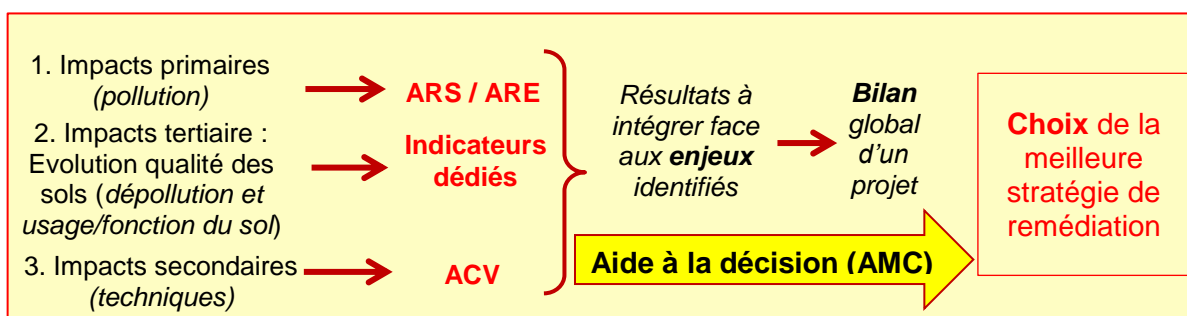


Figure 1 : Schéma de mise en œuvre combinée d'outils d'aide à la décision pour la sélection de la technologie de dépollution la plus appropriée dans un contexte donné.

Les différents impacts présentés dans la figure 1 et les indicateurs de qualité des sols ne peuvent être comparés entre eux directement. (cf. rapport BRGM/RP-58683-FR « Outils d'évaluation environnementale »). La figure 2 représente le diagramme DPSIR (« Driving force, Pressure, State, Impact, Response ») appliqué au contexte du traitement des sols et des eaux souterraines pollués. La **bulle jaune** correspond à l'évaluation des **impacts primaires** réalisée par l'analyse des risques sanitaires et écologiques.

Cela permet de faire le lien entre l'état d'un sol ou d'une nappe contaminée et les impacts (au sens risque) associés, sur la santé et les écosystèmes. La **bulle verte** représente l'évaluation **des impacts secondaires** par l'analyse de cycle de vie, qui permet de faire le lien entre les pressions et les impacts. Enfin, la **bulle brune** représente l'**évaluation de la qualité des sols**. En l'état actuel des connaissances, il n'existe pas d'outil et de méthode permettant de faire un lien quantitatif entre la qualité d'un sol et les impacts sur les fonctions et services rendus par le sol.

Les différents outils et indicateurs auxquels il est fait appel, dans le cadre du projet SOLENV, pour réaliser l'évaluation environnementale d'une technologie de traitement des sols et eaux souterraines pollués repose sur des hypothèses différentes et ne permettent pas de restituer les résultats dans des formats directement comparables :

- la zone géographique : elle se limite au site et à ses environs immédiats pour l'analyse des risques sanitaires (ARS) ou l'analyse des risques écologique (ARE) ou les indicateurs de qualité des sols (impacts primaires et qualité des sols), alors que l'ACV évalue les impacts à l'échelle d'un continent (impacts secondaires),
- les horizons temporels : dans le cadre d'une ACV, l'horizon temporel est généralement infini, alors que dans le cadre d'une analyse de risques ne va généralement pas au-delà de 30 ans ou 60 ans dépendamment du type de polluants (polluants cancérigènes ou non),
- les modes de quantification : les résultats sont exprimés :
 - *i.*) en équivalent d'une substance caractéristique en analyse du cycle de vie,
 - *ii.*) en niveau de risque pour l'analyse de risque avec comparaison à un indice de risque ou une probabilité de risque (respectivement pour le quotient de risque ou l'excès de risque, ou encore le rapport PEC / PNEC²),
 - *iii.*) et de manière normée (entre 0 et 10) pour les indicateurs de qualité des sols.

En l'état actuel des connaissances, il apparaît nécessaire de faire appel à un outil d'aide à la décision comme l'analyse multicritère (AMC) qui permet de comparer des options « difficilement comparables ». Cette AMC permet de définir une hiérarchie entre différentes techniques de remédiation.

² PEC/PNEC : Predicted Environmental Concentration (concentration dans l'environnement) / Predicted No Effect Concentration.

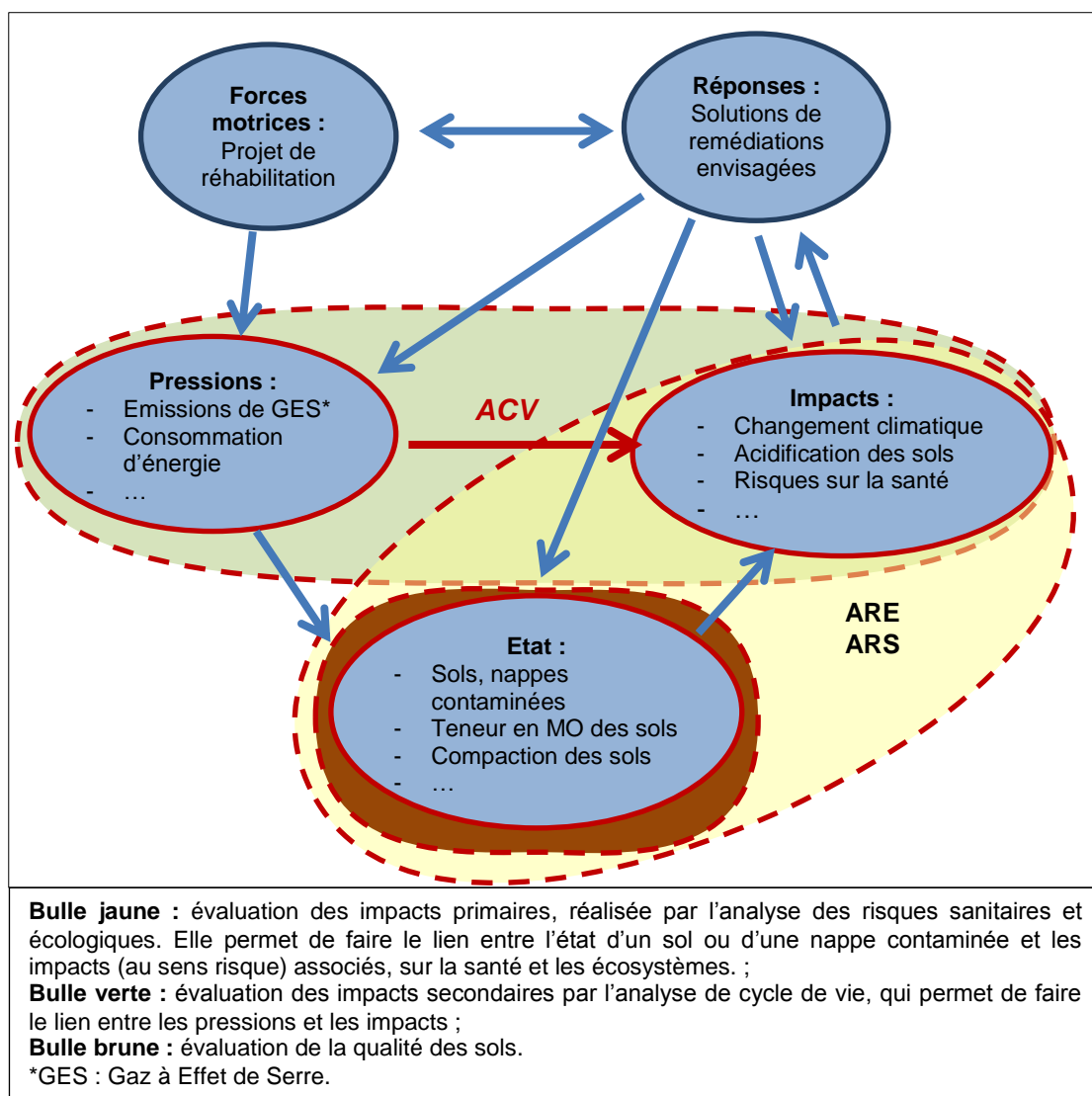


Figure 2 : diagramme DPSIR appliqué aux sites et sols pollués.

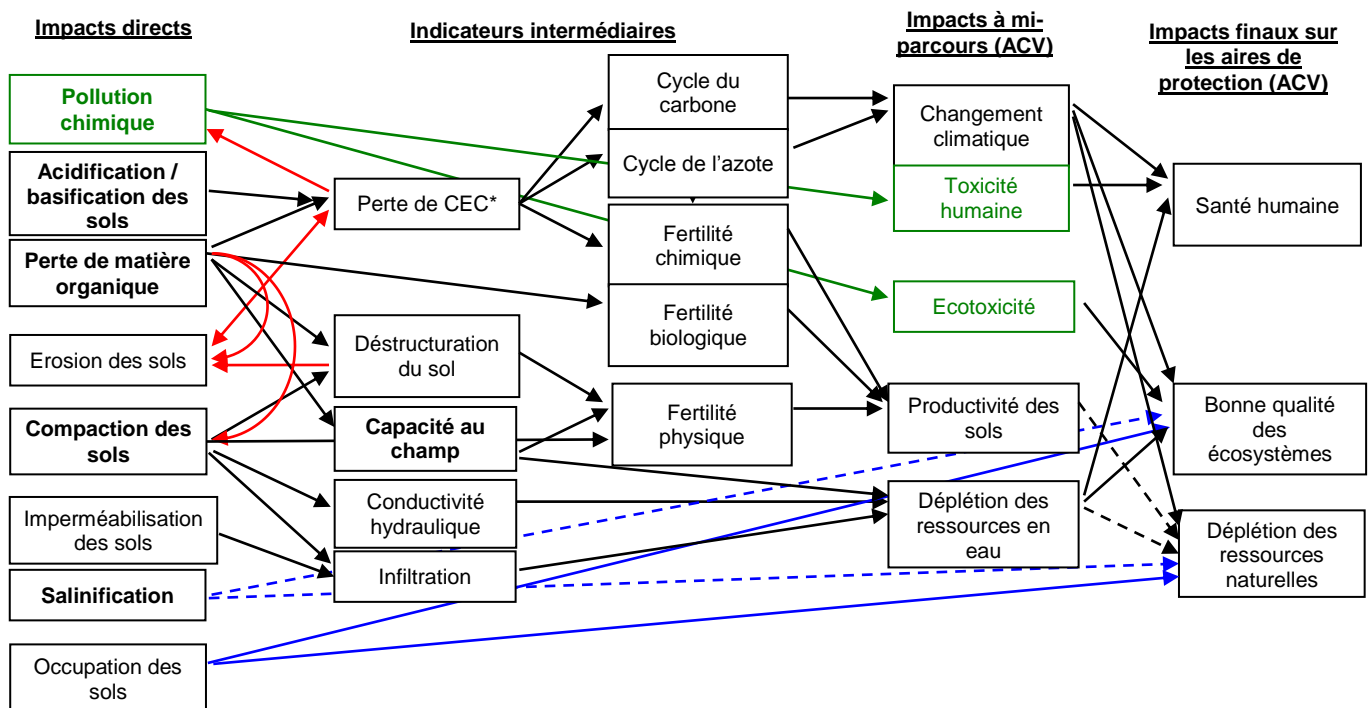
2.2.1. Description croisée des impacts / aires de protection

La protection de l'environnement vise à protéger plusieurs grands domaines appelés « aires de protection », afin de garantir le bon état de l'environnement présent et futur.

La figure 3 représente la chaîne de cause à effet reliant les impacts directs sur la qualité des sols aux fonctions remplies par les sols, et finalement aux impacts finaux sur l'environnement. Les impacts résultant de la pollution chimique représentée en vert dans la figure correspondent aux impacts primaires évalués par l'ARS et l'ARE.

Les indicateurs intermédiaires caractérisent les fonctions remplies par les sols. Ils sont directement quantifiables et traduisent un état du sol. Leur évolution est liée aux pressions exercées sur les impacts directs. Ces indicateurs sont à l'interface entre les impacts directs sur les sols et les impacts à mi-parcours évalués lors de l'analyse des impacts en ACV.

Les flèches rouges représentent les interactions entre les différentes catégories d'impacts directs. Les flèches bleues relient directement les impacts « occupation des sols » et « salinification » aux impacts finaux. Enfin les flèches en pointillés représentent des liens qui ne sont pas établis de manière formelle.



*CEC : capacité d'échange cationique.

Figure 3 : Chaîne de cause à effet reliant les impacts directs sur les sols, aux fonctions du sol et finalement aux impacts finaux sur l'environnement, inspiré de Milà i Canals (2003)

Le milieu sol est un système complexe au sein duquel les interactions sont multiples. Il est ainsi difficile d'établir des liens de cause à effet directs et quantifiables entre un indicateur de qualité du sol et les impacts finaux sur les aires de protection de l'environnement. C'est pourquoi nous avons retenu une liste d'indicateurs de qualité du sol issus inspirés par le test Cornell (cf. Schindelbeck *et al.*, 2008) afin d'évaluer les impacts sur les fonctions du sol.

Le tableau 1 classe les différentes catégories d'impacts et d'indicateurs en fonction de l'aire de protection à laquelle ils se rapportent (santé humaine, qualité des écosystèmes, ressources naturelles). Par ailleurs, il existe des recoupements ; une catégorie d'impact peut être en lien avec plusieurs aires de protection. Ainsi, le changement climatique va avoir des effets à la fois sur la santé humaine et à la fois sur la qualité des écosystèmes, il en est de même pour le pH d'un sol.

Tableau 1 : Lien entre les différents impacts évalués dans le projet et les domaines de protection sur lesquels ils ont une influence.

Aires de protection	Impacts primaires	Impacts secondaires	Indicateurs de qualité des sols (impacts tertiaires)
Santé humaine	- Risques sanitaires	<ul style="list-style-type: none"> - Changement climatique - Déplétion de la couche d'ozone - Toxicité humaine - Formation d'ozone photochimique - Particules, effets respiratoires inorganiques - Radiation ionisante 	<ul style="list-style-type: none"> - pH - teneur en MO
Qualité des écosystèmes	- Risques écologiques	<ul style="list-style-type: none"> - Changement climatique - Acidification terrestre - Eutrophisation aquatique - Ecotoxicité aquatique - Ecotoxicité marine - Ecotoxicité terrestre - Occupation de sol agricole - Occupation de sol urbain - Transformation d'espace naturel 	<ul style="list-style-type: none"> - pH - teneur en MO - Azote potentiellement minéralisable - Phosphore et potassium extractibles - Teneur en sels - Stabilité des agrégats - Dureté de surface - Compaction
Ressources naturelles		<ul style="list-style-type: none"> - Déplétion des ressources en énergies fossiles - Déplétion des ressources métalliques - Déplétion des ressources en eaux 	<ul style="list-style-type: none"> - Stabilité des agrégats - Compaction - Dureté de surface - Capacité au champ

2.2.1. Mise en perspective de la méthode d'évaluation avec le choix du scénario de gestion

Les méthodes de sélection des techniques de dépollution dans les principaux pays ayant mis en place une politique de gestion des sites et sols pollués ont été étudiées dans le projet Eurodemo (2007). Elles sont généralement divisées en plusieurs étapes : investigations, présélections des techniques, évaluation des options (via des analyses coûts-bénéfices ou des analyses multicritères) et validation du choix. Ce projet a mis en lumière un processus décisionnel de choix de la technique de dépollution. La figure 4 présente une adaptation de ce processus décisionnel permettant de mieux intégrer les aspects environnementaux.

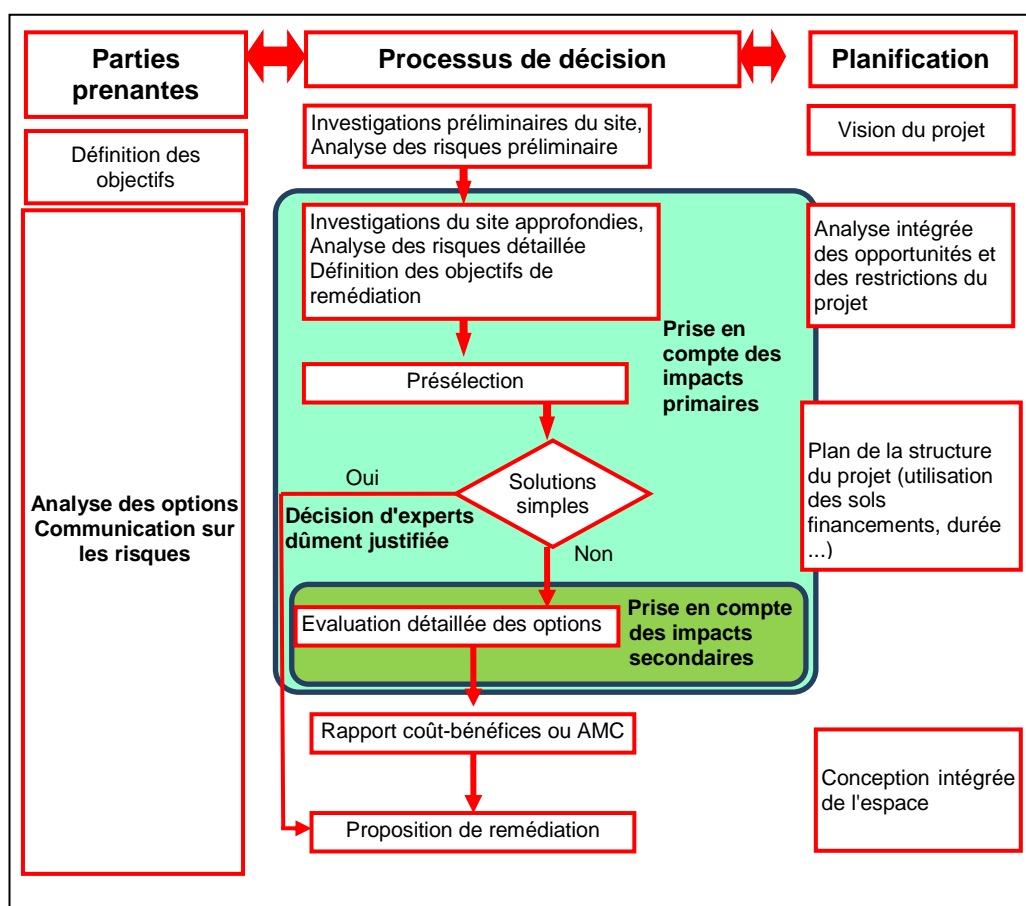


Figure 4 : Intégration du processus de prise de décision dans le processus de régénération globale du site (Eurodemo D4-2 2007) avec considération des impacts environnementaux (modifié de Eurodemo D4-2 2007).

D'une manière générale la prise en compte des impacts environnementaux peut être intégrée à deux niveaux distincts dans le processus décisionnel du choix de la technique de dépollution.

Les impacts primaires et secondaires peuvent être évalués lors des phases d'évaluations et de sélections d'un projet de remédiation. L'évaluation des impacts environnementaux primaires et secondaires peut s'effectuer conjointement à une démarche de sélection d'une stratégie de remédiation. Elle s'insère dans les étapes d'analyse de risques détaillée et de définition des objectifs de remédiation qui vont permettre de définir les options de remédiation. Par contre, à ce jour, faute de données disponibles, l'évaluation des impacts sur la qualité des sols ne peut se faire pendant les phases de diagnostics. Une bancarisation de données sur la qualité des sols des sites et sols pollués et de l'effet des techniques de traitement devrait être mise en œuvre pour atteindre cet objectif.

De la même manière, dans le cadre français de la gestion des sols pollués, ces impacts primaires et secondaires pourraient respectivement être intégrés dans les phases de diagnostics et les phases de plan de gestion. En effet, le bilan coûts-avantages dudit Plan de Gestion prévoit de tenir compte des aspects techniques, économiques, sociétaux mais aussi environnementaux (cf. figure 5).

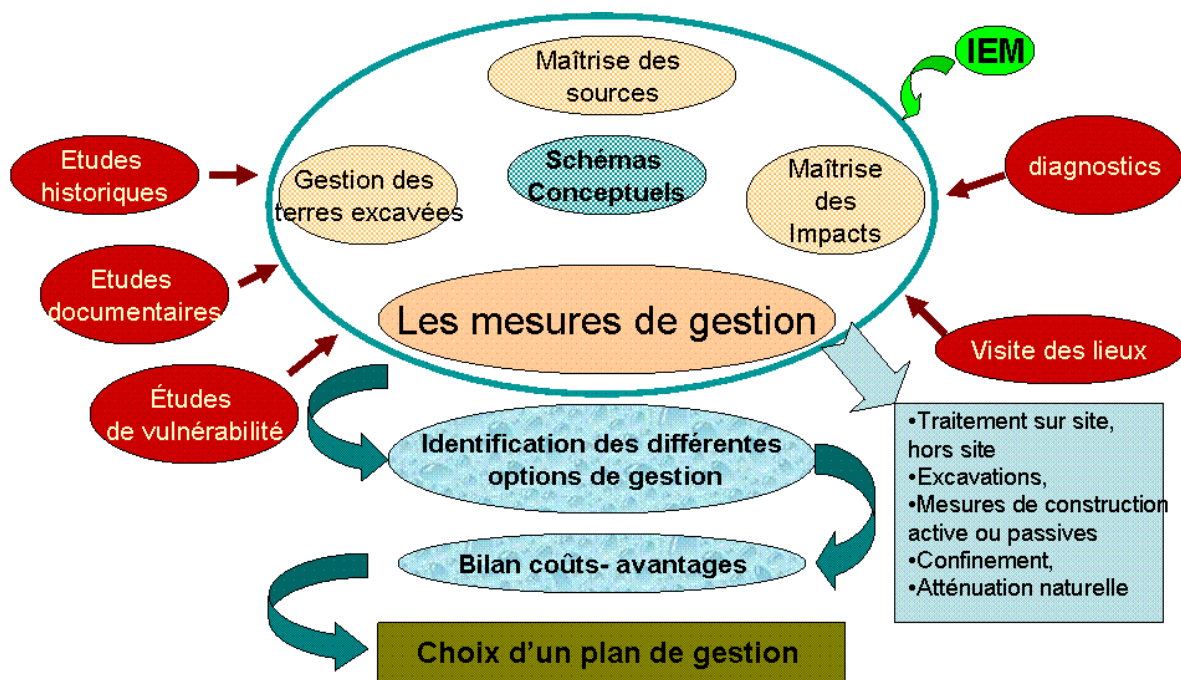


Figure 5 : Elaboration du Plan de Gestion (MEDD, 2007).

2.3. RESULTAT DE L'EVALUATION DU CAS D'UNE POLLUTION DES SOLS ET DE LA NAPPE PAR DES SOLVANTS CHLORES

La démarche d'évaluation environnementale des technologies de dépollution présentée ci-dessus a été menée sur différents cas d'études.

Le présent chapitre synthétise les résultats de l'évaluation environnementale des techniques de traitement appliquée à un cas d'étude relatif à une pollution des sols et des eaux souterraines par des COHV.

Les parties suivantes :

- 2.3.1 : évaluation des impacts primaires,
- 2.3.2 : évaluation des impacts secondaires,
- 2.3.3 : évaluation des impacts tertiaires sur la qualité des sols,

présentent les principaux résultats obtenus en vue d'évaluer les performances environnementales des techniques de dépollution/gestion suivantes :

- sparging/venting,
- traitement biologique anaérobie,
- oxydation chimique in situ (ISCO),
- barrière perméable réactive (BPR),
- atténuation naturelle monitorée.

2.3.1. Evaluation des impacts primaires

Les impacts « primaires » sont directement liés à la présence de contaminants dans les sols et ou les eaux souterraines et aux risques qu'ils engendrent. L'évaluation des impacts primaires vise à évaluer l'effet de la réduction des teneurs en contaminants dans les sols et-ou les eaux souterraines, ou l'effet lié à la réduction de l'exposition aux contaminants, lors de la mise en œuvre des techniques de dépollution. La méthode d'évaluation de ces impacts, décrite dans le rapport BRGM/RP-60091-FR³, elle s'appuie sur les méthodes d'évaluations des risques sanitaires (ARS) et des risques écologiques (ARE).

Le tableau 2 présente les résultats de l'évaluation des impacts sanitaires primaires des techniques de dépollution envisagées sur le cas d'étude « COHV ». Les impacts écologiques n'ont pu être évalués dans de cette étude qui s'appuie sur des exemples pour lesquels aucune donnée n'était disponible pour évaluer les impacts écologiques primaires. L'indice moyen est obtenu en faisant la moyenne des indices normalisés de l'excès de risque individuel et du quotient de danger. Une valeur d'indice de 10 est attribuée à la technique la plus performante (technique qui présente la meilleure performance rapportée à la durée du traitement).

Au regard des résultats présentés dans le tableau 2, l'oxydation chimique in situ (ISCO) peut être considérée comme la technique la plus performante pour minimiser les impacts primaires sanitaires, les impacts écologiques n'ayant pas pu être évalués.

Tableau 2 : Résultats du calcul des indices de risques sanitaires pour l'évaluation des techniques de traitement de la pollution aux COHV.

	Durée du traitement (mois)	Indice de risque (I)		Indice de risque normalisé (IN)		Indice moyen
		Effets sans seuil	Effets à seuil	Effets sans seuil	Effets à seuil	
		I _{ERI}	I _{QD}	IN _{ERI}	IN _{QD}	
Traitement par atténuation naturelle monitorée	360	6,42	175	0,20	9,54	4,87
Traitement par venting/sparging	24	247	182	7,57	9,89	8,73
Traitement par ISCO	12	327	184	10,00	10,00	10,0
Traitement par atténuation naturelle monitorée + vide sanitaire ventilé	360	163	180	4,98	9,76	7,37
Traitement biologique anaérobie	24	33,3	176	1,02	9,58	5,30
Traitement biologique anaérobie + vide sanitaire ventilé	24	326	184	9,97	10,00	10,0

³ Ménard Y., Vaxelaire S., Colombano S., Cofrier A. (2011) – SOLENV – Évaluation environnementale des technologies de traitement de sols et eaux souterraines pollués, évaluation des impacts sur les fonctions des sols. BRGM/RP-60091-FR, 161 p., 19 figures, 14 tableaux, 3 ann.

2.3.2. Evaluation des impacts secondaires

Les impacts secondaires résultent de la mise en œuvre des techniques de remédiation. Ces impacts peuvent être :

- **directs** et associés aux rejets dans les milieux « eau », « air » et « sol » (quantités de CO₂ rejetées à l'atmosphère, consommations énergétiques, rejets de composés contenant de l'azote ou du phosphore...),
- **ou indirects** résultant, par exemple, des consommations de matières premières liées à la fabrication des équipements de traitement ou à la production de réactifs de traitement.

Les impacts secondaires sont évalués à partir d'inventaire du cycle de vie (ICV). Cet ICV est basé sur un Avant Projet Détaillé des techniques de dépollution (APD) qui permet de dimensionner :

- les matériaux utilisés (et les quantités associées),
- les réactifs utilisés,
- les durées de fonctionnement,
- le suivi nécessaire au fonctionnement,
- les temps de traitement,
- les consommations énergétiques et le type d'énergie nécessaire,
- les flux massiques de rejets atmosphériques gazeux et de rejets liquides,
- la génération de déchets et leur gestion associée.

Les paramètres ainsi calculés servent de données d'entrée à l'analyse du cycle de vie (ACV) des techniques de dépollution. L'évaluation des impacts secondaires est décrite en détail dans le rapport BRGM/RP-60386-FR⁴.

⁴ Vaxelaire S., Colombano S., et Ménard Y., avec la collaboration de Coftier A. (2011) – SOLENV – Évaluation environnementale des technologies de traitement de sols et eaux souterraines pollués, évaluation des impacts secondaires. BRGM/RP-60386-FR, 53 p., 31 fig., 46 tab., 2 ann.

Le tableau 3 présente les performances environnementales relatives des techniques de dépollution envisagées sur le site « COHV ». Afin d'établir une hiérarchie entre les techniques, un indice normalisé compris entre 0 et 10 a été calculé à partir des résultats de l'ACV :

$$IN_i = 10 \times \frac{I_i}{\max(I_i)}$$

Pour chaque catégorie d'impact, la valeur d'impact (I_i) obtenue pour chacune des techniques mises en œuvre sur un site est divisée par la valeur maximale ($\max(I_i)$) obtenue par la technique qui génère le plus d'impact, puis est multipliée par 10. Par conséquent, la note de 10 est attribuée à la technologie la moins performante.

Une valeur unique pour les impacts secondaires est finalement calculée à partir de la moyenne des indices obtenus pour les différentes catégories d'impacts.

Le sparging-venting et l'ISCO apparaissent comme les techniques qui génèrent le moins d'impacts secondaires, si l'on excepte l'atténuation naturelle monitorée dont les impacts dépendent fortement des hypothèses sur les distances de transport parcourues lors des opérations de surveillance et de maintenance pendant la période de suivi (360 mois)

Tableau 3 : Impacts secondaires normalisés des technologies de traitement.

Catégorie d'impact	Sparging-venting	ISCO	Bio anaérobie	BPR	Atténuation naturelle monitorée (AR 500 km)	Atténuation naturelle monitorée (AR 50 km)
Changement climatique	2,39	1,01	5,25	10,00	6,15	1,41
Déplétion de la couche d'ozone	1,39	0,98	8,43	7,53	10,00	1,44
Déplétion des ressources en énergie fossile	4,36	1,41	10,00	9,91	7,12	1,43
Déplétion des ressources métalliques	0,08	10,00	0,71	0,13	0,65	0,64
Acidification terrestre	2,88	1,17	5,22	10,00	6,54	1,45
Eutrophisation aquatique	1,29	1,15	3,65	10,00	1,30	1,02
Eutrophisation marine	2,32	1,04	3,86	10,00	9,51	1,64
Formation d'ozone photochimique	2,88	1,00	4,61	10,00	9,71	1,63
Toxicité humaine	0,07	10,00	0,08	0,42	0,07	0,05
Ecotoxicité aquatique	0,14	10,00	0,27	2,23	0,27	0,22
Ecotoxicité terrestre	1,70	0,70	3,57	10,00	6,00	1,23
Ecotoxicité marine	0,17	10,00	0,52	2,52	0,35	0,24
Particules / effets respiratoires inorganiques	1,41	0,55	2,63	10,00	4,21	1,17
Occupation de sol urbain	0,59	0,93	1,36	10,00	1,10	0,58
Occupation de sol agricole	0,14	0,02	0,06	10,00	0,02	0,02
Transformation d'espace naturel	1,52	0,94	7,87	-2,31	10,00	1,53
Radiation ionisante	10,00	0,90	1,49	2,17	1,26	1,18
Moyenne	1,96	3,05	3,50	6,62	4,37	0,99

2.3.3. Evaluation des impacts tertiaires sur la qualité des sols

A l'instar des analyses économiques de l'environnement, qui ne portent le plus souvent que peu d'importance au sol, les évaluations environnementales des technologies de traitement des sols et eaux souterraines pollués n'intègrent que trop rarement les conséquences de leur mise en œuvre sur les fonctions des sols et les services écosystémiques que ces derniers fournissent à la société. A titre d'exemple, ces services comprennent l'épuration des eaux, le rôle de réservoir de biodiversité, le stockage géologique du carbone (puits de CO₂), et bien d'autres encore. La dégradation de la qualité des sols et, par voie de conséquence, la détérioration de leurs fonctions, entraînent une diminution, voire une perte des services rendus. Ces services peuvent être traduits en termes économiques, plus facilement appréhendables par le grand public. Dans le rapport de synthèse du Millenium Ecosystem assessment paru en 2005, ces services rendus sont évalués à plus de centaines d'euros à l'hectare. Autre exemple, dans sa tentative d'évaluer les modifications des services rendus par les écosystèmes et d'y appliquer des valeurs monétaires, le rapport d'étape (phase 1) de l'Economie des Ecosystèmes et de la Biodiversité (EEB) met en lumière qu'au cours des premières années de la période 2000-2050, il est estimé que nous perdrons chaque année une valeur équivalente à environ 50 milliards d'euros de transferts de bénéfices rendus par les écosystèmes (dont les sols) à l'Homme.

Chacune des fonctions des sols peut être caractérisée par un ou plusieurs processus chimiques, physiques ou biologiques. Ces processus peuvent eux-mêmes être décrits par un jeu d'indicateurs qui traduisent la qualité d'un sol en termes de structure (physique) et de fonctionnement (biogéochimique).

Alors que les méthodologies d'évaluation de la qualité de l'air et des eaux sont bien établies, les protocoles d'évaluation de la qualité des sols sont quasiment inexistant. L'objectif poursuivi dans SOLENV consiste à proposer une méthodologie permettant d'évaluer l'impact des techniques de remédiation sur la qualité des sols et de traduire leur fonctionnement au travers de l'évaluation d'un certain nombre d'indicateurs.

En l'absence de retour d'expérience sur l'évolution de ces paramètres au cours du traitement, la méthodologie proposée ne peut avoir de caractère prédictif quantitatif. Néanmoins, il est possible d'estimer qualitativement, sur la base de dires d'experts, les évolutions prévisibles d'un certain nombre d'indicateurs pour chacune des techniques considérées.

Ces indicateurs de qualité des sols sont classiquement répartis en 3 catégories (physique, chimique et biologique) qui dépendent de la façon dont ils influencent telle ou telle fonction. Ces catégories ne sont pas toujours clairement définies car une propriété donnée, traduite par un indicateur, peut avoir une influence sur plusieurs fonctions.

Sur la base du test de Cornell Standard présenté dans le rapport d'évaluation des impacts sur les fonctions des sols nous avons retenu 9 indicateurs (cf. rapport BRGM/RP-60091-FR⁵) pour leur adéquation avec les objectifs de la dépollution (cf. Tableau 4). Les indicateurs physiques sont conservés en intégralité.

Tableau 4 : Liste des indicateurs retenus pour l'évaluation des impacts sur les fonctions de sols

Catégories	Indicateurs
Physique	Stabilité des agrégats
	Compaction
	Dureté de surface
	Capacité au champ
Biologique	Teneur en matière organique
	Azote potentiellement minéralisable
Chimique	pH
	Phosphore et potassium extractibles
	Teneur en sels

La façon dont chacun de ces 9 indicateurs reflète le fonctionnement des sols est fournie dans le rapport SOLENV sur l'évaluation des impacts sur les fonctions des sols (Ménard et *al.*, 2011). En fonction des contextes du site à dépolluer et des usages qu'on envisage de lui assigner, une étape de sélection des indicateurs les plus pertinents issus de cette liste peut être réalisée.

La méthode d'évaluation vise à comparer l'effet sur les indicateurs de plusieurs techniques. En fonction des usages, seuls les indicateurs pertinents seront retenus (cf. tableau 5). Par contre, la démarche n'a pas pour objectif de définir différents états de référence en fonction de l'usage du sol.

⁵ Ménard Y., Vaxelaire S., Colombano S., Coftier A. (2011) – SOLENV – Évaluation environnementale des technologies de traitement de sols et eaux souterraines pollués, évaluation des impacts sur les fonctions des sols. BRGM/RP-60091-FR, 161 p., 19 figures, 14 tableaux, 3 ann.

Tableau 5 : Liste des indicateurs à retenir en fonction d'exemples d'usages et de fonctions du sol

Catégories	Indicateurs	Usage résidentiel non bâti	Usage résidentiel bâti	Zone de parking	Permettre la recharge et préserver les ressources eaux souterraines	Atténuation du changement climatique
Physique	Stabilité des agrégats		X	X		
	Compaction	X	X	X	X	
	Dureté de surface	X	X	X	X	
	Capacité au champ	X	X	X	X	X
Biologique	Teneur en matière organique	X			X	X
	Azote potentiellement minéralisable	X			X	x
Chimique	pH	X			X	x
	Phosphore et potassium extractibles	X			X	x
	Teneur en sels	X			X	x

Les indicateurs retenus pour les différents usages présentés dans le tableau 5 permettent d'évaluer à des fonctions du sol selon les usages :

- Pour un usage résidentiel « non bâti » nous avons retenu les indicateurs physiques car la fonction d'infiltration des eaux doit être prise en compte. Les indicateurs biologiques et chimiques sont retenus car le sol doit également être support de végétation.
- Pour un usage résidentiel « bâti » ou une zone de parking, seuls sont retenus les indicateurs physiques en lien avec les contraintes géotechniques.
- Pour assurer la préservation de la ressource en eaux, les indicateurs retenus sont liés à la recharge des nappes (infiltration des eaux), à la qualité des eaux (chimie) et au pouvoir « tampon » du sol.
- Enfin, on peut également considérer le rôle du sol vis-à-vis de l'atténuation du changement climatique, les indicateurs retenus sont alors liées aux capacités de séquestration (carbone organique), et de régulation du sol via la végétation par exemple.

Le Tableau 6 présente une estimation des effets des procédés sur la structure et le fonctionnement des sols au travers de ces indicateurs via direx d'experts. Cette estimation ne concerne donc que les sols de la zone vadose par rapport aux écosystèmes, aux cycles biogéochimiques et aux usages futurs de sols.

Tableau 6 : Estimation des effets des procédés sur la structure et le fonctionnement des sols au travers d'indicateurs chimiques, biologiques et physiques pour le site 4.

Indicateurs	Categories de SQI	Site 4				
		Sparging / venting	Bio. Anéarobie	ISCO	BPR	Atténuation naturelle monitorée
Chimique	pH	0	0	0	0 ou + (1) ou - (1)	0
	P, K extractible	0	+	0	-	0
	Salinité	0	0	-	0	0
Biologique	Teneur en matière organique	0	+	-	-	0
	Azote potentiellement minéralisable	0	+	0	-	0
Physique	Stabilité des agrégats	0	0	-	-	0
	Compaction des sols	- (2)	0	- (3) ou +(4)	+	0
	Dureté de surface (imperméabilisation de surface)	0	0	0	+	0
	Capacité au champ	0	0	-	+	0

+ : effet positif

0 : effet neutre

- : effet négatif

(1) : dépendement du milieu encaissant et du matériau d'apport

(2) : dans certains cas en présence de sols limoneux

(3) : pour les plantes

(4) : pour les bâtiments

Le tableau 7 présente les indices moyens de qualité des sols (IQS) obtenus pour les différentes techniques. Le calcul de ces indices est basé sur une approche semi-quantitative qui s'appuie sur l'estimation faite dans le tableau 6. Une valeur de 0 de l'indice est attribuée lorsqu'il y a un effet négatif (-), de 5 pour un effet neutre (0) et 10 pour un effet positif (+). Il est alors possible d'établir une hiérarchie entre les techniques en affectant le même poids aux 9 critères de qualité des sols. Le traitement biologique anaérobie peut être considéré comme la technique ayant le plus faible impact sur la qualité des sols.

Tableau 7 : Indice normalisé de la qualité des sols estimé à partir du tableau 5 pour les techniques de traitement des COHV.

Catégorie de IQS	Sparging-venting	ISCO	Bio anaérobie	BPR	Atténuation naturelle monitorée
pH	5	5	5	5	5
P, K extractible	5	5	10	0	5
Salinité	5	0	5	5	5
Teneur en matière organique	5	0	10	0	5
Azote potentiellement minéralisable	5	5	10	0	5
Stabilité des agrégats	5	0	5	0	5
Compaction des sols	0	0	5	10	5
Dureté de surface (imperméabilisation de surface)	5	5	5	10	5
Capacité au champ	5	0	5	10	5
Moyenne	4,44	2,22	6,67	4,44	5,00

2.3.4. Agrégation des résultats à l'aide de l'analyse multicritère

Comparer différentes techniques de dépollution entre elles revient à comparer différentes solutions de gestion pour différents cas d'études. Il existe de nombreux outils d'aide à la décision pour gérer des scénarii « difficilement comparables ». Les principaux outils analytiques d'aide à la décision sont : l'évaluation des risques environnementaux, l'analyse de cycle de vie, l'analyse coût-bénéfice, l'analyse multicritère (AMC), l'analyse multi-attributs (inclus dans l'AMC) (NATO, 2000; CLARINET, 2002).

Ainsi, les méthodes d'analyse multicritère semblent les mieux appropriées à l'aide à la décision dans le cadre des sites et sols pollués. Elles offrent la possibilité d'analyser des flots d'information d'origines diverses (Linkov, 2004 ; Béranger et al., 2006).

Un poids équivalent a été attribué aux trois catégories d'impacts (primaire, secondaire et tertiaires : qualité des sols). Cependant la méthode développée permet une

pondération des différentes catégories d'impacts, libre à l'utilisateur de la méthode, de pondérer les catégories d'impacts en fonctions d'avis d'expert et du contexte de l'évaluation. Les valeurs présentées dans le tableau 8 sont issues des tableaux 2, 3 et 7, elles représentent les indices moyens obtenus pour les trois catégories d'impacts prises en compte dans le projet SOLENV afin d'évaluer les performances environnementales des techniques de dépollution / remédiation.

Les valeurs d'indice obtenues pour l'évaluation des impacts primaires et tertiaires traduisent une amélioration des indicateurs environnementaux (cf. tableau 2 et 7). Ces valeurs sont multipliées par un coefficient 1 dans le calcul de la note globale obtenue dans le tableau 8.

Les valeurs d'indice obtenues pour l'évaluation des impacts secondaires traduisent une dégradation des indicateurs environnementaux (cf. tableau 3). Ces valeurs sont multipliées par un coefficient -1 dans le calcul de la note globale.

Une hiérarchie globale peut alors être établie entre les techniques. La bio-anaérobie avec un vide sanitaire ventilé (4,39) et le sparging-venting (3,74) ont les meilleures performances environnementales dans le cas d'étude.

Tableau 8 : Valeur des indices agrégés pour les différentes techniques évaluées en vue de traiter une pollution aux COHV.

	Sparging-venting	ISCO	Bio anaérobie + vide sanitaire	BPR + vide sanitaire	Atténuation naturelle monitorée + vide sanitaire
Impacts primaires	8,73	10,0	10,0	7,50	7,37
Impacts secondaires	-1,96	-3,05	-3,50	-6,62	-4,37
Impacts sur la qualité des sols⁶	4,44	2,22	6,67	4,44	5,00
Résultat final	3,74	3,06	4,39	1,77	2.67

⁶ L'évaluation de la qualité des sols est basée sur une approche semi-quantitative (cf. § 2.3.3)

2.3.5. Principaux « postes » ayant une forte influence sur le résultat de l'évaluation environnementale.

L'évaluation environnementale des technologies de traitement de sols et des eaux souterraines polluées présentées dans les rapports BRGM/RP -60386-FR et BRGM/RP-60091-FR, a permis de mettre en lumière différents aspects qui ont une influence prépondérante sur les résultats de l'évaluation environnementale pour les différents sites étudiés.

La performance (en termes d'abattement de la pollution) de la technique de traitement combinée à sa durée de mise en œuvre a une forte influence sur les **impacts primaires**.

Ensuite, les **impacts secondaires** sont fortement dépendants :

- de la durée du traitement qui conditionne les consommations d'énergie électrique, les trajets nécessaires à la surveillance et la maintenance du site,
- des quantités de matériaux consommés pour mettre en œuvre la technique de traitement, qui peuvent être importantes et atteindre plusieurs milliers de tonnes. La nature des matériaux consommés influence également fortement le résultat, les bétons armés ont un fort impact par exemple. Cela a également une répercussion sur le « poste » transport, en particulier pour les matériaux pondéreux qu'il faut acheminer sur site,
- des consommations de réactifs *in situ* qui par leur nature, peuvent avoir un impact important sur certaines catégories d'impact, (toxique, écotoxique, eutrophisation...),
- des hypothèses sur les distances parcourues et la fréquence des visites pour la maintenance et la surveillance d'un site, qui peuvent fortement pénaliser, une technique comme par exemple l'atténuation naturelle monitorée pour le traitement d'une pollution aux COHV (Site 4),

Enfin, l'évolution des **impacts tertiaires relatifs à la qualité des sols**, telle qu'elle est définie dans cette étude, est fortement liée au caractère « destructif » des techniques mises en œuvre :

- oxydation de la matière organique,
- déstructuration ou imperméabilisation du sol (creusement de tranchée, confinement) ...

2.4. CONCLUSION

Les travaux réalisés dans le cadre du projet SOLENV ont permis d'évaluer les impacts environnementaux des technologies de traitement des sols et des eaux souterraines pollués. La comparaison des performances environnementales des procédés a été réalisée en intégrant les éléments suivants :

- l'efficacité des différents procédés de traitement relevant de l'évaluation des impacts primaires,
- les impacts secondaires générés par la mise en œuvre des techniques de traitement,
- les impacts tertiaires des techniques sur la qualité des sols via les indicateurs *ad hoc*,
- et les contraintes liées à l'usage futur du site traité et ou à la qualité des eaux souterraines en aval du site traité.

Cependant les résultats de l'évaluation sont très dépendants du contexte et des caractéristiques des cas d'études. Par ailleurs, cette étude n'a pas permis de mettre en évidence l'influence de l'échelle des sites au travers des cas d'études évalués dans SOLENV. Il est probable que la taille du site entraîne une modification de la hiérarchie entre les techniques.

L'évaluation des risques écologiques n'a pas pu être réalisée faute de données disponibles pour réaliser cette évaluation (espèces animales et végétales au droit du site). Cependant, elle doit faire partie intégrante de l'évaluation car elle permet d'évaluer les impacts primaires des techniques sur les écosystèmes.

L'évaluation des impacts tertiaires relatifs à la qualité des sols, ne peut pas être réalisée de manière quantitative car il n'existe pas aujourd'hui de connaissances suffisantes des effets des techniques de dépollution sur la qualité des sols pour que l'on puisse réaliser cette évaluation *a priori*. Cependant, cela peut être fait de manière semi-quantitative ou qualitative sur la base d'avis d'experts. Par ailleurs, il apparaît nécessaire de l'intégrer à l'approche et de recueillir des données basées sur le retour d'expérience.

3. Recommandations pour évaluer des technologies de traitement dans le cadre d'un projet de dépollution

3.1. INTRODUCTION

Cette seconde partie du rapport vise à établir des recommandations pour évaluer les impacts environnementaux des techniques de traitement / remédiation dans le cadre d'un projet de dépollution. La démarche d'évaluation illustrée par la figure 6 est issue des échanges avec le comité scientifique (représentants de la profession UPDS, APESA... et des experts de l'ACV) et des travaux réalisés au cours du projet (BRGM-RP-58683-FR⁷, BRGM-RP-60091-FR⁸, BRGM-RP-60386-FR⁹).

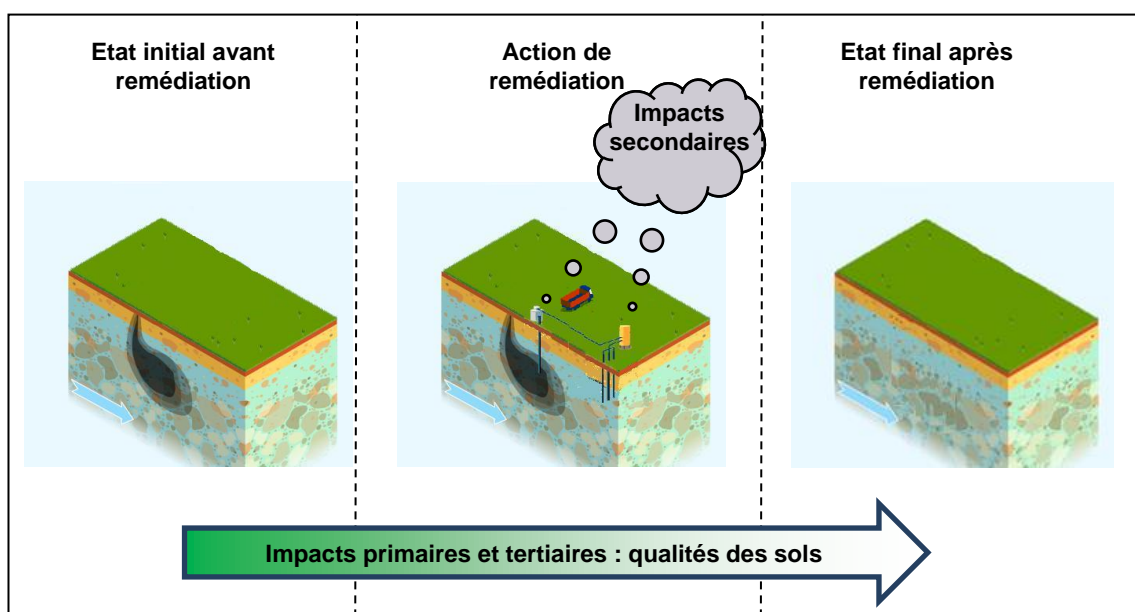


Figure 6 : Illustration des impacts primaires, secondaires et tertiaires.

⁷ Gautier Anne-Lise, Vaxelaire Stéphane, Ménard Yannick (2010) – SOLENV – Evaluation environnementale des technologies de traitement de sols et eaux souterraines pollués, outils d'évaluation environnementale. BRGM/RP-58683-FR, 38 p., 5 illustrations.

⁸ Ménard Y., Vaxelaire S., Colombano S., Coftier A. (2011) – SOLENV – Évaluation environnementale des technologies de traitement de sols et eaux souterraines pollués, évaluation des impacts sur les fonctions des sols. BRGM/RP-60091-FR, 161 p., 19 figures, 14 tableaux, 3 ann.

⁹ Vaxelaire S., Colombano S., et Ménard Y., avec la collaboration de Coftier A. (2011) – SOLENV – Évaluation environnementale des technologies de traitement de sols et eaux souterraines pollués, évaluation des impacts secondaires. BRGM/RP-60386-FR, 194 p., 32 fig., 48 tab., 3 ann.

La démarche proposée s'appuie sur une base commune de comparaison en relation avec l'usage futur du site et la préservation des ressources en eaux. A cet effet, la réduction du risque sanitaire (également incluse dans l'évaluation des impacts primaires) apparaît être une base de comparaison pertinente.

Une démarche méthodologique décrivant le système, les paramètres à prendre en compte et le cadre conceptuel permettant d'évaluer différents impacts est ainsi proposée :

- Les impacts primaires, caractérisant la pollution du sol avant et après la dépollution, sont directement liés à la présence de contaminants dans les sols et/ou les eaux souterraines et aux risques qu'ils engendrent. L'évaluation des impacts primaires vise à évaluer l'effet de la réduction des teneurs en contaminants dans les sols et/ou les eaux souterraines ou l'effet lié à la réduction de l'exposition aux contaminants lors de la mise en œuvre des techniques de dépollution.
- Les impacts secondaires résultant de la mise en œuvre des techniques de dépollution, peuvent être : *i.* directs et associés aux rejets dans les milieux « eau », « air » et « sol » (quantités de CO₂ rejetées à l'atmosphère, consommations énergétiques, rejets de composés contenant de l'azote ou du phosphore...) ou *ii.* indirects résultant par exemple des consommations de matières premières liées à la fabrication des équipements de traitement ou à la production de réactifs de traitement.
- Les impacts tertiaires sur les fonctions et la qualité des sols permettant d'évaluer leur évolution lors de la dépollution. Des indicateurs spécifiques à la caractérisation de la qualité du sol ont été définis pour évaluer cet aspect. L'objectif est d'apprécier les bénéfices de l'utilisation des techniques de dépollution sur la restauration ou la dégradation des fonctions du sol que l'on cherche à préserver en fonction d'un usage ultérieur.

Le public visé par ces recommandations est composé par les acteurs de la gestion des sites et sol pollués (bureau d'études, société de dépollution..), par les collectivités locales, les opérateurs de l'aménagement et les professionnels de l'immobilier.

3.2. PARAMETRES A PRENDRE EN COMPTE, DEFINITION DU SYSTEME

3.2.1. Définition du système

Ce paragraphe a pour objectifs de donner un cadre méthodologique en vue d'évaluer les impacts environnementaux des techniques de remédiation. Il s'agit de formuler des recommandations sur la démarche à adopter et les paramètres à prendre en compte pour évaluer les impacts primaires, secondaires et les impacts tertiaires sur les fonctions et la qualité des sols.

Définition de l'objectif

L'objectif général d'un projet de remédiation est de rendre le site compatible avec son usage futur. L'évaluation environnementale des technologies de traitement via l'évaluation des impacts primaires, secondaires et sur les fonctions et la qualité des sols, se fait en fonction de cet objectif (cf. figure 4).

Cet objectif va permettre de définir le système et les paramètres à prendre en compte pour évaluer les impacts primaires. Un « scénario d'exposition » permet d'identifier les dangers en vue de réaliser une analyse des risques sanitaires et de « poser le problème et les enjeux » (cf. figure 7) en vue de réaliser une analyse des risques écologiques.

Cet objectif permet également de déduire la fonction du système, l'unité fonctionnelle et les flux de références s'y rapportant (au sens de l'ACV) afin d'évaluer les impacts secondaires.

- Fonction du système

Afin d'évaluer les impacts secondaires résultant de la mise en œuvre des techniques de remédiations envisagées de déterminer une ou plusieurs fonctions du système en relation avec l'objectif du cas d'étude évalué. La définition d'une fonction est primordiale car elle permet la comparaison de technologies qui vont rendre un service équivalent. Dans le cadre des sites et sols pollués, le service rendu (fonction du système) correspond généralement à l'élimination d'une pollution ou à son confinement afin de rendre le site pollué ou les eaux souterraines compatibles avec leurs usages futurs.

- Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle correspond à l'unité de référence qui permet de quantifier le service rendu par une technique de remédiation. Une unité fonctionnelle est définie pour comparer les performances des procédés de traitement entre eux. Les entrants et les sortants de chaque procédé sont rapportés à cette unité fonctionnelle pour pouvoir être comparés. Dans le contexte de la dépollution, cela correspond à une unité quantifiable pour laquelle le service de dépollution a été rendu soit 1 m³ de sol traité ou 1 m² de sol recouvert dans cas d'une pollution aux métaux.

- Flux de références

Les flux de références sont propres à chaque technique de remédiation. Ils correspondent à une valeur quantifiée de l'unité fonctionnelle.

Pour chaque technique évaluée, la quantité de polluant que l'on doit éliminer est calculée en fonction des concentrations maximales admissibles (CMA) déterminées sur la base d'Analyses des Risques Résiduels (ARR). En présence de plusieurs contaminants, la CMA la plus pénalisante est prise en compte. Il est alors possible de calculer une quantité de polluant à éliminer (par m³ de sol) pour chacune des techniques évaluées.

$$\text{Flux de référence} = (C_{\text{initiale}} - C_{MA}) \times 1 \text{ m}^3$$

Elle correspondant à la différence entre la concentration initiale en polluant et la concentration maximale admissible dans un volume d'un m³ de sol, La quantité de polluant à éliminer est ainsi définie comme le flux de référence associé à l'unité fonctionnelle.

3.2.2. Principaux paramètres à prendre en compte pour une évaluation environnementale simplifiée

Dans l'optique de réaliser l'évaluation environnementale de différentes techniques de dépollution, certains paramètres apparaissent incontournables au vu des travaux réalisés dans le projet SOLENV. Ces paramètres peuvent également permettre d'appréhender l'impact d'une technique de remédiation dans une approche de « pré-screening ». Les principaux paramètres à suivre lors des travaux de dépollution couramment considérés sont les suivants (Nathanail et *al.*, 2002 ; Müller, 2007 ; Colombano *et al.*, 2010) :

- Procédé destructif ou non (forte influence sur les impacts sur la qualité des sols),
- Type de traitement : on site/*ex situ*/hors site (critères liés au transport : rejets de CO₂),
- Masses résiduelles finales (via notamment les rendements épuratoires) et flux massiques résiduels, (forte influence sur les impacts primaires),
- Consommation énergétique (kW, énergie fossile), consommation de réactifs, (forte influence sur les impacts secondaires),
- Flux massique de rejets atmosphériques, aqueux, solides/déchets (kg /j notamment les Gaz à effet de serre) (forte influence sur les impacts secondaires),
- Durée de mise œuvre de la technique et nécessité d'assurer un suivi du site pendant une longue période (10 ans et plus), (impacts primaires et secondaires),
- Par ailleurs, dans un objectif de développement durable, il est possible d'intégrer à l'évaluation les nuisances sonores et olfactives, ces dernières n'ayant pas un impact sur l'environnement.

Le tableau 9 présente la contribution aux impacts secondaires de quelques opérations et consommations de matière couramment rencontrées lors de projet de dépollution. L'objectif est de donner des ordres de grandeur des contributions aux impacts secondaires de quelques opérations unitaires, ces derniers n'étant généralement pas considérés dans la démarche coût-avantage.

Tableau 9 : Exemple de contribution aux impacts secondaires d'opérations/engins/ouvrages couramment utilisés en traitement des sols.

Catégorie d'impact	Unité	1 hr de fct d'une pelle hydraulique	Transport : 1 t.km	Electricité : 1 kWh	Piézomètre (15 m)
Changement climatique	kg CO ₂ éq.	19,7	0,105	0,105	36,0
Déplétion des ressources en énergie fossile	kg oil éq.	7,01	0,0405	0,0282	19,8
Particules / effets respiratoires inorganiques	kg PM10 éq.	0,018	0,000186	0,000237	0,0445
Acidification terrestre	kg SO ₂ éq.	0,048	0,000429	0,000605	0,100
Toxicité humaine	kg 1,4-DB éq.	2,55	0,0140	0,135	4,34

3.2.3. Paramètres à prendre en compte pour une évaluation environnementale détaillée

Le paragraphe suivant liste les paramètres à prendre en compte pour réaliser une évaluation détaillée des différents impacts.

- **Impacts primaires :**

Les impacts primaires sont évalués à l'aide de l'analyse des risques sanitaires et des risques écologiques, il s'agit donc de définir des schémas conceptuels. Cette étape peut être comparée à la définition du système en AVC.

Il s'agit de réaliser un état des lieux et :

- d'identifier les sources de pollution et les substances ou les matrices complexes de substances,
- de définir les différents milieux de transfert et leurs caractéristiques, ce qui détermine l'étendue des pollutions,
- de définir les enjeux à protéger (cible) : les populations riveraines, les usages des milieux et de l'environnement et les écosystèmes,
- d'identifier les milieux d'exposition, et les ressources naturelles à protéger.

- **Impacts secondaires :**

Les impacts secondaires sont évalués à partir d'inventaire du cycle de vie (ICV). Cet ICV est basé sur un Avant Projet Détaillé de dépollution (APD). Cet APD permet de dimensionner :

- les matériaux utilisés (et les quantités associés),
- les réactifs utilisés,
- les durées de fonctionnement,
- le suivi nécessaire au fonctionnement,
- les temps de traitement,
- les consommations énergétiques et le type d'énergie nécessaire,
- les flux massiques de rejets atmosphériques et gazeux,
- la génération de déchets et leur gestion associée.

Les paramètres ainsi calculés servent de données d'entrées à l'analyse du cycle de vie (ACV) des techniques de dépollution.

- **Impacts sur les fonctions et la qualité des sols**

Le tableau suivant présente la liste des indicateurs retenus pour évaluer les impacts sur la qualité des sols.

Tableau 10 : Liste des indicateurs retenus pour l'évaluation des impacts sur les fonctions de sols

Catégories	Indicateurs*
Physique	Stabilité des agrégats
	Compaction
	Dureté de surface
	Capacité au champ
Biologique	Teneur en matière organique
	Azote potentiellement minéralisable
Chimique	pH
	Phosphore et potassium extractibles
	Teneur en sels

* Les paramètres associés aux indicateurs peuvent être quantifiés via des analyses sur site ou en laboratoire à des coûts abordables.

3.3. ANALYSE DES IMPACTS

Une fois les données nécessaires à l'analyse recueillies il est alors possible de réaliser une évaluation des impacts.

3.3.1. Evaluation des impacts primaires

Les impacts primaires sont directement liés à la présence de contaminants dans les sols et/ou les eaux souterraines et aux risques qu'ils engendrent. L'évaluation des impacts primaires vise à évaluer l'effet de la réduction des teneurs en contaminants dans les sols et/ou les eaux souterraines ou l'effet lié à la réduction de l'exposition aux contaminants lors de la mise en œuvre des techniques de dépollution. Leur évaluation s'appuie sur les démarches d'analyse des risques sanitaires (ARS, cf. figure 6) et des risques écologiques (ARE cf. figure 7), tout en intégrant la durée du traitement envisagée. Cette évaluation fournit un résultat sous la forme d'indice normalisé dont la valeur est comprise entre 0 et 10 ; 10 étant la valeur d'indice attribuée à la technique la plus performante. La première étape des figures représentée en pointillés correspond à l'étape de « définition du système » (cf. § 3.2).

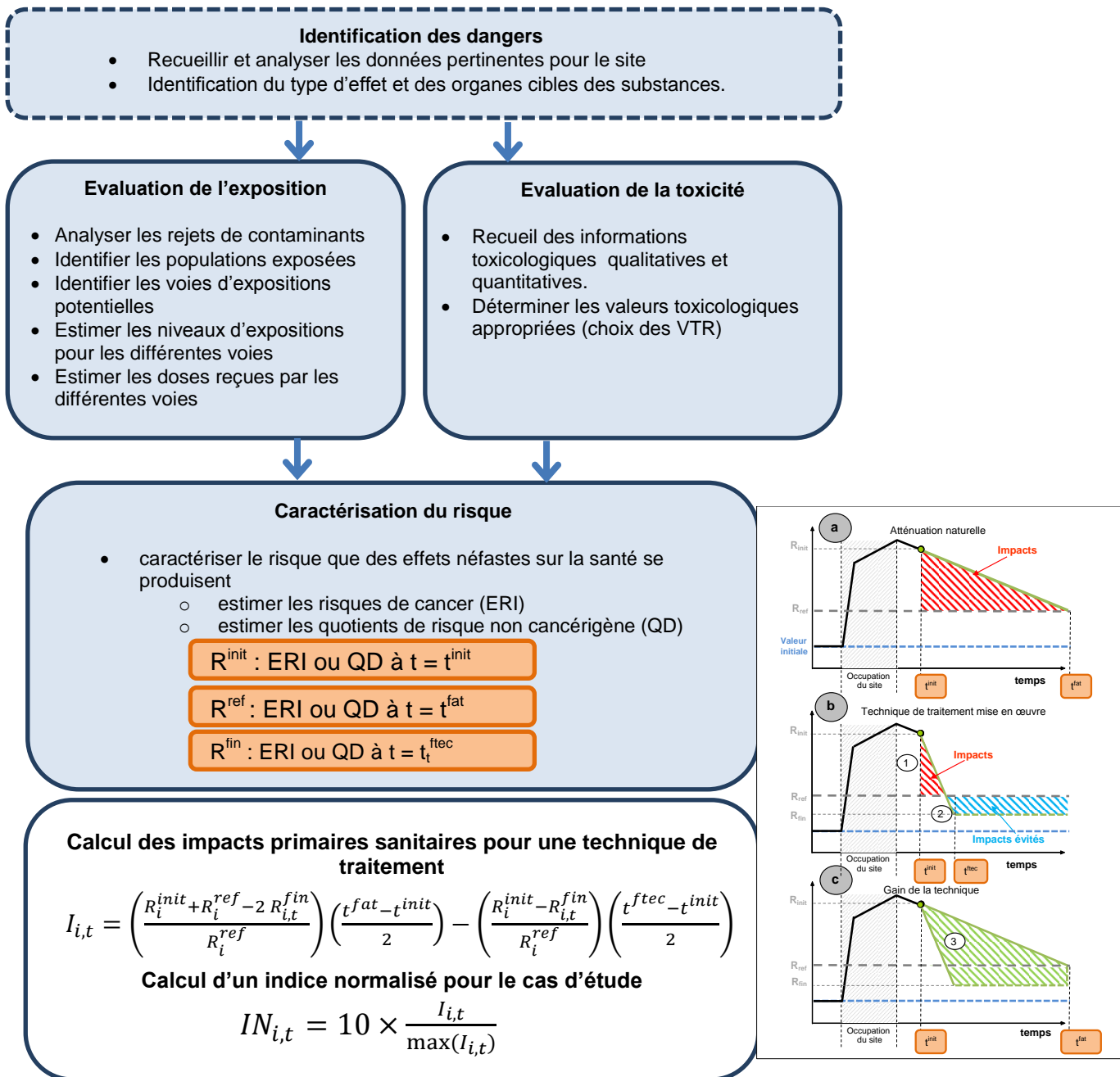


Figure 7 : Schéma méthodologique du calcul d'impacts primaires sanitaires

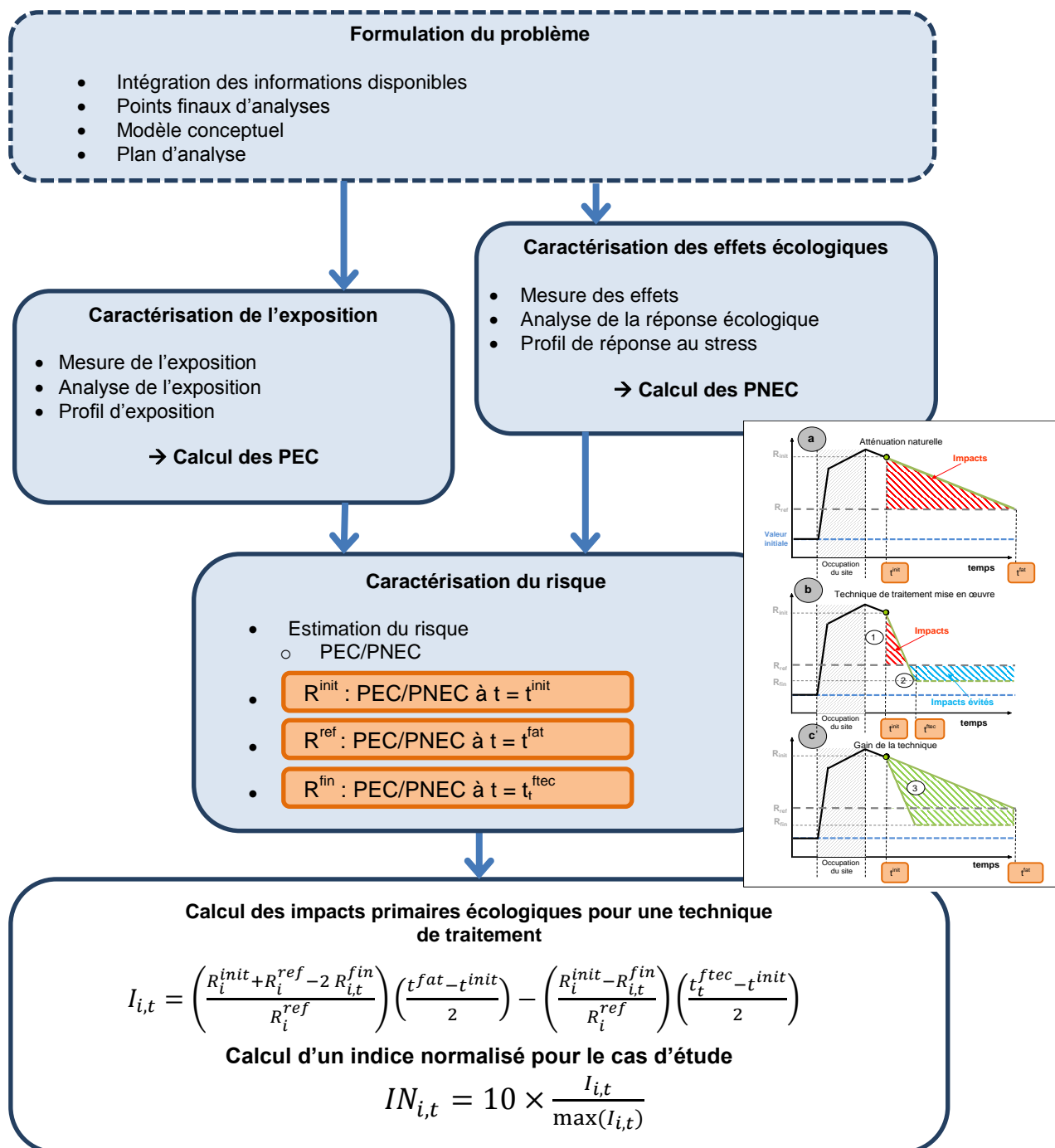


Figure 8 : Schéma méthodologique du calcul d'impacts primaires écologiques

3.3.2. Evaluation des impacts secondaires

Les impacts secondaires résultent de la mise en œuvre des techniques de remédiation. Ces impacts peuvent être directs et associés aux rejets dans les milieux « eau », « air » et « sol » ou indirects. L'évaluation des impacts secondaires se fait selon la démarche de l'analyse du cycle de vie (cf. figure 8). Les deux premières étapes représentées en pointillés correspondent à la définition du système et aux paramètres à prendre en compte tel que cela a été défini au paragraphe 3.2. Une étape de calcul supplémentaire permet de restituer les résultats sous forme d'indice normalisé dont la valeur maximale est de 10 pour la technique générant les impacts les plus importants.

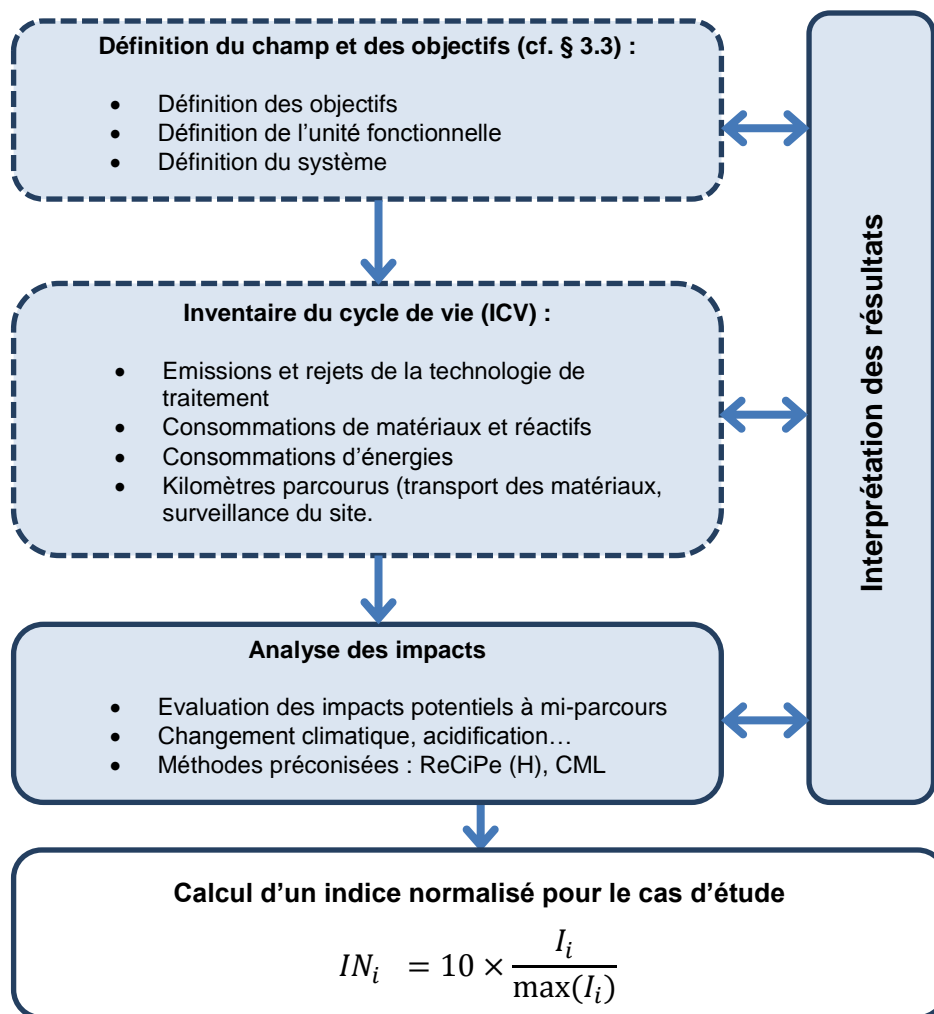


Figure 9 : Schéma méthodologique du calcul des impacts secondaires

3.3.3. Evaluation de la qualité des sols

La méthodologie de calcul de l'impact des technologies de traitement sur la qualité des sols et leur fonctionnement, développée dans le projet SOLENV, est basée sur :

- la sélection d'indicateurs physiques, chimiques et biologiques en fonction des usages ultérieurs envisagés,
- la définition du domaine de variabilité de chacun de ces indicateurs pour un contexte donné. La définition de ce domaine peut s'appuyer sur des données de référence ou des mesures de terrain (échantillonnage et analyse),
- le calage de fonctions de score pour chacun des indicateurs pour transformer les valeurs d'indicateurs en une note comprise entre 0 et 10 quel que soit l'indicateur,
- le suivi de l'impact des techniques de dépollution sur la qualité des sols par échantillonnage et calcul des scores,
- le calcul de l'impact associé à chacun des indicateurs, en intégrant la durée de traitement et le calcul de l'impact global après une étape éventuelle de pondération.

A l'issue de l'étape de sélection des indicateurs, la méthodologie consiste à choisir un état de référence. Ce choix doit permettre de comparer les performances environnementales des différentes solutions de traitement sur la base du nombre d'indicateurs de qualité impactés, de la vitesse de l'étape de relaxation aidée (durée du traitement), du niveau final pour chaque indicateur impacté. Trois états de référence peuvent être utilisés pour comparer les technologies de traitement sur la base de leurs impacts sur le fonctionnement et la structure des sols (cf. Ménard et *al.*, 2011) :

1. A l'issue de la période de relaxation naturelle. Cet état est atteint à l'issue de la période de relaxation naturelle peut être défini grâce aux valeurs de climax écologique.
2. L'état initial, qui précède toute phase de dégradation, et qui peut être défini au moyen des différentes bases de données de qualité des sols. Une revue bibliographique sur ce point particulier est proposée par Ménard et al. 2011.
3. Qui suit l'étape d'occupation industrielle, au moment de la mise en place d'une opération de remédiation. Cet état peut être caractérisé par une série de mesures réalisées directement sur le site pollué, qui porteraient sur les mêmes indicateurs de qualité que ceux utilisés pour évaluer l'influence des techniques de traitement sur les sols.

Dans la pratique, chacun des états de référence peut potentiellement être utilisé en fonction des caractéristiques du site à dépolluer et de la disponibilité des données nécessaires à la caractérisation de sa qualité. Malheureusement, les données relatives aux indicateurs sélectionnés dans cette étude pour caractériser les sols sont le plus souvent absentes des bases de données. Il convient donc de procéder, lorsque cela est possible, à une étape de caractérisation préalable à celle de dépollution. Cette étape préalable peut, dépendamment du site à traiter, aboutir à la caractérisation soit

de l'état pollué en effectuant une série de mesures directement sur site, soit de l'état initial du site avant occupation. Cette dernière caractérisation doit alors être réalisée à proximité du site pollué, dans une zone où le contexte hydrogéochimique est équivalent à celui de la zone polluée mais qui n'est pas concernée par la pollution. La caractérisation de la qualité initiale comme état de référence est bien adaptée au mégasite. Pour des sites pollués peu étendus, situés en zone urbaine ou suburbaine, la caractérisation de l'état pollué post-occupation comme état de référence est mieux adaptée et le plus souvent la seule qui soit accessible.

La définition de l'horizon temporel pour le calcul des impacts est de première importance. En ACV, l'horizon temporel pour l'évaluation des impacts des émissions de gaz à effet de serre est, par convention, fixé à 100 ans car c'est l'horizon auquel il semble raisonnable d'établir les équivalences de pouvoir radiatif entre les différents gaz. Dans le domaine particulier du traitement des sols pour lequel la promotion immobilière est très souvent un driveur important pour la remédiation d'un site pollué, en particulier en zone urbaine et suburbaine, il peut être nécessaire de réduire fortement cet horizon temporel et de le contraindre à la durée maximum souhaitée pour le redéveloppement immobilier du site. Il est à noter que lorsque l'horizon temporel est fixé à 100 ans et plus, c'est essentiellement la valeur finale de l'indicateur de qualité (qualité finale atteinte après dépollution) qui fixe l'impact, que cet impact soit négatif ou positif. En effet, les durées des traitements sont bien inférieures à cet horizon temporel. Pour un horizon temporel de quelques années, l'impact est essentiellement relié à la durée du traitement (vitesse de relaxation aidée) et au niveau de qualité finale, comme illustré sur la Figure 10.

Le calcul d'impacts consiste à intégrer sur la durée considérée, l'évolution normée de chaque IQS selon :

$$I_{ij} = V_j \left(\frac{IQS_{ij}^{fin} - IQS_i^{ref}}{IQS_i^{ref}} \right) \left(t^{inf} - \frac{t_j^{fin} + t^{int}}{2} \right)$$

Où I_{ij} représente l'impact exprimé en $m^3.an$ relatif à l'indicateur IQS_i et la technologie j mise en place sur le volume de sols pollués V_j , t^{inf} représente l'horizon temporel (au moins égal à la durée de traitement la plus longue), t_j^{fin} représente l'instant de fin de remédiation pour la technologie j et t^{int} représente l'instant de la mise en fonctionnement de la solution de remédiation (peut être pris égal à 0, définissant ainsi la référence temporelle du traitement). L'impact pondéré sur les fonctions des sols IFS est ensuite calculé selon :

$$IFS = \frac{1}{LM} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M \beta_{ij} I_{ij}$$

Où L représente le nombre total d'indicateurs de qualité des sols pris en compte et M le nombre de technologies mises en place sur un site pollué et β_{ij} et le poids de chaque impact I_{ij} .

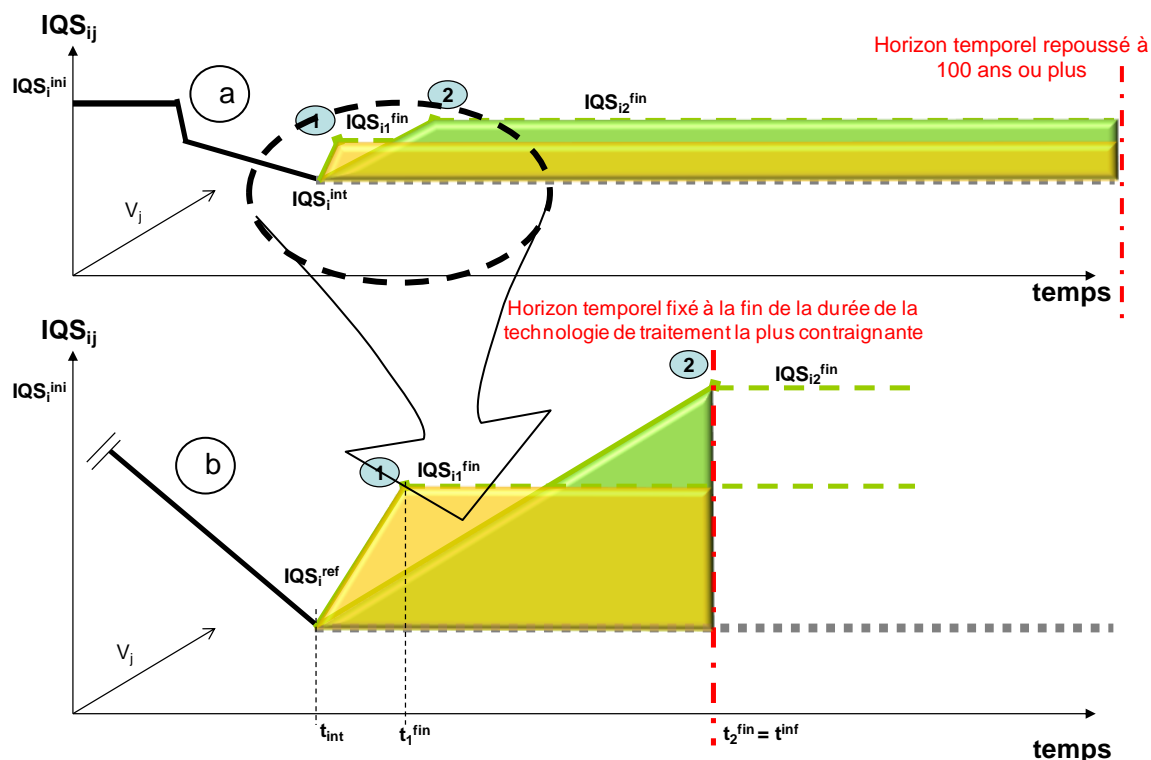


Figure 10 : Choix de l'horizon temporel pour le calcul d'impacts sur le fonctionnement et la structure des sols. (a) horizon temporel fixé à 100 ans, (b) horizon temporel = fin de la période de traitement la plus longue

Chaque indicateur de qualité des sols est ensuite normé (entre 0 et 10) au moyen de fonctions de score dont les profils et la mise en œuvre pratique sont explicités dans Ménard et al., 2011.

Le schéma méthodologique général de calcul des impacts des technologies de traitement sur la qualité des sols est fourni sur la figure 10. Ce schéma comprend 4 étapes successives principales :

1. sélection des indicateurs en fonction du contexte, de la (des) technologie(s) qui peuvent être mises en place et des usages ultérieurs envisagés pour le site,
2. évaluation de l'état de référence (valeurs de référence pour chacun des indicateurs sélectionnés) comprenant une phase d'échantillonnage et de mesure de terrain,
3. suivi de dépollution et après achèvement des opérations de dépollution, réalisation d'un ou plusieurs échantillonnages et réalisation des mêmes types de mesure que pour la détermination de l'état de référence. Calcul du score associé à chacun des indicateurs,
4. calcul de l'impact intégrant le(s) volume(s) de sol traité(s) au moyen d'une ou plusieurs technologies.

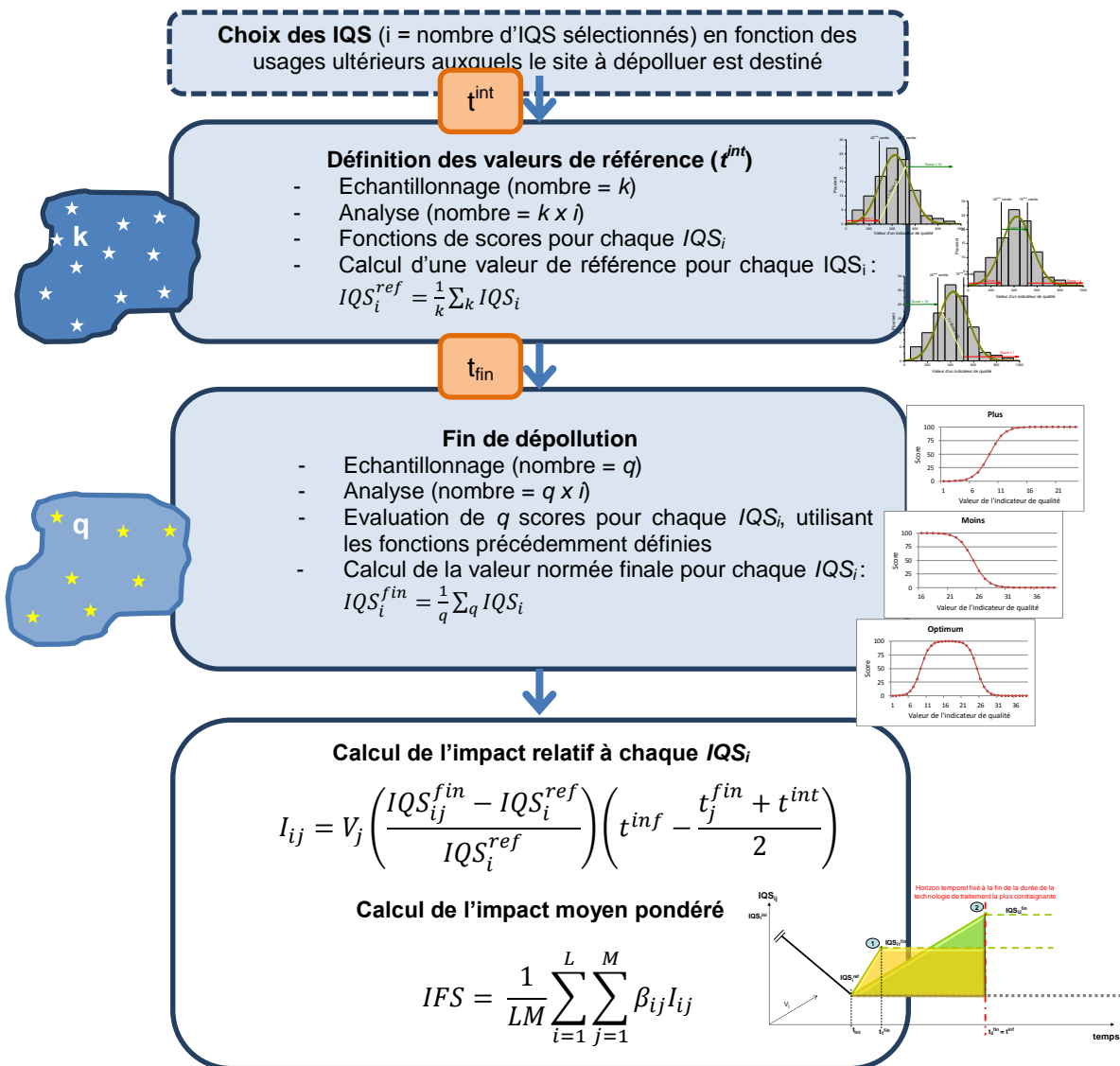


Figure 11 : Schéma méthodologique du calcul d'impacts sur la qualité et la structure des sols

Un travail d'agrégation des impacts en un impact moyen éventuellement pondéré peut faire suite à ces étapes. Cette agrégation n'est cependant nullement nécessaire. Une lecture dissociée des impacts par indicateur peut, à l'opposé d'une note globale, permettre de gagner en lisibilité et d'identifier quelles sont les pressions les plus importantes exercées par une technologie de traitement sur le compartiment sol.

3.3.4. Hiérarchisation des technologies à l'aide de l'AMC

La finalité du projet SOLENV est de proposer une méthode de hiérarchisation de technologies de traitement des sols et eaux souterraines polluées en prenant en compte les différentes catégories d'impacts évaluées précédemment. Afin d'atteindre cet objectif nous recommandons d'agréger les résultats à l'aide de l'analyse multicritères (AMC).

Dans ce cadre nous proposons d'affecter un poids équivalent aux trois catégories d'impacts :

- 1 pour la somme des impacts primaires,
- -1 pour la somme des impacts secondaires,
- 1 pour la somme des impacts sur les fonctions et la qualité des sols.

Une valeur négative est affectée aux impacts secondaires car ils sont générés par la mise œuvre de l'action de dépollution, contrairement aux impacts primaires où il s'agit d'abaisser un niveau de pollution. Quant aux impacts sur les fonctions et la qualité des sols, les indices sont calculés de telle sorte que la valeur supérieure de l'indice traduise le meilleur état de qualité du sol pour l'indicateur (cf. figure 10).

Le poids affecté à chaque sous-catégorie d'impact vaut $1/n$, n étant égale au nombre de sous-catégories d'impacts, par exemple $n=9$ pour les indicateurs de qualités des sols (cf. tableau 4) si l'ensemble des indicateurs est retenu en fonction de l'usage futur du sol.

3.3.5. Schéma de synthèse de la démarche d'évaluation environnementale

La figure 12 montre une proposition d'intégration de la démarche méthodologique d'évaluation des impacts environnementaux avec l'interprétation de l'état des milieux (IEM) et le plan de gestion (PG).

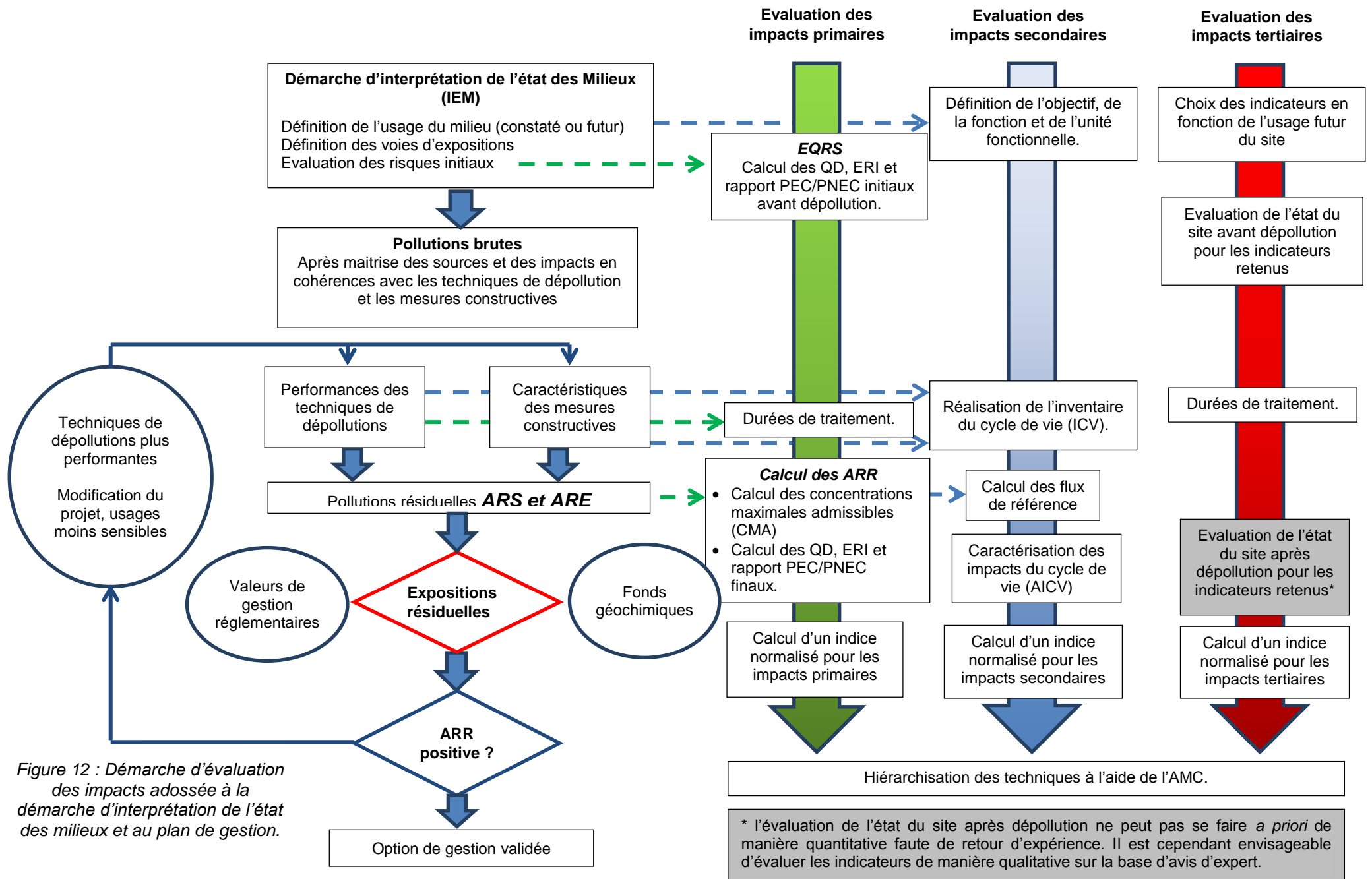


Figure 12 : Démarche d'évaluation des impacts adossée à la démarche d'interprétation de l'état des milieux et au plan de gestion.

4. Conclusion

Le projet SOLENV avait pour objectif de proposer une méthode d'évaluation environnementale des technologies de traitement des sols et des eaux souterraines pollués, intégrant le gain de restauration associé à l'action de dépollution (impacts primaires), les pressions sur l'environnement résultant de la mise en œuvre des techniques de dépollution (impacts secondaires) et les impacts sur les fonctions du sol (dégradation ou restauration de son état – impacts tertiaires) en fonction des types d'usages ultérieurs (agriculture, habitat, ...).

La synthèse présentée dans ce rapport donne une vision de ce qu'il est aujourd'hui possible de faire pour évaluer les impacts des technologies de traitements des sols et des eaux souterraines polluées. La démarche proposée, bien que pointue, se veut proche du cheminement du plan de gestion. Ainsi, l'évaluation des impacts primaires se fait sur la base d'une Analyse des Risques Résiduels (ARR) complétée par une analyse des risques écologiques. L'évaluation des impacts secondaires peut être déduite de l'Avant Projet Détaillé des travaux de dépollution (APD). Enfin, l'évaluation des indicateurs de qualité des sols, même si elle ne peut se faire quantitativement *a priori*, requerrait un faible investissement car les paramètres à quantifier en vue d'évaluer les technologies de traitement sont, pour certains, déjà mesurés pour mettre en œuvre les dites technologies.

Il est possible de faire une évaluation fine des impacts primaires et secondaires en intégrant la durée de traitement dans l'évaluation. La méthodologie proposée permet également de prendre en compte les impacts sur les fonctions des sols, mais il apparaît difficile d'intégrer ces impacts dans une étude *a priori* mais faute d'une base de données exploitable pour évaluer les effets d'une action de remédiation sur les indicateurs de qualité des sols. Les impacts sur la qualité des sols pourront être pris en compte si un travail d'acquisition et de bancarisation des données vient à être mis en place, à l'image de ce qui peut être fait par ailleurs (BASE RMQS / programme bio-indicateur...). Ceci fournirait, pour chaque technologie et chaque contexte, une évolution de la qualité des sols basée sur une évaluation des indicateurs sélectionnés dans SOLENV.

Ces travaux ont également mis en évidence un manque de connaissances en vue d'aboutir à une méthode d'évaluation des impacts unique permettant d'évaluer les impacts primaires, secondaires et les impacts sur les fonctions et la qualité des sols. Il n'existe pas à ce jour de méthode d'analyse « reconnue » permettant d'établir une relation quantifiée entre les indicateurs de la qualité des sols et les fonctions et services du sol (érosion, cycle de l'eau, pouvoir épurateur du sol, cycle du carbone et de l'azote...). Il apparaît intéressant de pouvoir exprimer dans les mêmes unités les contributions de ces impacts sur les domaines de protection de l'environnement : santé humaine, qualité des écosystèmes et préservation des ressources. La monétarisation des impacts qu'ils soient primaires, secondaires ou sur la qualité des sols, semble également être une voie intéressante à explorer en vue de proposer un score unique et

afin de pouvoir comparer le coût (ou bénéfice) liés aux externalités des impacts environnementaux et le coût des technologies mises en œuvre.

Par ailleurs, il serait également intéressant de mener des études complémentaires afin d'évaluer les effets d'échelle sur la hiérarchisation environnementale des techniques et d'évaluer d'autres techniques. Les techniques d'extraction soutenues par chauffage convectif, radiatif ou conducteur, n'ont pas été évaluées dans l'étude, au vu des tendances observées (facteur temps), laissent à penser qu'elles auraient un impact environnemental moindre que celui de techniques comparables non soutenues (cf. Müller D., 2007). Il serait également intéressant d'évaluer l'impact de ces techniques sur les fonctions du sol, ce qui n'a pas été pris en compte par Müller D. (2007) dans son étude.

La méthodologie développée dans le projet SOLENV mérite d'être appliquée sur un ou plusieurs cas concrets à l'échelle d'un site pollué en zone urbaine (petite taille a forte pression immobilière) et d'un site de plus grande taille (mégasite éventuellement) afin d'évaluer la pertinence de l'approche sur des cas concrets et différenciés tant du point de vue du choix de l'état de référence que de l'horizon temporel à considérer (du point de vue des impacts sur les fonctions de sols).

Enfin, il apparaît également nécessaire de fournir aux professionnels des outils permettant de réaliser une meilleure évaluation environnementale des techniques de traitement soit à l'aide d'abaques permettant de relier directement la taille des opérations unitaires à mettre en œuvre sur site et les impacts qui leur seraient associés, soit par le développement d'un outil de quantification des impacts primaires, secondaires et sur les fonctions des sols à l'image de ce que propose, de manière sommaire, l'US EPA via l'outil SRT¹⁰.

¹⁰ Sustainable Remediation Tool : <http://www.gsi-net.com/software.asp>

5. Bibliographie

Béranger, S., Blanchard, F., Archambault, A., Allier, D. (2006) - Utilisation des Outils d'Aide à la Décision dans la Gestion des Mégasites, Rapport brgm RC/RP-55223-FR, 101 p.

CLARINET (2002) - Review of Decision Support Tools for Contaminated Land Management, and their Use in Europe, Novembre 2002, 116 p.

Colombano S., Menard Y., Villeneuve J., Gauthier A.L., Vaxelaire S., (2010) - Plan de Gestion et intégration des critères environnementaux dans le bilan coûts-avantages. [Journée d'échanges UPDS/ADEME - Sites et sols pollués : réhabilitons durable, Paris, France, 09 juin 2010.](#)

EEB Commission européenne (2008) L'économie des écosystèmes et de la biodiversité. ISBN-13 978-92-79-09445-3.

EURODEMO (European Coordination Action for Demonstration of Efficient Soil and Groundwater Remedation) - D4-2 2007 - Colombano S. et Gaboriau H. (2007) - Eurodemo Thematic Workshop « Protocols and Guidance for Best Practice in Decision-Making », Rapport final, Rapport public, 24 p.

Linkov, I., Varghese, A., Jamil, S., Seager, T.P., Kiker, G., Bridges, T. (2004) : Multi-criteria decision analysis : a framework for structuring remedial decisions at contaminated sites, Comparative Risk Assessment and Environmental Decision Making, Kluwer, p. 15-54.

MEDD (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable) (2007) – Annexe 2 : Comment identifier un site (potentiellement) pollué / Comment gérer un problème de site pollué / Modalité de gestion et de réaménagement des sites pollués, 53 p.

Ménard Y., Vaxelaire S., Colombano S., Coftier A. (2011) – SOLENV – Évaluation environnementale des technologies de traitement de sols et eaux souterraines pollués, évaluation des impacts sur les fonctions des sols. BRGM/RP-60091-FR, 161 p., 19 figures, 14 tableaux, 3 ann.

Millennium Ecosystem Assessment (2005) Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis. World Resources Institute, Washington, DC.

Millennium Ecosystem Assessment (2005) Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC.

Müller D. (2007) - Land Remediation and Eco-Efficiency, EURODEMO (European Coordination Action for Demonstration of Efficient Soil and Groundwater Remedation) - Eurodemo Thematic Workshop, Vienne, Autriche, 6 et 7 Novembre 2007.

Nathanail J., Bardos P. et Nathanail P. (2002) - Contaminated Land Management. Land Quality Press and EPP Publications, Londres, 467 p.

NATO/CCMS Pilot Study (2000) - Evaluation of demonstrated and emerging technologies for the treatment of contaminated land and groundwater (Phase III). Special Session on Decision Support Tools. Wiesbaden, June 26-30, 2000.

Schindelbeck, R. R., Van Es, H. M., Abawi, G. S., Wolfe, D. W., Whitlow, T. L., Gugino, B. K., Idowu, O. J., Moebius-Clune, B. N. (2008) *Comprehensive assessment of soil quality for landscape and urban management*. Landscape and Urban Planning, vol ; 88, pp. 73–80

Vaxelaire S., Colombano S., et Ménard Y., avec la collaboration de Cofrier A. (2011) – SOLENV – Évaluation environnementale des technologies de traitement de sols et eaux souterraines pollués, évaluation des impacts secondaires. BRGM/RP-60386-FR, 194 p., 31 fig., 46 tab., 2 ann.



Centre scientifique et technique
Service EPI/DMP
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34