



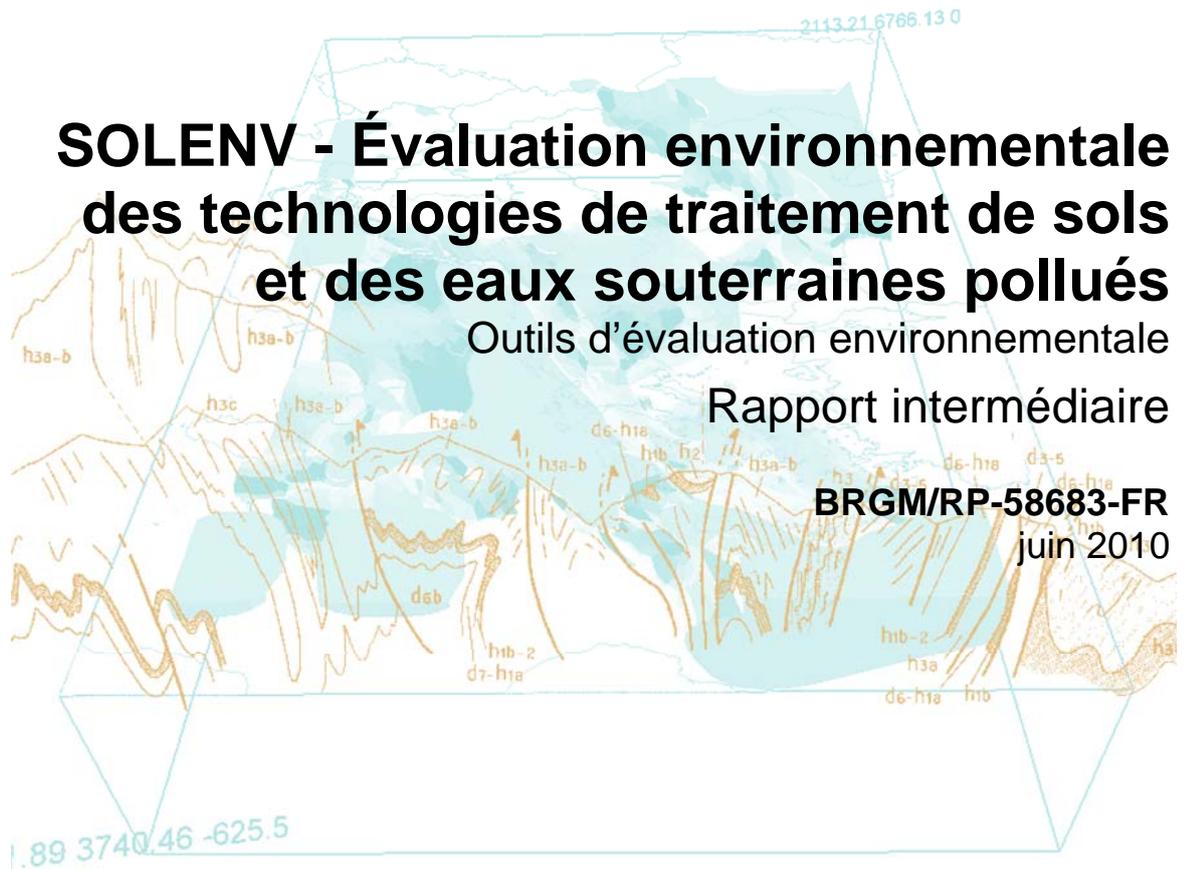
# SOLENV - Évaluation environnementale des technologies de traitement de sols et des eaux souterraines pollués

Outils d'évaluation environnementale

Rapport intermédiaire

BRGM/RP-58683-FR

juin 2010



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**



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

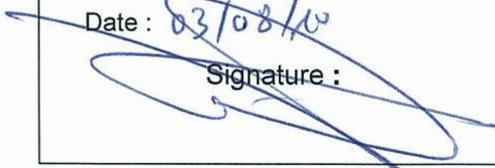
Outils d'évaluation environnementale

Rapport intermédiaire

**BRGM/RP-58683-FR**  
juin 2010

A. L. Gautier, S. Vaxelaire et Y. Menard

**Vérificateur :**  
Nom : MERLY Grinne  
Date : 23/07/2010  
Signature : 

**Approbateur :**  
Nom : Roy. S  
Date : 03/08/10  
Signature : 

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,  
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.  
Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

**Mots-clés** : Évaluation environnementale, Dépollution, Sols et eaux souterraines, Technologies de traitement, Outils d'aide à la décision.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Gautier A.-L., Vaxelaire S. et Ménard Y.** (2010) – SOLENV – Évaluation environnementale des technologies de traitement de sols et eaux souterraines pollués, outils d'évaluation environnementale. BRGM/RP-58683-FR, 36 p., 5 ill.

## Synthèse

Les politiques en matière de réhabilitation des sites et sols pollués ont le plus souvent pour objectif de minimiser des risques à l'échelle des sites et ne considèrent que trop rarement les risques globaux encourus à des échelles géographiques et temporelles plus étendues. De façon à mettre en œuvre des technologies de traitement intégrant les spécificités des sites pollués et visant à protéger la santé humaine et les écosystèmes, il est nécessaire 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.

Le projet SOLENV porte sur l'évaluation de l'impact environnemental de la mise en œuvre de technologies de traitement des sites pollués. 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.

SOLENV a pour objectif d'élaborer une méthode de sélection de technologies de traitement des sites pollués sur la base 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 premier rapport intègre un état de l'art sur les outils et les techniques d'évaluation environnementale, visant à déterminer les limites de chaque méthodologie et à identifier la ou les méthodologies les mieux adaptées à l'évaluation des impacts environnementaux liés à l'évolution de l'état du sol au cours du traitement ou au fonctionnement des procédés de traitement. Ce travail correspond à la tâche 1 du projet.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette première tâche se sont intéressés à quatre outils d'évaluation environnementale : l'analyse de cycle de vie (ACV), l'analyse des risques environnementaux (ARE), l'analyse multicritère (AMC) et l'analyse coûts-bénéfices (ACB).

Une étude comparative a permis de mettre en évidence les atouts et les limites de chacun de ces outils dans le cadre d'une aide à la décision pour des projets de dépollution, et notamment pour le choix de techniques de dépollution. Les résultats obtenus conduisent à retenir l'ACV et l'ARE comme outils d'évaluation environnementale pour répondre aux objectifs poursuivis par le projet SOLENV. Des pistes de développement intéressantes ont pu être identifiées, en vue notamment de combiner ces deux outils.

Ces travaux permettent de dresser une feuille de route pour la suite du projet, reposant sur l'identification de trois types d'impacts liés à un projet de dépollution et sur l'utilisation d'une combinaison d'outils d'évaluation environnementale spécifiques comme décrit ci-après :

- des impacts « primaires », liés aux effets de la pollution. Ces impacts seront évalués par le biais de l'ARE ;
- des impacts « secondaires », liés à la mise en œuvre des techniques de dépollution. Ces impacts seront évalués grâce à l'ACV ;
- l'évolution de 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 seront nécessaires pour évaluer cet aspect.

La suite des travaux menés dans le projet SOLENV visera notamment à approfondir et développer ces trois types d'outils d'évaluation environnementale de manière à caractériser au mieux ces différents aspects de l'impact environnemental d'un projet de dépollution.

## Overview

Government policies aimed at minimizing risk at contaminated sites usually focus on minimizing risk at the site itself, and seldom consider total risk in a broad geographical and temporal context. However, remediation activities have inherent burdens and risks that merit consideration. To fully protect human and ecological health, one should consider whether remediation activities may clean the contaminated site and reduce risk in the immediate geographical location while increasing risk on a larger scale and over a longer time.

SOLENV project deals with the environmental impact assessment of the implementation of remediation technologies. This research project is supported by the ADEME and falls under the contaminated land field of research. It is funded by the ADEME and the BRGM since June 2009 and runs for a duration of 2 years.

SOLENV aims at developing a methodology on selection of soils treatment techniques based on the environmental impacts they may generate. These impacts are taken into account according to site specific characteristics and include the direct impacts of the technology implementation as well as an estimation of restoration gains for soils functions. The general objective of the project is thus to link the soil state or quality and the environmental impacts on soils during remediation operations.

This first report provides a state of the art on available tools and techniques dedicated to the environmental assessment. It aims at determining the boundaries of each methodology and at identifying the methodologies which are the most suited to assess the environmental impacts associated with the change in soil conditions caused by the remediation or with the operation of treatment process itself. This work corresponds to SOLENV task 1.

The work performed in this first task focused on four environmental assessment tools: Life cycle assessment (LCA), EcoRA (Ecological Risk Assessment), MCA (Multi-criteria Analysis) and Cost Benefit Analysis (CBA).

A comparative study enabled to highlight assets and limits of each of these tools in the context of decision making process used in remediation projects and particularly for the selection of treatment options. LCA and EcoRA have been selected as environmental assessment tools the most suited to reach SOLENV goals. Interesting future developments of these two tools, such as their combination were identified.

The results of task 1 enabled to draft a road map for SOLENV future development. This roadmap is based on the identification of three types of impacts associated with the implementation of a treatment option and on the combination of environmental assessment tools dedicated to each of these impacts. Thus, a remediation project can be characterized through the following aspects:

- Primary impacts associated with the presence of one or more pollutants in the soil. These impacts will be assessed using EcoRA methodology;
- Secondary impacts, associated with the treatment process operation. These impacts will be assessed by the means of LCA methodology;
- The evolution of soil quality caused by remediation. Specific soil quality indicators will be developed to assess this evolution i.e. to compare the final state of soil (post remediation) with its initial state (prior remediation).

The next phase of work to be performed in SOLENV will aim, among others, at improving and developing these environmental assessment tools in order to characterise as best as possible all the parameters used in the environmental assessment of the remediation project.

## Sommaire

<b>1. Position du problème : les enjeux de la dépollution</b> .....	7
<b>2. L'analyse de cycle de vie (ACV) pour l'évaluation environnementale de projets de dépollution</b> .....	11
2.1. L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE : CHAMP, OBJECTIFS ET MODALITÉS.....	11
2.1.1. Objectif de l'analyse de cycle de vie (ACV) .....	11
2.1.2. Application de l'ACV .....	11
2.1.3. Méthodologie de l'ACV : fait l'objet d'une norme ISO (14040) .....	12
2.2. APPLICATION DE L'ACV À L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE PROJETS DE DEPOLLUTION .....	13
2.2.1. Objectifs des ACV appliquées à la dépollution des sols.....	13
2.2.2. Prise en compte du sol avant et après la dépollution .....	14
2.2.3. Fonction, unité fonctionnelle, flux de référence .....	14
2.2.4. Catégories d'impacts pris en compte .....	15
2.3. LIMITES ET ATOUTS DE L'ACV POUR L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE PROJETS DE DÉPOLLUTION.....	15
<b>3. L'analyse des risques environnementaux (ARE) pour l'évaluation environnementale de projets de dépollution</b> .....	17
3.1. L'ANALYSE DES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX .....	17
3.1.1. Champ d'application .....	17
3.1.2. Méthodologie de l'ARE .....	17
3.2. APPLICATION DE L'ARE À L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE PROJETS DE DÉPOLLUTION .....	19
3.3. LIMITES ET ATOUTS DE L'ARE POUR L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE PROJETS DE DÉPOLLUTION.....	19
<b>4. L'analyse multicritères (AMC) et l'analyse coûts-bénéfices (ACB) pour l'évaluation environnementale de projets de dépollution</b> .....	21
4.1. L'ANALYSE MULTICRITÈRES (AMC) POUR L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES PROJETS DE DÉPOLLUTION .....	21
4.1.1. L'analyse multicritères (AMC) : champ, objectifs et modalités d'application.....	21

4.1.2. Application de l'AMC à l'évaluation environnementale de projets de dépollution. Limites et atouts.....	22
<b>4.2. L'ANALYSE COÛTS-BÉNÉFICES (ACB) POUR L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE PROJETS DE DÉPOLLUTION .....</b>	<b>23</b>
4.2.1. L'analyse coûts-bénéfices (ACB) : champ, objectifs et modalités d'application .....	23
4.2.2. Application de l'ACB à l'évaluation environnementale de projets de dépollution. Limites et atouts.....	24
<b>5. Perspectives : feuille de route pour la réalisation d'un bilan environnemental global de projets de dépollution .....</b>	<b>27</b>
<b>6. Conclusion.....</b>	<b>33</b>
<b>7. Bibliographie .....</b>	<b>35</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 : Phases d'une ACV. ....	12
Illustration 2 : Cadre méthodologique de l'ARE (US EPA, 1998). ....	18
Illustration 3 : Catégories d'impacts retenues par l'ACV et l'ARE pour l'évaluation environnementale. ....	28
Illustration 4 : 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. ....	30
Illustration 5 : Diagramme radar des indicateurs des résultats de l'ARE, de l'ACV et des indicateurs dédiés aux fonctions des sols. ....	31

# 1. Position du problème : les enjeux de la dépollution

Le projet SOLENV porte sur l'évaluation de l'impact environnemental de la mise en œuvre de technologies de traitement des sites pollués.

SOLENV a pour objectif d'élaborer une méthode de sélection de technologies de traitement des sites pollués sur la base 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 ».

Le programme technique du projet est divisé en quatre phases :

- une phase d'état de l'art sur les outils et techniques d'évaluation environnementale, visant à déterminer les limites de chaque méthodologie et à identifier la ou les méthodologies les mieux adaptées à l'évaluation des impacts environnementaux liés à l'évolution de l'état du sol au cours du traitement ou au fonctionnement des procédés de traitement. (tâche 1) ;
- une évaluation des impacts générés par les technologies de remédiation. Pour chaque technologie, une liste des pressions et des impacts directs sur les milieux « eau » et « air » sera fournie (par exemple, quantité de CO<sub>2</sub> rejetée à l'atmosphère, consommation énergétique, rejets de composés contenant de l'azote ou du phosphore...) et les impacts indirects (consommation des matières premières liée à la fabrication des équipements de traitement ou à la production de réactifs de traitement par exemple) seront évalués. (tâche 2) ;
- une phase d'étude du milieu sol reposant sur la définition d'un référentiel de qualité et visant à relier les fonctions des sols et les impacts des technologies de traitement sur celles-ci. 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 (tâche 3) ;
- une phase de synthèse des résultats et de construction d'un guide d'évaluation environnementale des technologies de traitement de sols (tâche 4).

Ce rapport présente la première étape (résultats de la tâche 1) des travaux menés par le BRGM dans le cadre du projet SOLENV. Il porte sur les outils d'évaluation environnementale disponibles pour l'évaluation de l'impact des technologies de traitement des sols pollués.

Les questions suivantes ont été examinées :

- Quel bilan environnemental global présentent les techniques de dépollution ?

- Quel est l'impact d'une technique de dépollution sur un sol en tant qu'écosystème, *i.e.* caractérisé par des fonctions et un bon état écologique ?
- Quels sont les méthodes et outils existants pour évaluer les impacts globaux d'un projet de dépollution ? Quelles évolutions et perspectives peut-on proposer pour ces méthodes et outils ?
- Comment apporter des informations d'évaluation environnementale utiles à la prise de décision pour le choix d'une technique de dépollution dans un contexte donné, en fonction des enjeux environnementaux propres à ce contexte ?

Établir le bilan environnemental global d'une technique ou d'un projet de dépollution suppose d'identifier au préalable l'ensemble des enjeux environnementaux et sanitaires qui concernent cette technique ou ce projet. Ces enjeux doivent à la fois tenir compte des grands enjeux globaux actuels (par exemple le changement climatique) et des enjeux propres au contexte local (vulnérabilité et exposition de la population et des milieux à la contamination par exemple). Il est possible de définir des enjeux génériques pour les projets de dépollution, mais il est également pertinent, pour chaque projet étudié, d'adapter ces enjeux au contexte.

L'identification des enjeux, réalisée en début de projet et en impliquant l'ensemble des acteurs impliqués dans le projet, permettra d'en faire émerger une vision globale partagée. L'évaluation environnementale du projet de dépollution devra ensuite se référer à ces enjeux.

Dans le cadre du projet SOLENV, nous proposons de considérer trois enjeux « moteurs » pouvant être à l'origine d'un projet de dépollution :

- la protection de la santé et la maîtrise des risques écologiques et des risques par rapport aux eaux souterraines ;
- le développement économique (en particulier local) et la pression foncière ;
- la maîtrise des perturbations causées par des changements globaux. Celui-ci désigne l'ensemble des perturbations affectant les grands cycles biogéochimiques terrestres et donc la plupart des problèmes liés aux atteintes à l'environnement (déplétion des ressources naturelles, changement climatique, atteintes aux écosystèmes et à la biodiversité, etc.).

Dans la pratique, ces trois grands enjeux peuvent mener à la décision de réaliser un projet de dépollution afin de :

- éliminer les risques inacceptables ;
- réhabiliter une zone (projet de reconversion) ;
- améliorer l'état des milieux.

Au-delà de ces motivations premières, tout projet de dépollution sera également soumis aux enjeux environnementaux transversaux suivants :

- la préservation des ressources en énergies fossiles, via les économies d'énergies et le recours aux énergies renouvelables ;

- la réduction des facteurs influençant le changement climatique, via la réduction des émissions de gaz à effet de serre ;
- la préservation des ressources en eau douce (en termes de qualité et de quantité), via la réduction des émissions vers les milieux aquatiques et la réduction de la consommation d'eau ;
- la préservation de la biodiversité, via la réduction des émissions polluantes et des atteintes physiques aux écosystèmes ;
- la préservation de l'intégrité des écosystèmes et des ressources naturelles (hors eau et énergies fossiles), via les économies de consommation de ressources naturelles et la réduction des atteintes physiques aux écosystèmes.



## 2. L'analyse de cycle de vie (ACV) pour l'évaluation environnementale de projets de dépollution

### 2.1. L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE : CHAMP, OBJECTIFS ET MODALITÉS

#### 2.1.1. Objectif de l'analyse de cycle de vie (ACV)

L'analyse de cycle de vie est un outil qui a pour objectif d'évaluer les performances environnementales d'un procédé et/ou d'un produit en intégrant toutes les étapes de son cycle de vie de l'extraction des ressources naturelles, en passant par la conception et l'usage du produit jusqu'à sa fin de vie.

Historiquement l'analyse de cycle de vie a été développée dans le but de comparer des produits entre eux du point de vue de leurs performances environnementales et ce quel que soit leur lieu de fabrication.

Cet outil trouve aujourd'hui des applications de plus en plus variées, notamment en tant qu'outil d'aide à la décision pour les plans de gestion de déchets, le domaine du transport, etc.

L'analyse de cycle de vie a également été appliquée à la gestion de sites pollués depuis la fin des années 90 (Volkwein *et al.*, 1999 ; Diamond *et al.*, 1999).

#### 2.1.2. Application de l'ACV

Actuellement, l'analyse de cycle de vie est un outil employé pour de nombreuses applications :

- outil d'aide à la décision dans le cadre de politiques ou de plan ;
- comparaison de procédés et/ou de produits « équivalents » ;
- identification des possibilités d'améliorations des performances environnementales ;
- définir des indicateurs de performances environnementales pertinents.

Les différentes applications de l'ACV montrent à quel point cet outil présente un intérêt pour réaliser l'évaluation environnementale d'un projet de dépollution. En effet, il permet non seulement de comparer des technologies de dépollution entre elles, mais également d'évaluer la pertinence environnementale d'un projet de dépollution ainsi que de calculer des indicateurs de performances environnementales.

### 2.1.3. Méthodologie de l'ACV : fait l'objet d'une norme ISO (14040)

L'analyse de cycle de vie peut être divisée en 4 grandes phases (cf. Illustration 1).

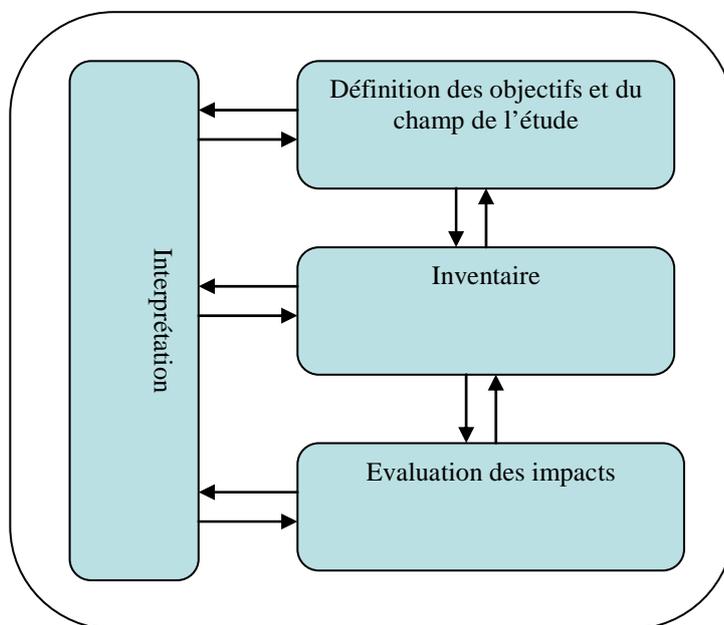


Illustration 1 : Phases d'une ACV.

#### • Définition du champ et des objectifs de l'étude

- Système étudié (procédé, réseau de distribution...);
- zone géographique;
- dimension temporelle (durée de vie du système);
- paramètres suivis (gaz à effet de serre, polluants, consommations d'énergie non renouvelable...).

Cette première phase est primordiale car elle conditionne la qualité et le résultat de l'ACV.

#### • Phase d'inventaire (usage de base de données type Ecoinvent, ELCD, collecte de données de « terrain »)

La phase d'inventaire recense les rejets de polluants dans l'air, l'eau et le sol, les consommations de ressources et les aspects environnementaux (bruit, odeur...) résultant du système étudié.

La réalisation de cette phase est souvent rendue délicate par l'absence de données sur les procédés. Un recours à des bases de données s'avère alors nécessaire.

### • Phase d'évaluation des impacts potentiels

Différentes méthodes d'analyse des impacts ont été développées, elles permettent d'expliquer les résultats de l'inventaire et d'évaluer les effets potentiels sur l'environnement qui en résultent.

Les différents compartiments de l'environnement affectés par le système étudié sont classés en catégories d'impacts potentiels.

On peut distinguer deux grands types de méthodes. La première s'intéresse aux impacts dits à mi-parcours. C'est le cas de la méthode CML 2001 qui intègre trois catégories d'impacts :

- les impacts globaux (effet de serre, déplétion de la couche d'ozone) ;
- les impacts régionaux (acidification des sols...) ;
- les impacts locaux (utilisation des sols...).

La seconde méthode s'intéresse aux impacts finaux qui font référence aux grands enjeux environnementaux à savoir la santé humaine, les écosystèmes et les ressources naturelles. La méthode Eco-indicator 99 en est un exemple.

### • Phase d'interprétation

L'interprétation doit mettre en cohérence les résultats des phases d'évaluation des impacts et d'inventaire avec les objectifs de l'étude.

Elle doit définir les limites des méthodes d'analyses des impacts potentiels dans la prise en compte des situations réelles complexes.

La phase d'interprétation peut entraîner un processus itératif de revue et de révision du domaine d'application de l'ACV, ainsi que de la nature et de la qualité des données recueillies pour répondre à l'objectif défini.

## 2.2. APPLICATION DE L'ACV À L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE PROJETS DE DEPOLLUTION

L'application de l'analyse de cycle de vie à la dépollution des sols est récente, les premiers travaux publiés sur le sujet datent de la fin des années 90 (Bender *et al.*, 1998 ; Diamond *et al.*, 1999...).

### 2.2.1. Objectifs des ACV appliquées à la dépollution des sols

Les analyses de cycles de vie réalisées dans le domaine de la dépollution des sols répondent à différents objectifs, ces derniers peuvent être classés en trois catégories :

- évaluer et comparer les performances environnementales des différentes techniques de dépollution (Volkwien *et al.*, 1999 ; Blanc *et al.*, 2004 ; Bayer *et al.*, 2006) ;

- évaluer la pertinence de réaliser une dépollution en prenant en compte les impacts sur la santé humaine, sur les écosystèmes des techniques de traitement (Toffoletto *et al.*, 2005) ;
- évaluer l'impact d'une dépollution en intégrant le sol réhabilité comme une ressource recyclée (Lesage *et al.*, 2007a et b).

Suer *et al.* (2004) dans une revue des ACV dédiées au traitement des sols pollués, identifie les objectifs suivants : mieux intégrer les effets négatifs sur l'environnement de la décontamination des sols, apporter une aide à la décision et améliorer l'efficacité environnementale.

La fonction d'une ACV est de répondre aux questions posées par les objectifs de l'étude. Dans la totalité des études citées, le rôle de l'ACV ne comprend pas la remise en cause de la dépollution du site.

### **2.2.2. Prise en compte du sol avant et après la dépollution**

La majorité des analyses de cycles de vie réalisées s'attache uniquement à évaluer les performances environnementales des techniques de traitement mises en œuvre. La décision de réaliser ou non une dépollution du site ne fait pas partie des objectifs de l'analyse de cycle de vie réalisée. Les impacts sur l'environnement sont classés en trois catégories :

- les impacts primaires relatifs à la présence d'un ou plusieurs contaminants dans le sol avant dépollution et à la présence d'une contamination résiduelle après traitement ;
- les impacts secondaires relatifs aux activités de dépollution du sol ;
- les impacts tertiaires relatifs aux usages futurs du sol (cf. derniers travaux de Lesage *et al.*, 2007a).

Après réhabilitation, le sol, ressource foncière importante est généralement réutilisé pour le redéploiement de zones industrielles, tertiaires ou résidentielles. Une analogie peut être faite avec le recyclage qui se substitue à l'utilisation de ressources naturelles (Lesage *et al.*, 2007a). On évite alors de dégrader une zone de bonne qualité environnementale.

### **2.2.3. Fonction, unité fonctionnelle, flux de référence**

La définition de la fonction et de l'unité fonctionnelle dépendent directement des objectifs de l'étude. Dans la majorité des études, la fonction définie pour l'ACV fait référence aux objectifs de dépollution qui ont été établis :

- atteindre un niveau de qualité du sol (niveau 4 du ministère de l'environnement allemand ; Volkwein *et al.*, 1999) ;
- contenir le risque de pollution de l'aquifère et atteindre des teneurs en polluant inférieures à la norme (Bayer *et al.*, 2006) ;

- traiter un hectare de sol de manière légale et appropriée (Lesage *et al.*, 2007a).

Cette dernière définition est plus vaste car elle intègre la possibilité de ne pas dépolluer le sol. Il faut alors définir une fonction qui intègre cette option et qui permette de la comparer avec différentes techniques de dépollution.

#### **2.2.4. Catégories d'impacts pris en compte**

Les différentes catégories d'impacts retenues lors de l'étude vont avoir une influence importante sur les conclusions de l'étude (Suer *et al.*, 2004). Elles dépendent également de la méthode d'analyse retenue.

Selon les études et les méthodes d'analyses retenues, la génération de déchets, la consommation d'espace naturel ou encore les odeurs sont prises en compte ou ne le sont pas.

De manière générale, les catégories d'impacts « globales » et « régionales » sont prises en compte. Par contre, l'usage du sol ou la génération de déchets ne sont pas pris en compte dans toutes les études (Bayer *et al.*, 2006). Le fait de ne pas considérer certaines catégories d'impacts peut avoir une incidence forte sur la comparaison des techniques de dépollution, par exemple favoriser les techniques *ex situ* par rapport au technique *in situ*.

### **2.3. LIMITES ET ATOUTS DE L'ACV POUR L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE PROJETS DE DÉPOLLUTION**

L'analyse de cycle de vie est sans conteste un outil pertinent pour réaliser l'évaluation environnementale de projets de dépollution. Elle présente plusieurs atouts :

- comparaison des procédés de traitement ;
- rigueur de la méthode (normalisation : ISO 14040) ;
- analyse des impacts potentiels et nombre d'impacts pris en compte ;
- extension du système aux consommations de ressources (matériaux, réactifs et énergie) ainsi qu'à la consommation d'espace.

Cependant, plusieurs limites à cet outil doivent être mises en exergue :

- l'ACV évalue des impacts potentiels et cette évaluation s'appuie sur des modèles génériques à l'échelle d'un continent : en général l'Europe lorsqu'elle est appliquée aux études françaises. Les impacts spécifiques à un site sont mal évalués ;
- les méthodes d'évaluation n'ont pas été développées pour évaluer un état, mais des « pressions » ;
- cet outil permet de comparer des scénarios de dépollution et également un scénario sans action, mais semble mal adapté pour valider la nécessité d'une dépollution.

Enfin, la norme ISO 14040 est explicite sur les limites de l'outil : la phase d'interprétation « doit définir les limites des méthodes d'analyses des impacts potentiels » et le fait que cela « ne permet pas de prévoir une situation réelle complexe ».

## **3. L'analyse des risques environnementaux (ARE) pour l'évaluation environnementale de projets de dépollution**

### **3.1. L'ANALYSE DES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX**

#### **3.1.1. Champ d'application**

L'analyse des risques environnementaux est une méthode très utilisée en Amérique du Nord. La méthodologie de l'ARE a été en grande partie développée par l'agence pour l'environnement américaine (US EPA, 1998).

L'ARE a pour principal objectif de prévenir les risques chroniques sanitaires et écologiques de toutes ampleurs. À ce titre, c'est un outil d'aide à la décision qui a deux applications principales :

- une application prospective, avec pour objectif d'évaluer les risques potentiels et d'en extrapoler les effets. L'ARE peut être appliquée à la mise sur le marché de nouvelle molécule phytosanitaire par exemple. Le programme REACH s'inspire ainsi de l'ARE ;
- une application rétrospective, pour l'évaluation des risques liés à une pollution établie. C'est typiquement le cas des sites et sols pollués.

Le champ de l'analyse des risques environnementaux se limite aux impacts sanitaires et aux risques écologiques. De plus, l'ARE prend en compte le contexte local.

#### **3.1.2. Méthodologie de l'ARE**

La méthodologie de l'analyse des risques environnementaux fait l'objet de nombreux guides et en particuliers de celui de l'US EPA (1998). Trois grandes étapes peuvent être distinguées (cf. Illustration 2) :

- la formulation du problème,
- une phase d'analyse,
- la caractérisation du risque

Suite à ces étapes, les résultats sont restitués aux décideurs. On notera également une grande similitude dans la procédure avec l'analyse de cycle de vie.

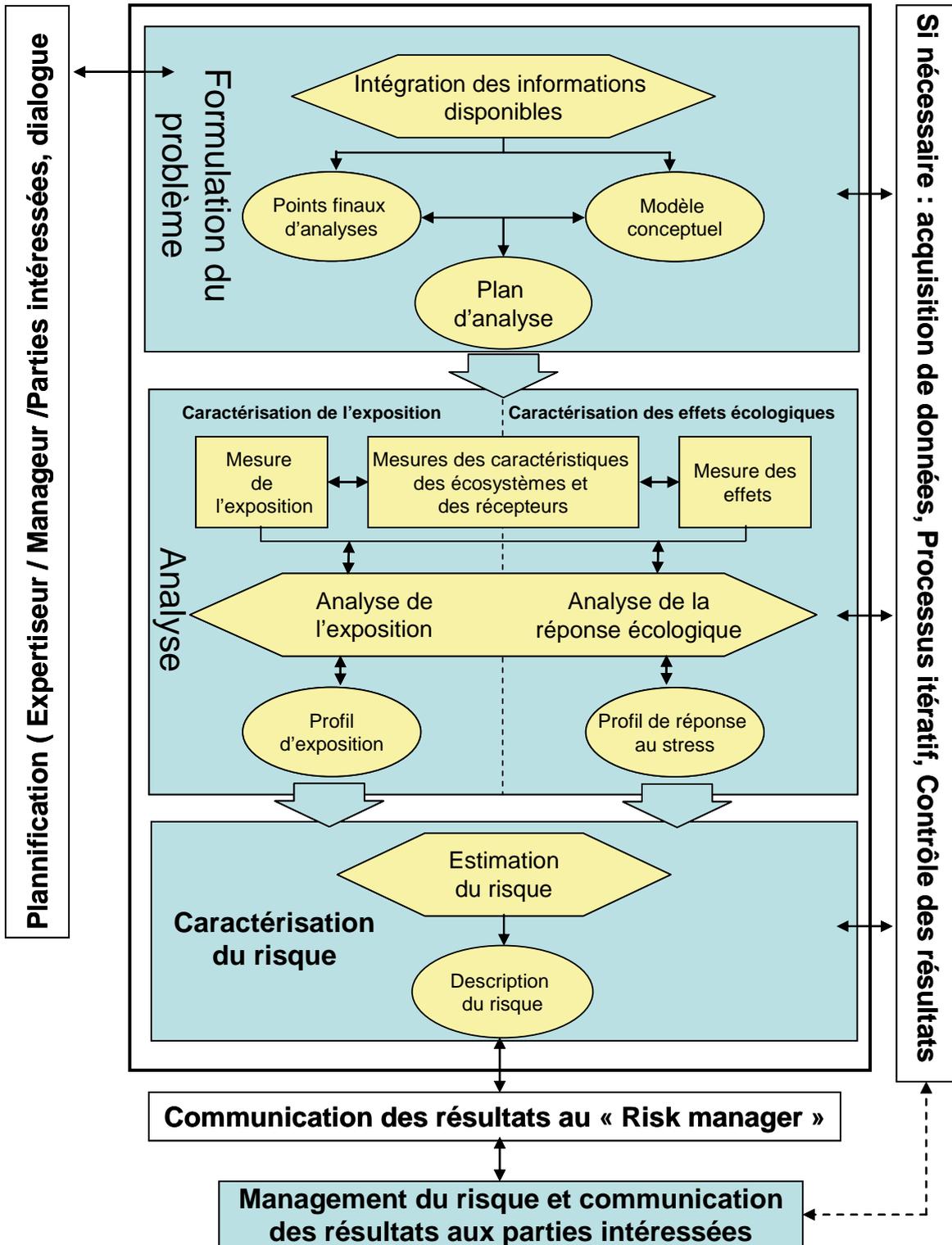


Illustration 2 : Cadre méthodologique de l'ARE (US EPA, 1998).

### **3.2. APPLICATION DE L'ARE À L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE PROJETS DE DÉPOLLUTION**

L'ARE trouve différentes applications pour la dépollution des sites. Elle a été utilisée au Pays-Bas pour déterminer les seuils de polluants à partir desquels il est nécessaire de réaliser une dépollution (Boeklohd A.E., 2008).

Cet outil est également utilisé dans l'aide à la décision pour valider le choix de dépolluer ou non un site (Posthumaa, 2008).

### **3.3. LIMITES ET ATOUTS DE L'ARE POUR L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE PROJETS DE DÉPOLLUTION**

L'analyse des risques environnementaux apparaît comme un outil pertinent pour évaluer l'état environnemental d'un site à dépolluer avec plusieurs atouts :

- l'ARE est spécifique au site étudié ;
- elle est basée sur des données de terrain ;
- son échelle spatio-temporelle est courte (10 ans) et localisée.

Par contre, ses atouts sont également ses limites :

- l'ARE n'est jamais utilisée seule, à des fins de comparaison de différentes techniques de traitement entre elles. Elle est exclusivement mise en œuvre en amont du processus décisionnel de mise en œuvre d'une opération de traitement afin de caractériser les risques liés à la contamination du site ;
- le fait qu'elle soit spécifique au site nécessite une quantité et diversité d'informations importante ;
- elle est focalisée uniquement sur l'évaluation des risques : caractérisation de l'exposition (santé) et caractérisation des effets écologiques (qualité des écosystèmes) ;
- enfin elle se limite à l'évaluation de l'état d'un site et ne prend pas en compte les impacts secondaires résultant de l'action de dépollution.



## **4. L'analyse multicritères (AMC) et l'analyse coûts-bénéfices (ACB) pour l'évaluation environnementale de projets de dépollution**

### **4.1. L'ANALYSE MULTICRITÈRES (AMC) POUR L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES PROJETS DE DÉPOLLUTION**

#### **4.1.1. L'analyse multicritères (AMC) : champ, objectifs et modalités d'application**

L'analyse multicritère désigne un ensemble de méthodes d'aide à la décision visant à résoudre des problèmes complexes, lorsque plusieurs objectifs potentiellement contradictoires sont visés. Elle permet d'aider le décideur à hiérarchiser différentes solutions se présentant à lui, de manière à identifier la solution optimale en fonction des critères qu'il retient et de l'importance relative qu'il leur attribue.

Le recours à l'analyse multicritère suppose de commencer par définir l'objectif global recherché dans le cadre du problème pour lequel une aide à la décision est souhaitée. Les différentes solutions potentielles à ce problème doivent ensuite être identifiées, ainsi que l'ensemble des critères influant sur la décision. Toutes les solutions potentielles considérées sont évaluées au regard de chacun de ces critères (étape de « scoring »). Pour finir, les évaluations critère par critère doivent être agrégées, en pondérant éventuellement les critères (étape de « weighting »), de manière à évaluer globalement chaque solution potentielle et à identifier la plus satisfaisante. Une analyse de sensibilité permet enfin d'identifier les paramètres les plus influents sur le résultat final.

Une des grandes souplesses proposées par la méthode d'analyse multicritère tient au fait que les critères retenus peuvent être quantitatifs ou qualitatifs, être exprimés dans des unités différentes et reposer sur des données de qualité hétérogène. Il s'agira simplement de les ramener à une même unité lors de l'étape d'agrégation. Les contraintes imposées par cette méthode, dans un contexte d'évaluation relative de différents scénarios, sont donc faibles en ce qui concerne la « base informationnelle » de l'évaluation : celle-ci peut être conduite même si toutes les données ne sont pas précises, quantitatives et homogènes.

Plusieurs méthodes d'analyse multicritère ont été développées ; elles diffèrent principalement par la façon dont elles agrègent les critères, mais aussi en termes de résultat final. L'AMC peut aboutir à l'identification d'une solution optimale unique, ou à la hiérarchisation des différentes options, à la sélection d'un nombre limité d'options à soumettre à une évaluation ultérieure plus approfondie, ou encore à éliminer des options considérées comme inacceptables (Onwubuya *et al.*, 2009). Le choix de la

méthode est fonction de la complexité du problème traité, du nombre de critères considérés, des attentes des décideurs et des acteurs, etc.

L'importance relative des critères, ou le poids que le décideur accorde à chacun d'entre eux, est représenté par la pondération affectée à chaque critère lors de l'agrégation. Ces poids sont par nature subjectifs ; ils représentent le système de valeur et la hiérarchisation des priorités propres au décideur. Ils peuvent faire l'objet d'une discussion au sein d'un groupe décisionnel ou d'un groupe de parties prenantes, de manière à refléter une position équilibrée. La constitution et la consultation d'un groupe d'acteurs ou de parties prenantes est en réalité une étape recommandée lors de la mise en œuvre d'une analyse multicritère (Kiker *et al.*, 2005 ; Onwubuya *et al.*, 2009). Ce comité peut ainsi être associé à l'identification des scénarios à soumettre à l'analyse, des critères à considérer ainsi que de la pondération de ces critères. Associer ces acteurs à la réalisation de ces étapes est une façon de chercher à renforcer la légitimité des résultats de l'analyse, en contrebalançant le poids de la subjectivité qui lui est inévitablement associée.

#### **4.1.2. Application de l'AMC à l'évaluation environnementale de projets de dépollution. Limites et atouts**

L'AMC est couramment utilisée dans la résolution de problèmes décisionnels environnementaux mais son application à la dépollution est encore discrète, même si la littérature recense quelques exemples de recours à l'AMC (Kiker *et al.*, 2005 ; Marcomini *et al.*, 2009). La dépollution des sols est un sujet particulier, où les contraintes économiques et sanitaires sont prioritaires et pèsent très lourdement pour le choix d'une stratégie de dépollution, au point de laisser peu de place à d'autres considérations. Le renforcement actuel des enjeux de maintien de la qualité des sols, notamment en Europe, face à l'érosion des écosystèmes et de la biodiversité, contribuent cependant à l'élargissement des critères de dépollution à des considérations environnementales mais aussi socio-économiques plus larges.

En France, le bilan coûts-avantages préconisé dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués s'apparente à une analyse multicritère (très simplifiée). Le BRGM mène pour sa part des travaux pour le développement et l'application d'une méthode d'analyse multicritère au choix de la stratégie de dépollution la mieux adaptée à un site pollué et à son contexte (Béranger *et al.*, 2006 et 2007).

Un certain nombre de forces et de faiblesses de l'analyse multicritère et de son application à l'évaluation environnementale de projets de dépollution peuvent être identifiées. Parmi les atouts, l'AMC présente l'intérêt de s'adapter à la prise en compte d'enjeux très divers pour la résolution d'un problème décisionnel. En réalité, l'hétérogénéité la plus grande est admise par la méthode, et ce tant au niveau des enjeux que des critères et des données sur lesquelles repose l'analyse. Cet aspect confère à l'AMC un potentiel intéressant de simplicité, d'adaptabilité et de souplesse d'utilisation. Ces atouts font de l'AMC une méthode permettant de garantir l'obtention d'un résultat, malgré des données de qualité très hétérogène par exemple.

Par ailleurs, mise en œuvre dans de bonnes conditions, l'AMC présente la capacité de favoriser la transparence des processus décisionnels. L'implication de groupes d'acteurs ou de parties prenantes lors de la sélection des enjeux, des critères décisionnels, de la pondération ou encore lors du scoring, va dans ce sens.

Du côté des faiblesses de la méthode, comme déjà mentionné, figure la place importante du jugement et de la sensibilité (donc de la subjectivité) des acteurs impliqués dans la mise en œuvre de l'AMC. Cette subjectivité, associée à la souplesse de la méthode, peut amener le risque de conduire à des résultats biaisés (intentionnellement ou non). Il faut également signaler que le résultat final de l'analyse est fortement influencé par la méthode choisie, et peut différer d'une méthode à une autre. Enfin, l'absence de contraintes au niveau des données nécessaires à l'analyse fait en contrepartie peser le risque d'un certain nivellement par le bas, conduisant à sous-exploiter les données les plus complètes ou précises. À l'extrême, se présente le risque d'aboutir à un résultat insignifiant.

## **4.2. L'ANALYSE COÛTS-BÉNÉFICES (ACB) POUR L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE PROJETS DE DÉPOLLUTION**

### **4.2.1. L'analyse coûts-bénéfices (ACB) : champ, objectifs et modalités d'application**

L'analyse coûts-bénéfices (ACB) est une méthode d'évaluation visant à établir et comparer les coûts et les bénéfices globaux d'un projet ou d'une politique. Ces coûts et bénéfices, exprimés en termes monétaires, dépassent cependant les seuls aspects économiques. Ils s'entendent ici comme réduction ou accroissement du bien-être humain (facteurs sociaux et environnementaux).

L'ACB cherche ainsi à déterminer l'intérêt global d'un projet ou d'une politique, au-delà de son coût direct mais aussi au-delà de sa capacité à atteindre son objectif. Pour l'aide à la décision, l'ACB permet de déterminer, entre plusieurs actions possibles permettant de répondre à un même objectif, celle pour laquelle le rapport [bénéfices/coûts] est maximisé.

L'ACB est une méthode d'évaluation complexe, requérant un bon niveau d'expertise pour être mise en œuvre. La principale difficulté réside dans l'évaluation d'aspects du projet pour lesquels il n'existe pas de valeur monétaire directement associée. C'est le cas des externalités sociales et environnementales, découlant d'impacts négatifs sur la santé ou les milieux, induits par un projet. Lorsqu'un projet ou une politique implique la destruction totale ou partielle d'un actif environnemental (par exemple, un site possédant une importance écologique particulière ou un service rendu par les écosystèmes), l'ACB cherche à déterminer la valeur économique totale (VET) de cet actif pour intégrer sa dépréciation dans les coûts de ce projet ou de cette politique. Inversement, un projet permettant d'améliorer l'état d'un actif environnemental pourra comptabiliser dans ses bénéfices l'augmentation de la VET de cet actif.

La VET d'un actif se calcule de la manière suivante (OCDE 2007) :

$$\text{VET} = \text{valeur d'usage} + \text{valeur de non-usage}$$

- Valeur d'usage = valeur d'usage effectif + valeur d'option :
  - Valeur d'usage effectif = bénéfices directs tirés de l'utilisation effective de l'actif,
  - Valeur d'option = bénéfices liés à un usage prévu et possible de l'actif ;
- Valeur de non-usage = valeur altruiste + valeur d'existence :
  - Valeur altruiste = valeur attribuée à un actif que l'on n'utilisera pas nous-mêmes mais que l'on souhaite préserver pour que d'autres en jouissent (on parle de valeur de legs lorsqu'il s'agit de les transmettre aux générations futures),
  - Valeur d'existence = valeur attachée à la simple existence de l'actif (il s'agit par exemple de la valeur que l'on donne à un beau paysage, dont on ne profite pas car il est situé loin de chez nous, mais dont on sait qu'il existe et dont on souhaite savoir qu'il continuera à exister).

Nombre de ces valeurs ne sont pas des valeurs marchandes. Pour estimer la valeur des actifs environnementaux, on peut recourir à deux méthodes d'estimation :

- la méthode des préférences déclarées, qui utilise des questionnaires pour évaluer le « consentement à payer » des individus pour la préservation d'un actif (dans le cadre d'un marché hypothétique) ;
- la méthode des préférences révélées, basée sur l'observation des marchés et des comportements pour l'échange des biens. Grâce à cette méthode par exemple, en comparant le prix de vente d'une maison avec celui d'une maison semblable mais située au bord d'une route passante, on peut estimer la valeur monétaire des nuisances causées par la route (dans le contexte spatio-temporel concerné).

D'autres méthodes existent, par exemple pour estimer le temps et l'argent que les individus sont prêts à consacrer à la possibilité d'accéder à un actif immatériel, ou pour éviter la survenue d'impacts négatifs.

L'OCDE a publié de nombreux travaux sur l'analyse coûts-bénéfices, dont un important rapport en 2006 faisant le point sur les développements récents en matière d'ACB et d'environnement (Pearce *et al.*, 2006).

#### **4.2.2. Application de l'ACB à l'évaluation environnementale de projets de dépollution. Limites et atouts**

Le sujet de la dépollution de sols, pour lequel les aspects de faisabilité économique des projets sont très sensibles du fait des coûts engendrés par la mise en œuvre des techniques de dépollution, est un sujet privilégié pour l'application de l'ACB. En recourant au langage monétaire, l'ACB adopte le langage des décideurs et se place ainsi en capacité de les aider à élargir leurs considérations sans bouleverser leur approche de la dépollution.

On trouve cependant plus de travaux relevant de l'analyse coûts-efficacité ou de l'analyse coûts-avantages que de l'analyse coûts-bénéfices. Pour l'analyse coûts-efficacité ou l'analyse coûts-avantages, les coûts considérés sont les coûts économiques et financiers directs tandis que pour l'ACB, il s'agit d'estimer les coûts et les bénéfices globaux d'un projet, *i.e.* sur le bien-être global. De nombreux acteurs et décideurs traditionnels de la dépollution ont tendance à considérer la plupart de ces coûts et bénéfices comme hors sujets. L'analyse coûts-efficacité ou l'analyse coûts-avantages sont des outils beaucoup plus simples à appréhender et à mettre en œuvre pour les acteurs de projets de dépollution ; ils restent en effet assez proches des outils et méthodes qu'ils ont l'habitude de mettre en œuvre de manière plus ou moins formalisée.

On trouve cependant dans la littérature plusieurs publications traitant de l'application de l'analyse coûts-bénéfices à la gestion de sites et sols pollués (voir par exemple Tam *et al.*, 2002 et Adams). Un rapport technique publié en 1999 par l'Agence de l'Environnement Britannique présente une méthodologie pour l'évaluation des coûts et bénéfices pour le traitement de la pollution de sols (Postle *et al.*, 1999). Aux États-Unis, les projets menés dans le cadre du programme fédéral de gestion des sites pollués (Superfund), lancé dans les années 1980, ont été examinés au travers de l'analyse coûts-bénéfices (Treich, 2008).

La méthode de l'ACB souffre cependant de quelques limites, pour lesquelles le cas de la dépollution ne fait pas exception. La monétarisation des coûts et des bénéfices peut se révéler complexe. Elle demande en tous cas un niveau d'expertise certain pour être mise en œuvre, même si des bases de données de référence peuvent être trouvées dans la littérature. Par ailleurs l'ACB fait partie des méthodes d'évaluation présentant leur résultat sous forme de « critère unique » ; elle en présente donc les défauts : manque de transparence, complexité de l'exploitation des résultats et risques d'interprétation biaisée. Enfin, l'ACB est une méthode discutée car posant un certain nombre de problèmes d'ordre méthodologique. Ces problèmes ont principalement trait aux points suivants :

- des problèmes d'équité, avec la non considération de la répartition des coûts et des bénéfices dans la société, mais aussi dans le temps (entre les générations actuelles et les générations futures). Ce dernier point est lié au recours au taux d'actualisation pour prendre en compte les coûts et les bénéfices attendus à long terme et les comparer à ceux qui surviennent aujourd'hui. Le taux d'actualisation traduit le fait qu'une valeur plus élevée est accordée aux coûts et bénéfices immédiats par rapport à ceux qui sont différés : il conduit à minimiser les coûts et bénéfices différés d'une action, ce qui pose un problème d'ordre moral. Cela peut en effet conduire à privilégier une action dont les bénéfices sont immédiats au détriment d'une autre pour laquelle les bénéfices associés seraient plus importants mais différés dans le temps (le taux d'actualisation les ramènera alors à une valeur comparativement plus faible que celle des bénéfices de la première action) ;
- un problème de prise en compte de l'incertitude, en particulier lorsque l'on se trouve face à un risque d'irréversibilité (comme la destruction d'une espèce par exemple) ;
- des difficultés pour évaluer les impacts sanitaires : les risques pour la santé peuvent être latents, décalés dans le temps, cumulatifs... par ailleurs, la sensibilité particulière des enfants est difficile à prendre en compte, notamment parce qu'on ne

peut leur appliquer les méthodes d'estimation économiques classiques comme la méthode des préférences déclarées : les enfants ne peuvent appréhender l'ensemble des enjeux liés à l'estimation du consentement à payer.

## **5. Perspectives : feuille de route pour la réalisation d'un bilan environnemental global de projets de dépollution**

Les outils et méthodes présentés dans les chapitres précédents possèdent tous un intérêt pour l'évaluation environnementale des techniques et projets de dépollution. L'étude des modalités de leur mise en œuvre ainsi que de leurs atouts et limites respectifs, nous permet cependant de sélectionner ceux d'entre eux nous paraissant répondre le mieux aux objectifs fixés dans le cadre de ce projet de recherche.

Au final, l'AMC laisse une place importante au jugement et à la sensibilité des parties prenantes. Les critères sont le plus souvent évalués sur la base de dire d'experts. L'évaluation se veut ainsi plus qualitative que quantitative, ce qui peut biaiser la procédure d'évaluation. La liberté laissée dans le choix du nombre et du type de critères pris en compte ainsi que dans la pondération de ces critères, influence fortement le résultat final.

L'ACB, quant à elle, est une méthode complexe visant à établir un score unique relatif à un projet donné. Cette méthode est d'autant plus délicate à mettre en œuvre que l'on cherche à monétariser des impacts ou des services pour lesquels il n'existe pas de valeurs monétaires associées (cas des impacts environnementaux en général : coût de l'impact du réchauffement climatique sur la santé humaine, coût de la perte de matière organique d'un hectare de sol, etc.). Enfin, les résultats d'une ACB impliquent toujours d'utiliser la notion de valeur de l'argent dans le temps. On le fait souvent en convertissant les coûts et bénéfices futurs escomptés en une somme alignée sur la valeur actuelle. Souvent, L'ACB tente de mettre les coûts et bénéfices sur un même niveau. On choisit alors un taux d'actualisation qui sert ensuite à estimer tous les coûts et bénéfices futurs en les rapportant à la valeur actuelle. Le taux d'actualisation utilisé pour les calculs de valeur actuelle est simplement un taux d'intérêt pris aux marchés financiers dont on sait qu'il est extrêmement variable dans le temps.

Pour toutes ces raisons, qu'elles soient liées au manque d'objectivité lors de la mise en œuvre d'une méthode ou à l'impossibilité d'exploiter des données précises sur un site ou sur le fonctionnement d'une technologie (cas de l'AMC) ou qu'elles pâtissent de l'inadaptation (cas de l'ACB) associée à l'absence de valeur monétaire pour les impacts environnementaux en particulier, nous ne recourons ni à l'une ni à l'autre de ces méthodes. Nous privilégions plutôt des outils permettant de mener une évaluation environnementale plus approfondie.

Les outils retenus dans le cadre de SOLENV sont l'analyse de cycle de vie (ACV) et l'analyse des risques environnementaux (ARE), avec deux importantes pistes de travaux identifiées :

- l'étude de la combinaison des deux méthodes pour une approche plus complète de l'évaluation environnementale ;

- une meilleure prise en compte, dans l'évaluation environnementale, de l'impact des techniques de dépollution sur l'évolution de la qualité des sols.

L'illustration 3 confronte les catégories d'impacts respectivement retenues par l'ACV et l'ARE pour l'évaluation environnementale. Elle met clairement en évidence la différence de portée des deux méthodes (le champ de l'analyse des risques environnementaux se limite aux impacts sanitaires et écologiques), notamment concernant l'échelle spatiale de l'évaluation environnementale (l'ARE ne porte que sur l'échelle locale). À l'heure actuelle, il n'existe pas dans les méthodes ACV « standard » de catégories d'impacts pour la fertilité des sols, cependant la bibliographie fait état d'un certain nombre de travaux de développement sur ce sujet (cf. par exemple, l'ILCD Handbook (2010) « Framework and requirements for Life Cycle Impact Assessment (LCIA) models and indicators » ou encore le rapport de l'université de Leiden (2006) intitulé « Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment (LCA) »). Il nous apparaît donc intéressant de faire figurer cette catégorie d'impact local dans les catégories d'impacts potentiellement évaluées par l'ACV.

Échelle géographique	Catégories d'impacts retenues par l'ACV		Catégories d'impacts retenues par l'ARE	
<b>Global</b>	Potentiel de réchauffement climatique		-	
	Potentiel de déplétion de la couche d'ozone		-	
	Déplétion des ressources abiotiques	Extraction d'énergies fossiles	-	
		Extraction de ressources minérales	-	
<b>Régional</b>	Déplétion des ressources en eau douce		-	
	Potentiel d'acidification	Aquatique	-	
		Terrestre	-	
	Impacts de la formation d'ozone photochimique sur la végétation		-	
	Potentiel d'eutrophisation	Aquatique	-	
Terrestre		-		
<b>Local</b>	Potentiel de formation de photo-oxydant (troposphérique)		-	
	Toxicité humaine	Cancérogène	Toxicité humaine	Cancérogène
		Non cancérogène		Non cancérogène
	Écotoxicité	Aquatique	Écotoxicité	Aquatique
		Terrestre		Terrestre
	Occupation des sols	Biodiversité	-	
		Érosion	-	
		Hydrologie	-	
Fertilité des sols		-		

Illustration 3 : Catégories d'impacts retenues par l'ACV et l'ARE pour l'évaluation environnementale.

Comme indiqué dans l'illustration 3, la toxicité et l'écotoxicité sont évaluées à la fois par la méthode ACV et la méthode ARE. Bien que locales, ces deux catégories d'impacts sont évaluées par les méthodes « génériques » telles que ReCiPe, Stepwise ou EDIP en utilisant des bases de données à l'échelle européenne. À l'heure actuelle, des outils tels que USEtox sont développés afin de calculer des facteurs de caractérisation locaux permettant l'évaluation locale des catégories d'impacts « toxicité » et « écotoxicité ». Dans le cadre de SOLENV, nous envisageons d'utiliser ce dernier logiciel pour évaluer à l'échelle d'un site les catégories d'impacts toxicologiques et éco-toxicologiques. Précisons enfin que le recours à l'ACV nous est absolument nécessaire pour calculer les impacts secondaires dus aux technologies de traitement. L'ARE seule ne permet pas d'évaluer ces impacts.

Par contre, l'ARE présente l'avantage de pouvoir évaluer un état du site avant restauration et un état après restauration, ce que ne permet pas de faire l'ACV qui évalue uniquement les impacts liés aux émissions (rejets) dans les différents compartiments de l'environnement (eau et atmosphère essentiellement). Les bénéfices d'un traitement liés à la diminution des impacts primaires ne sont donc évaluables qu'à partir de l'ARE, par comparaison de l'état initial et de l'état final d'un site.

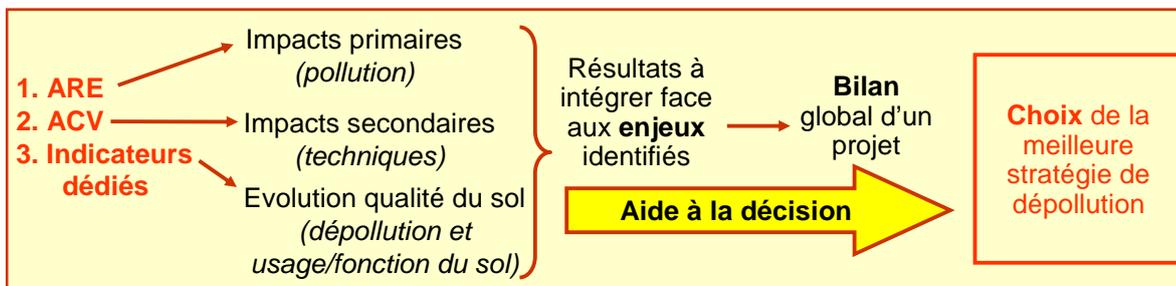
Ainsi, la combinaison de ces deux outils vise à permettre d'estimer la performance environnementale globale d'un projet de dépollution au regard des enjeux qui auront été identifiés comme étant pertinents. Notre proposition cherche à construire ce bilan de la manière suivante, en trois étapes :

- **l'évaluation des impacts « primaires »** d'un projet de dépollution :  
Ces impacts désignent les effets de la pollution et le résultat direct de la dépollution en termes d'abattement des teneurs en polluants. L'analyse de risques environnementaux sera l'outil privilégié pour évaluer ces impacts ;
- **l'évaluation des impacts « secondaires »** d'un projet de dépollution :  
Ces impacts découlent directement de la mise en œuvre des techniques de dépollutions et concernent tous les effets de ces techniques autres que l'abattement de la teneur en polluants. Pour cette évaluation, l'analyse de cycle de vie sera mise en œuvre ;
- **l'évaluation de l'évolution de l'état et de la qualité du sol** au cours d'un projet de dépollution :  
Cette évolution est liée à la mise en œuvre des techniques de dépollution, mais aussi à l'usage futur prévu pour le site dans le cadre du projet de reconversion. L'état du sol se caractérise par sa capacité à remplir des fonctions fondamentales (fonctions de filtration, de support, etc.). Mener cette évaluation suppose donc d'être en mesure de caractériser la qualité d'un sol, et ce pour les états suivants (de manière à pouvoir observer l'évolution due au projet) :
  - l'état initial du sol, *i.e.* avant la dépollution (il s'agit de caractériser le sol au-delà de son état « contaminé ») ;
  - l'état final du sol, *i.e.* après la mise en œuvre de techniques de dépollution mais aussi s'il y a lieu après la mise en place du réaménagement final du site.
 L'outil à mettre en œuvre pour cette troisième étape de l'évaluation comprend un ensemble d'indicateurs permettant de caractériser l'état d'un sol (indices de qualité

des sols). Ces indicateurs de qualité des sols ne sont pas inclus dans les méthodes ARE ou ACV et doivent, par conséquent, être évalués par ailleurs. À terme, ces indicateurs d'impacts pourraient être utilisés dans la méthodologie ACV. Pour ce faire, un travail conséquent devra être réalisé. Il visera à établir les chemins d'impacts reliant les impacts primaires (par exemple, acidification, érosion, perte de matière organique, etc.) aux impacts à mi-parcours (réchauffement climatique, toxicité, écotoxicité, productivité des sols, épuisement des ressources en eau) voire aux impacts finaux sur les aires de protection (santé humaine, qualité des écosystèmes, perte de productivité biotique, épuisement des ressources naturelles).

L'objectif de la mise en œuvre combinée de ces outils (ARE, ACV et indices de qualité des sols) est de rendre l'ensemble de ces résultats utiles au décideur et aux parties prenantes, dans le cadre d'une aide à la décision : le choix de la stratégie de dépollution la plus appropriée dans un contexte donné.

L'illustration 4 récapitule cette démarche :



*Illustration 4 : 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.*

La restitution finale des résultats est un point à approfondir dans la suite de nos travaux. Il nous paraît important que cette présentation se caractérise par un bon niveau de transparence ainsi que par une capacité à permettre une analyse détaillée des résultats. Cette présentation pourra par exemple reposer sur une visualisation du type de celle présentée par l'illustration 5 :

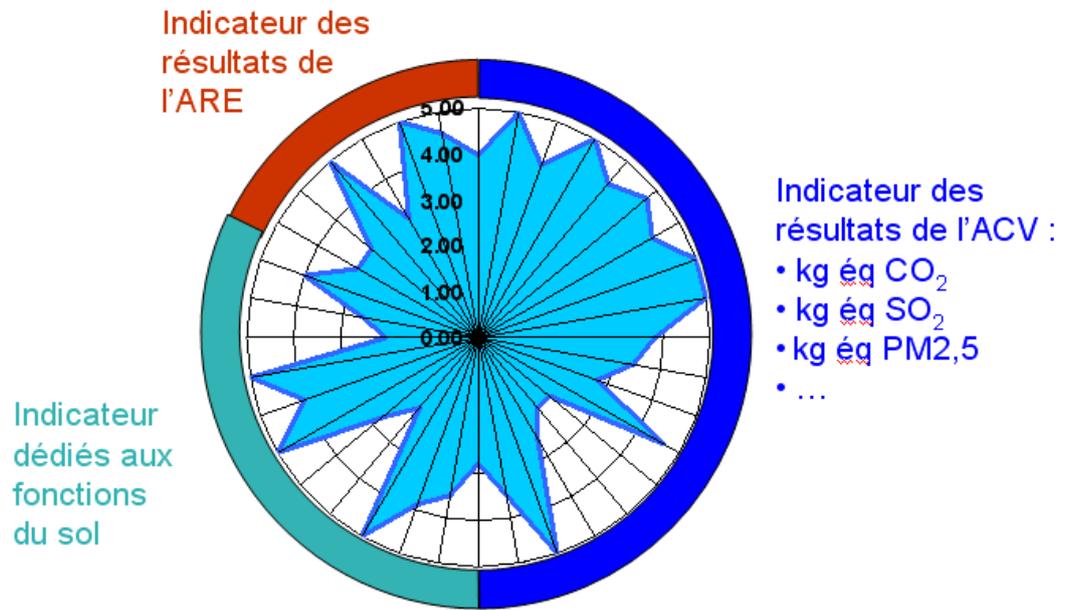


Illustration 5 : Diagramme radar des indicateurs des résultats de l'ARE, de l'ACV et des indicateurs dédiés aux fonctions des sols.



## 6. Conclusion

Les travaux réalisés dans la première phase du projet SOLENV ont permis de réaliser un état de l'art portant sur des outils d'évaluation environnementale mobilisables dans le cadre d'une aide à la décision pour des projets de dépollution de sols et eaux souterraines.

L'objectif du projet SOLENV est de fournir des critères environnementaux quantitatifs pour soutenir l'aide à la décision en matière de choix de technologies de dépollution. À l'issue de cette phase d'état de l'art, la méthodologie générale d'évaluation proposée intègre d'une part la méthodologie de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) pour évaluer les impacts secondaires liés à la mise en œuvre des opérations de traitement, et d'autre part celle de l'Analyse des Risques Écologiques (ARE) pour évaluer les risques liés à la présence de polluants dans le sol ou les eaux souterraines.

Cette méthodologie est actuellement en cours de développement. Les travaux portent notamment sur les modalités de combinaison de ces deux outils, qui devront être approfondies de manière à renforcer leur cohérence. L'ACV est en effet une méthode dédiée aux impacts globaux et à long terme, tandis que l'ARE s'intéresse aux impacts locaux et à court terme.

Pour caractériser l'évolution de la qualité des sols, la méthodologie d'évaluation proposée dans le cadre de SOLENV s'appuiera sur des modèles de caractérisation des impacts environnementaux spécifiques, à identifier ou à développer.

La question de la restauration ou de la dégradation des fonctions d'un sol du fait d'un traitement de dépollution est au cœur de l'approche proposée par le projet SOLENV. En effet, au-delà du fait qu'un sol dégradé fournit moins de biens et services à la société, les services qu'il fournit aux écosystèmes pour leur bon fonctionnement sont eux aussi affectés.

L'objectif au final est de permettre aux professionnels de la dépollution de faire reposer leurs décisions, notamment en matière de choix de techniques de traitement, sur une meilleure prise en compte de l'environnement dans sa globalité.



## 7. Bibliographie

**Adams B.M.** - Cost Benefit Analysis: Remediation of Trichloroethylene in Groundwater.

**Bayer P., Finkel M.** (2006) - Life cycle assessment of active and passive groundwater remediation technologies. *J. Contam. Hydrol.*, 83, p. 171-199.

**Blanc A., Métivier-Pignon H., Gourdon R. et al.** (2004) - Life cycle assessment as a tool for controlling the development of technical activities: application to the remediation of a site contaminated by sulfur. *Adv. Environ. Res.*, 8, p. 613-627.

**Bender A., Volkwein S., Battermann G., Klöpffer W., Hurtig H.W., Kohler W.** (1998) - Life cycle assessment for remedial action techniques: methodology and application. ConSoil '98, Sixth international FZK/TNO Conference on contaminated soil. Thomas Telford, London, p. 367–376

**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.

**Béranger S., Blanchard F., Bouzit M.** (2007) - Outils d'aide à la décision dans le cadre de la gestion des sites et territoires complexes. Rapport BRGM/RP-56075-FR.

**Boekhold A.E.** (2008) - Ecological risk assessment in legislation on contaminated soil in The Netherlands. *Sci. Total Environ.*, 406, p. 518-522.

**Diamond M.L., Page C.A., Campbell M. et al.** (1999) - Life-cycle framework for assessment of site remediation options: method and generic survey. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 18, p. 788-800.

**Lesage P., Ekvall T., Deschênes L., Samson R.** (2007a) - Environmental Assessment of Brownfield Rehabilitation Using Two Different Life Cycle Inventory Models. Part 1: Methodological Approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12, p. 391–398.

**Lesage P., Ekvall T., Deschênes L. et al.** (2007b) - Environmental assessment of brownfield rehabilitation using two different life cycle inventory models. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12, p. 391-398.

**Marcomini A. et al.** (Ed.) (2009) - Decision Support Systems for Risk-Based Management of Contaminated Sites. Springer Science + Business Media.

**Kiker A.G., Bridges T.S., Varghese A., Seager T.P., Linkov I.** (2005) - Application of Multicriteria Decision Analysis in Environmental Decision Making. *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 1, n° 2, p. 95-108.

**NF EN ISO 14040** (2006) - Management environnemental : Analyse du cycle de vie ; Principes et cadre.

**OCDE** (2007) - Évaluer les politiques environnementales. *Synthèses*, Mars 2007.

**Onwubuya K. et al.** (2009) - Developing decision support tools for the selection of "gentle" remediation approaches. *Science of the Total Environment*, 407, p. 6132-6142.

**Pearce D. et al.** (2006) - Analyse coûts-bénéfices et environnement. Développements récents. Éditions OCDE. ISBN: 978-92-64-01006-2. 314 p.

**Posthuma L., Eijsackers H.J.P., Koelmans A.A. et al.** (2008) - Ecological effects of diffuse mixed pollution are site-specific and require higher-tier risk assessment to improve site management decisions: A discussion paper. *Sci. Total Environ.*, 406, p. 503-517.

**Postle M., Fenn T., Grosso A., Steeds J.** (1999) - Cost-Benefit Analysis for Remediation of Land Contamination. R&D Technical Report P316.

**Suèr P., Nilsson-Paledal S. et al.** (2004) - LCA for Site Remediation: A Literature Review. *Soil and Sediment Contamination (formerly Journal of Soil Contamination)*, 13, p. 415-425.

**Tam E.K.L. et Byer P.H.** (2002) - Remediation of contaminated land: a decision methodology for site owners. *Journal of Environmental Management*, 64, p. 387-400.

**Toffoletto L., Deschênes L., Samson R.** (2005) - LCA of Ex-Situ Bioremediation of Diesel-Contaminated Soil (11 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10, p. 406-416.

**Treich N.** (2008). « Benefit-Cost Analysis ». Support de cours donné à la Toulouse School of Economics.

**US EPA** (1998) - Guidelines for Ecological Risk Assessment. 188 p.

**Volkwein S., Hurtig H., Klöpffer W.** (1999) - Life cycle assessment of contaminated sites. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 4, p. 263-274.



**Centre scientifique et technique**  
**Service environnement industriel et procédés innovants**  
3, avenue Claude-Guillemain  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34