

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

Evaluation environnementale des impacts secondaires

Octobre 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., 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, 198 p., 32 fig., 48 tab., 2 ann.

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 oeuvre 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 a comme premier objectif de gérer les risques sanitaires et environnementaux à l'échelle des sites ; les risques environnementaux encourus à des échelles géographiques et temporelles plus étendues sont traités plus marginalement. La mise en œuvre de 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 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 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 second rapport intègre un recueil exhaustif et synthétique des technologies de traitement des sols actuellement disponibles sur le marché. Les technologies *ex situ*, *on site*, et *in situ* ont été considérées.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette seconde tâche se sont intéressés à inventorier les pressions générées (émissions, consommations en ressources primaires, en ressources non-renouvelables, en énergie ...) par la mise en œuvre des technologies de traitement sur les compartiments Air, Eaux et Sols. Pour chaque cas d'étude, une liste des pressions exercées est fournie ; par ailleurs, la quantification des pressions a été réalisée sur la base d'hypothèses spécifiques au site (dimensionnement, rendements épuratoires, scénarii d'exposition...). Ce travail correspond à la tâche 2 du projet.

Ces travaux permettent d'évaluer les impacts « secondaires », liés à la mise en œuvre des techniques de dépollution. Ces impacts ont été évalués par l'Analyse du Cycle Vie (ACV). L'analyse des impacts potentiels a mis en évidence les atouts et les limites en terme de performance environnementale des technologies de traitement.

Pour répondre aux objectifs poursuivis par le projet SOLENV, la suite des travaux doit permettre de mettre ces résultats en perspective avec :

- les impacts « primaires », liés aux effets de la pollution. Ces impacts seront évalués par le biais de l'Analyse des Risques Ecologique et Sanitaire (ARE et ARS) ;

- 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 deux autres aspects de l'évaluation environnementale, de manière à caractériser au mieux les impacts environnementaux d'un projet de dépollution.

Overview

Policies for contaminated sites and soils remediation are firstly designed to manage risks locally at the site scale only and rarely consider the environmental risks stakes at larger geographic and temporal scales. In order to implement treatment technologies integrating the specificities of contaminated sites and to protect human health and ecosystems, while reducing risks in the immediate vicinity of sites, it is necessary to ensure that these technologies not significantly increase the collateral risks at an extended geographic scale and over a longer period than the treatment duration itself.

SOLENV scope is the environmental assessment of remediation technologies for contaminated sites and soils. This project is supported by ADEME and is a part of the theme contaminated land. It is funded since June 2009 by ADEME and BRGM for a duration of 2 years.

SOLENV goal is to develop a method for selecting treatment technologies for contaminated sites based on the environmental impacts they cause. The impacts are considered in relation to the site specific features, including an assessment of the gains to restore soil functions and the direct impacts of the application of the technology. The larger purpose of the project is to link the concepts of "soils state" and "environmental impacts".

This second report includes a synthetic and comprehensive collection of soil treatment technologies currently available on the market. Technologies *ex-situ* and *in situ* are considered.

In the second part of this project, work has consisted in inventorying pressures in the compartments air, water and soil (emissions to air, water and soil, consumption of primary resources, of non-renewable resources, energy ...) generated by the implementation of treatment techniques. For each case study, a list of pressures is provided, the quantification of pressures is related to site clean up. This work enable to assess so-called "secondary impacts" related to the implementation of remediation techniques. These impacts were assessed by LCA methodology. The analysis of potential impacts allowed identifying strengths and limitations of treatment techniques in terms of environmental performance.

To meet the goals pursued by the SOLENV project, further work should allow putting these results into perspective with:

- Primary impacts, linked with soils contamination. These impacts are assessed by human and ecological risk assessment.
- Changes in soil quality between the state before treatment and the one resulting from remediation operations. Specific indicators to characterize soil quality have been selected and a dedicated methodology has been developed to assess this aspect in another part of the project

Following work in the SOLENV project will aim to deepen and combine primary and secondary impacts so that to precisely characterize the whole environmental impact of a cleanup project.

Sommaire

1. Introduction	13
2. Technologies de traitement.....	15
2.1. PRESENTATION DES GRANDES FAMILLES DE PROCEDE DE DEPOLLUTION	15
2.2. PRESENTATION DES MILIEUX POTENTIELLEMENT IMPACTES PAR LES PROCEDES DE DEPOLLUTION	22
3. Evaluation des impacts secondaires.....	27
3.1. DEFINITION DES IMPACTS SECONDAIRES	27
3.2. PRESENTATION GENERALE DES CAS D'ETUDE.....	27
3.3. DEFINITION DU CHAMPS ET DES OBJECTIFS EN VUE DE L'EVALUATION DES TECHNOLOGIES DE TRAITEMENT DE SOL ET DES EAUX SOUTERRAINES	30
3.3.1. Définitions des objectifs pour les différents cas d'études.....	30
3.3.2. Définition du système	33
3.3.3. Description des procédés sous SIMAPRO [®]	36
3.4. PRESENTATION DETAILLEE DES CAS D'ETUDES	38
3.4.1. Site 1 : récupération de surnageant – pollution de la nappe par du FOD	38
3.4.2. Site 2 : confinement – pollution des sols par des métaux/métalloïdes	54
3.4.3. Site 3 : traitement biologique des sols – pollution des sols par du FOD..	66
3.4.4. Site 4 : récupération du plongeant et de la phase dissoute - pollution de la nappe par des COHV	78
3.5. EVALUATION DES IMPACTS DES PROCEDES DE DEPOLLUTION PAR SITE	101
3.5.1. Contribution à l'arborescence d'impact, exemple du changement climatique.....	102
3.5.2. Site 1 : récupération de surnageant - pollution de la nappe par du FOD.	106
3.5.3. Site 2 : confinement d'un sol pollué aux métaux/métalloïdes.....	113
3.5.4. Site 3 : traitement d'un sol pollué par du FOD	118
3.5.5. Site 4 : récupération du plongeant et de la phase dissoute - pollution de la nappe par des COHV	123

3.5.6. Mise en perspective des impacts pour les différents cas d'étude.....	128
3.6. ESTIMATION D'IMPACT A MI-PARCOURS DE MATERIELS/ENGINS DE DEPOLLUTION	132
4. Conclusion.....	137
5. Bibliographie	139

Liste des illustrations

<i>Figure 1 : Classement des filières et techniques de traitement des sols par tonnage décroissant (ADEME et Ernst & Young, 2009).....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 2 : Classement des filières et techniques de traitement des eaux par volume traité décroissant (ADEME et Ernst & Young, 2009).....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 3 : Exemple de système pris en compte pour l'évaluation environnementale des impacts secondaires.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 4 : Schéma de principe du pompage-écrémage (Colombano et al., 2010)</i>	<i>40</i>
<i>Figure 5 : Schéma de principe de la tranchée drainante (Colombano et al., 2010).....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 6 : Schéma de principe de l'extraction multi-phase (réseau unitaire) (Colombano et al., 2010).....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 7 : Schéma de principe du biotertre (Colombano et al., 2010)</i>	<i>67</i>
<i>Figure 8 : Schéma de principe du compostage (Colombano et al., 2010)</i>	<i>67</i>
<i>Figure 9 : Schéma de principe du landfarming (Colombano et al., 2010).....</i>	<i>67</i>
<i>Figure 10 : Schéma de principe du sparging/venting (Colombano et al., 2010)</i>	<i>80</i>
<i>Figure 11 : Schéma de principe du traitement biologique dynamisé (Colombano et al., 2010).....</i>	<i>80</i>
<i>Figure 12 : Schéma de principe de l'oxydation chimique in situ (Colombano et al., 2010).....</i>	<i>81</i>
<i>Figure 13 : Schéma de principe de la barrière perméable réactive (Colombano et al., 2010).....</i>	<i>81</i>
<i>Figure 14 : Schéma de principe de l'atténuation naturelle contrôlée (adaptée de Sinke et Le Hécho, 1999)</i>	<i>82</i>
<i>Figure 15 : Arborescence d'impact : changement climatique ; Procédé d'élimination de surnageant par pompage-écrémage, sous Simapro.</i>	<i>122</i>
<i>Figure 16 : Arborescence d'impact : changement climatique ; Procédé dépollution des sols pollués par des métaux/métalloïdes, confinement, recouvrement de surface par de la terre végétale, sous Simapro.</i>	<i>103</i>
<i>Figure 17 : Arborescence d'impact : changement climatique ; Procédé dépollution des sols pollués par du FOD, biotertre on site, sous Simapro.</i>	<i>104</i>
<i>Figure 18 : Arborescence d'impact : changement climatique ; Traitement des COHV par ISCO, sous Simapro.</i>	<i>105</i>

<i>Figure 19 : Comparaison des procédés de traitement pour l'élimination de surnageant (FOD). Impacts potentiels à mi-parcours exprimés en unité caractéristique (cf. tableau 36), calculs réalisés avec les méthodes ReCiPe Hierachist et USEtox.....</i>	109
<i>Figure 20 : Comparaison des procédés de traitement pour l'élimination de surnageant (FOD). Impacts potentiels à mi-parcours exprimés en unité caractéristique (cf. tableau 37), calculs réalisés avec les méthodes ReCiPe Hierachist et USEtox, sans valorisation du FOD récupéré.....</i>	110
<i>Figure 21 : Comparaison du poids des différents postes pour les procédés de traitement pour l'élimination de surnageant (FOD). Impacts potentiels à mi-parcours normalisés, calculs réalisés avec la méthode ReCiPe, Hierachist.</i>	111
<i>Figure 22 : Comparaison du poids des différents postes pour les procédés de traitement pour l'élimination de surnageant (FOD). Impacts potentiels à mi-parcours normalisés, calculs réalisés avec la méthode ReCiPe, Hierachist, sans valorisation du FOD récupéré.</i>	112
<i>Figure 23 : Comparaison des procédés de traitement pour le confinement d'un sol pollué par des métaux. Impacts potentiels à mi-parcours exprimés en unité caractéristique (cf. tableau 39), calculs réalisés avec les méthodes ReCiPe Hierachist Europe et USEtox.</i>	115
<i>Figure 24 : Comparaison des procédés de traitement pour le confinement d'un sol pollué par des métaux. Impacts potentiels à mi-parcours normalisés, calculs réalisés avec la méthode ReCiPe, Hierachist, Europe.....</i>	116
<i>Figure 25 : Comparaison des procédés de traitement pour le confinement d'un sol pollué par des métaux (hors recouvrement béton). Impacts potentiels à mi-parcours normalisés, calculs réalisés avec la méthode ReCiPe, Hierachist.</i>	117
<i>Figure 26 : Comparaison des procédés de traitement pour la dépollution d'un sol pollué au FOD. Impacts potentiels à mi-parcours exprimés en unité caractéristique (cf. tableau 41), calculs réalisés avec la méthode ReCiPe et Usetox, Hierachist.</i>	120
<i>Figure 27 : Comparaison des procédés de traitement pour la dépollution d'un sol pollué au FOD. Impacts potentiels à mi-parcours normalisés, calculs réalisés avec la méthode ReCiPe, Hierachist.....</i>	121
<i>Figure 28 : Comparaison des procédés de traitement pour la récupération du plongeant et de la phase dissoute - pollution de la nappe par des COHV. Impacts potentiels à mi-parcours exprimés en unité caractéristique (cf. tableau 43), calculs réalisés avec la méthode ReCiPe Hierachist et Usetox.</i>	126
<i>Figure 29 : Comparaison des procédés de traitement pour la récupération du plongeant et de la phase dissoute - pollution de la nappe par des COHV. Impacts potentiels à mi-parcours normalisés, calculs réalisés avec la méthode ReCiPe, Hierachist.</i>	127
<i>Figure 30 : Evolution des impacts totaux en fonction du débit nominal des pompes, pour différentes catégories d'impacts</i>	133
<i>Figure 31 : Impacts totaux pour 1 heure de fonctionnement d'une pelleteuse.....</i>	134
<i>Figure 32 : Impacts totaux du transport de 25 t de matériaux sur une distance de 100 km soit 2 500 t.km.</i>	135

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Classement des méthodes de dépollution (adapté de Lecomte, 1998).....</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 2 : Classement des méthodes de traitement des eaux et des gaz extraits (adapté de Lecomte, 1998)</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 3 : Présentation des différentes techniques de dépollution in situ, on site et ex situ.</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 4 : Présentation des différentes techniques de dépollution de rejets aqueux sur site</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 5 : Présentation des différentes techniques de dépollution de rejets atmosphériques sur site.....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 6 : Présentation des différentes techniques de dépollution avec rejets dans les différents milieux associés.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 7 : Liste des différents exemples de dépollution pris en considération</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 8 : Définition des objectifs pour chaque cas d'étude.</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 9 : Définition de la fonction du système pour les différents cas d'étude.</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 10 : Définition de l'unité fonctionnelle pour les différents cas d'étude.</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 11 : Flux de références pour les différentes techniques.</i>	<i>32</i>
<i>Tableau 12 : Allocation de l'impact d'une pelleteuse « infrastructure »</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 13 : Règles d'affectation des impacts pour la valorisation des produits récupérés.....</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 14 : Présentation des caractéristiques du site 1</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 15 : Présentation des concentrations en hydrocarbures dans les sols et les eaux souterraines du site 1</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 16 : Présentation des concentrations en hydrocarbures dans les gaz des sols du site 1</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 17 : Description détaillée du pompage-écrémage du site 1 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 18 : Description détaillée de la tranchée drainante du site 1 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 19 : Description détaillée de l'extraction multiphase du site 1 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)</i>	<i>49</i>
<i>Tableau 20 : Présentation des caractéristiques du site 2</i>	<i>54</i>
<i>Tableau 21 : Présentation des concentrations en métaux /métalloïdes dans les sols et les eaux souterraines du site 2</i>	<i>54</i>
<i>Tableau 22 : Description détaillée du recouvrement de surface (terre végétale) du site 2 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)</i>	<i>56</i>
<i>Tableau 23 : Description détaillée du recouvrement de surface (enrobé) du site 2 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)</i>	<i>58</i>
<i>Tableau 24 : Description détaillée du recouvrement de surface (béton) du site 2 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)</i>	<i>60</i>

<i>Tableau 25 : Description détaillée de l'encapsulation du site 2 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 26 : Présentation des caractéristiques du site 3</i>	<i>66</i>
<i>Tableau 27 : Description détaillée du biotertre du site 3 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)</i>	<i>68</i>
<i>Tableau 28 : Description détaillée du compostage du site 3 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)</i>	<i>72</i>
<i>Tableau 29 : Description détaillée du landfarming du site 3 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)</i>	<i>75</i>
<i>Tableau 30 : Présentation des caractéristiques du site 4</i>	<i>78</i>
<i>Tableau 31 : Description détaillée du sparging/venting du site 4 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)</i>	<i>83</i>
<i>Tableau 32 : Description détaillée du traitement biologique anaérobie du site 4 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)</i>	<i>88</i>
<i>Tableau 33 : Description détaillée de l'oxydation chimique in situ du site 4 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)</i>	<i>92</i>
<i>Tableau 34 : Description détaillée de la barrière perméable réactive du site 4 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)</i>	<i>95</i>
<i>Tableau 35 : Description détaillée de l'atténuation naturelle contrôlée du site 4 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)</i>	<i>99</i>
<i>Tableau 36 : Comparaison des principaux postes des procédés de récupération de surnageant (FOD) qui ont une forte influence sur le résultat de l'évaluation environnementale.....</i>	<i>106</i>
<i>Tableau 37 : Impacts totaux, par unité fonctionnelle, pour les différents procédés de récupération de surnageant (FOD) avec valorisation du FOD caractérisés avec les méthodes ReCiPe Hierarchist et USEtox.</i>	<i>107</i>
<i>Tableau 38 : Impacts totaux, par unité fonctionnelle, pour les différents procédés de récupération de surnageant (FOD) sans valorisation du FOD caractérisés avec les méthodes ReCiPe Hierarchist et USEtox.</i>	<i>108</i>
<i>Tableau 39 : Comparaison des principales caractéristiques des procédés de recouvrement / confinement des sols pollués par des métaux – métalloïdes.</i>	<i>113</i>
<i>Tableau 40 : Impacts potentiels à mi-parcours totaux, calculs réalisés avec les méthodes ReCiPe Hierachist Europe et USEtox.....</i>	<i>114</i>
<i>Tableau 41 : Comparaison des principales caractéristiques des procédés biologiques de dégradation du FOD.....</i>	<i>118</i>
<i>Tableau 42 : Impacts totaux à mi-parcours, par unité fonctionnelle, pour les différents procédés de traitement des sols pollués par du FOD, caractérisés avec les méthodes ReCiPe Hierarchist et USEtox.</i>	<i>119</i>
<i>Tableau 43 : Comparaison des principales caractéristiques contribuant aux impacts, des procédés de traitement des COHV</i>	<i>124</i>
<i>Tableau 44 : Totals des impacts à mi-parcours, par unité fonctionnelle, pour les différents procédés de traitement des COHV, caractérisés avec les méthode ReCiPe Hierarchist et USEtox.....</i>	<i>125</i>

<i>Tableau 45 : Impacts totaux normalisés, exprimés en équivalent habitant européen, pour les différents procédés de récupération de surnageant (FOD) avec valorisation du FOD caractérisés avec la méthode ReCiPe Hierarchist.</i>	128
<i>Tableau 46 : Impacts totaux potentiels à mi-parcours normalisés, pour les différents procédés de confinement d'un sol pollué aux métaux/métalloïdes, comparaison avec les impacts d'une camionnette, calculs réalisés avec les méthodes ReCiPe Hierarchist Europe et USEtox.</i>	129
<i>Tableau 47 : Impacts totaux normalisés, exprimés en équivalent habitant européen, pour les différents procédés de traitement d'un sol pollué par du FOD, caractérisés avec la méthode ReCiPe Hierarchist.</i>	130
<i>Tableau 48 : Totals des impacts à mi-parcours normalisés, exprimés en équivalent habitant européen, pour les différents procédés de traitement des COHV, caractérisés avec la méthode ReCiPe Hierarchist.</i>	131
 <i>Liste des annexes</i>	
<i>Annexe 1</i>	143
<i>Propriété intellectuelle des bases de données ECOINVENT</i>	143
<i>Annexe 2</i>	145
<i>Présentation des calculs de risques sanitaires établissant des concentrations maximales admissibles pour les différents sites étudiés</i>	145
<i>Annexe 3</i>	169
<i>Description des catégories d'impacts évaluées pour la comparaison des technologies de traitement de sols</i>	169

Glossaire

ACV : analyse du cycle de vie

ARE : analyse des risques écologiques

ARS : analyse des risques sanitaires

BPR : barrière perméable réactive

CMA : concentration maximale admissible

COHV : composés organiques halogénés volatils

ELCD : European reference life cycle database

EQRS : évaluation quantitative des risques sanitaires

FOD : fioul ordinaire domestique

HCt : hydrocarbure totaux

ICV : inventaire du cycle de vie

ISCO : oxydation chimique *in situ*

ISDD : installation de stockage des déchets dangereux

ISDND : installation de stockage des déchets non-dangereux

ISDI : installation de stockage des déchets inertes

LNAPL : Light non-aqueous phase liquid (phase liquide non-aqueuse légère)

PCE : perchloroéthylène

PCI : pouvoir calorifique inférieur

PEHD : polyéthylène haute densité

TCE : tetrachloroéthylène

ZNS : zone non-saturée

ZS : zone saturée

1. Introduction

Le projet SOLENV porte sur l'évaluation de l'impact environnemental de la mise en œuvre de technologies de traitement de sols et eaux souterraines pollués. L'objectif du projet est d'élaborer une méthode de sélection de technologies de traitement des sites pollués, sur la base des bénéfices et impacts environnementaux qu'elles engendrent. Ces bénéfices et impacts, considérés en fonction de caractéristiques spécifiques au site, englobent une appréciation des gains de restauration des fonctions du sol, la réduction locale des risques sanitaires et environnementaux et les impacts directs de la mise en œuvre de la technologie (impacts secondaires). L'enjeu plus global du projet est donc de mettre en relation les notions « d'état du sol » et « d'impacts environnementaux » en apportant une réflexion autour des fonctions et services rendus par les sols.

Le programme technique du projet SOLENV est divisé en quatre phases :

- La phase 1 qui porte sur les outils d'évaluation environnementale.
- La phase 2, sur laquelle porte ce rapport, traite de l'évaluation des impacts générés par les technologies de remédiation (impacts secondaires).
- La troisième phase du projet, fait la synthèse du travail réalisé par le BRGM sur l'étude du milieu sol et sur la caractérisation des impacts de la mise en œuvre de technologies de traitement sur les fonctions des sols et les impacts primaires.
- Une phase de synthèse, présente les principaux résultats du projet et des recommandations afin de mieux prendre en compte les performances environnementales des technologies de traitement des sols et des eaux souterraines.

L'objectif de la présente tâche est d'apprécier les impacts générés par la mise en œuvre de différentes techniques de traitement des sols et des eaux souterraines appliquées à des cas d'études. Ce rapport se décompose en deux parties principales :

- La première est consacrée aux technologies de traitement. Ce chapitre décrit les différentes techniques mises en œuvre pour le traitement des sols et eaux souterraines pollués, ainsi que les milieux potentiellement impactés.
- La seconde partie propose une évaluation des impacts secondaires de différentes technologies appliquées à 4 cas d'étude (représentatifs des types de pollutions fréquemment rencontrés en France). Ce chapitre, présente, pour chaque technologie appliquée aux cas d'étude, un inventaire détaillé des paramètres pris en compte, la définition du système retenu pour réaliser l'évaluation environnementale, et in fine les résultats obtenus.

2. Technologies de traitement

2.1. PRESENTATION DES GRANDES FAMILLES DE PROCEDE DE DEPOLLUTION

D'une manière générale, les différentes techniques de dépollution peuvent être classées en fonction de la nature des procédés employés, à savoir :

- Les procédés physiques : le principe consiste à utiliser des fluides (eau ou gaz), présents dans le sol ou injectés, comme vecteur pour transporter la pollution vers des points d'extraction ou pour l'immobiliser.
- Les procédés biologiques : ils consistent à utiliser des micro-organismes, le plus souvent des bactéries (mais aussi des champignons et des végétaux), pour favoriser la dégradation partielle ou totale des polluants. Certains bioprocédés permettent aussi de fixer ou de solubiliser certains polluants.
- Les procédés thermiques : ils utilisent la chaleur pour détruire le polluant (ex : incinération), l'extraire (ex : désorption thermique, thermolyse, etc.), ou le rendre inerte (ex : vitrification, etc.).
- Les procédés chimiques : ils utilisent les propriétés chimiques des polluants pour, à l'aide de réactions appropriées, les inerte (précipitation, etc.), les détruire (oxydation, etc.) ou les séparer du milieu pollué (surfactants, etc.).

Les techniques de dépollution peuvent aussi être classées en fonction du lieu de traitement :

- Traitements hors site (ou ex situ) : ils supposent l'excavation/extraction du milieu pollué (déchets, terre, eau) et son évacuation vers un centre de traitement adapté (incinérateur, centre d'enfouissement technique, etc.).
- Traitements sur site (ou on site) : ils consistent à excaver les terres ou les eaux polluées et à les traiter sur le site même.
- Traitements in situ (ou en place) : ils correspondent à un traitement sans excavation : le sol et les eaux souterraines sont laissés en place. Il s'agit alors soit d'extraire le polluant seul, soit de le dégrader ou de le fixer dans le sol ou dans l'aquifère.
- Confinement : il consiste à empêcher / limiter la migration des polluants ; il peut être réalisé *in situ* ou sur site.

Le tableau 1 synthétise les techniques les plus courantes recensées actuellement.

Tableau 1 : Classement des méthodes de dépollution (adapté de Lecomte, 1998)

Techniques	<i>In situ</i>	<i>Ex situ</i> ou on site
Méthodes physiques par évacuation de la pollution	<ul style="list-style-type: none"> • Ventilation de la zone non saturée • Extraction double phase • Barbotage <i>in situ</i> (ou injection et bullage d'air <i>in situ</i>) • Pompage et traitement • Pompage/écrémage 	<ul style="list-style-type: none"> • Excavation des sols • Tri granulométrique • Lavage à l'eau
Méthodes physiques par piégeage de la pollution	<ul style="list-style-type: none"> • Confinement par couverture et étanchéification • Confinement vertical • Piège hydraulique ou confinement hydraulique • Solidification/stabilisation <i>in situ</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Encapsulation on site • Elimination en centres de stockage des déchets • Solidification/stabilisation
Méthodes chimiques	<ul style="list-style-type: none"> • Lavage <i>in situ</i> • Oxydation chimique <i>in situ</i> • Réduction chimique <i>in situ</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en solution et extraction chimique • Oxydation et réduction chimiques
Méthodes thermiques	<ul style="list-style-type: none"> • Vitrification • Désorption thermique <i>in situ</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Incinération • Désorption thermique • Vitrification • Pyrolyse
Méthodes biologiques	<ul style="list-style-type: none"> • Biodégradation <i>in situ</i> dynamisée • Bioventing • Biosparging • Atténuation naturelle contrôlée • Phytoremédiation 	<ul style="list-style-type: none"> • Bioréacteur • Bioterre • Compostage • Landfarming
Autres	<ul style="list-style-type: none"> • Barrières perméables réactives • Electoremédiation 	

Le tableau suivant présente les techniques de dépollution on site des eaux et des gaz extraits.

Tableau 2 : Classement des méthodes de traitement des eaux et des gaz extraits (adapté de Lecomte, 1998)

Traitement des rejets aqueux	<ul style="list-style-type: none"> • Récupération des produits purs • Prétraitement des eaux souterraines • Stripping à l'air • Photo-oxydation sous UV • Adsorption • Bioréacteur (procédés intensifs) • Bioréacteurs (procédés extensifs) 	<ul style="list-style-type: none"> • Séparation par membrane • Oxydoréduction • Echange d'ions • Précipitation, coagulation-floculation, décantation • Filtration
Traitement des rejets atmosphériques	<ul style="list-style-type: none"> • Adsorption • Absorption (ou lavage) • Condensation • Procédés d'oxydation thermique • 	<ul style="list-style-type: none"> • Photo-oxydation • Réduction thermique • Bioréacteurs • Méthodes de dépoussiérage

Les principes de différentes techniques sont présentés dans les tableaux suivants, dans un ordre identique à celui du tableau 1.

Tableau 3 : Présentation des différentes techniques de dépollution *in situ*, on site et ex situ.

Techniques	Principes et variantes
Techniques de dépollution <i>in situ</i> (avec traitement sur site ou hors site des produits récupérés)	
Méthodes physiques par évacuation de la pollution	
Ventilation de la zone non saturée (venting)	Le venting consiste à extraire des composés organiques volatils par mise en dépression de la zone non saturée.
Extraction double phase (dual phase extraction ou slurping ou multi-phase extraction)	L'extraction double phase consiste à exercer une dépression importante dans la zone non saturée, au niveau de la frange capillaire et de la partie supérieure de la zone saturée, ce qui a pour but d'extraire les gaz des sols, le surnageant (cas des produits flottants) et la phase dissoute. Les liquides et gaz extraits font l'objet d'une séparation et d'un traitement spécifique et séparé.
Barbotage <i>in situ</i> ou injection et bullage d'air <i>in situ</i> (sparging)	Le sparging repose sur le même principe que le venting mais son application est réalisée dans la zone saturée et dans la frange capillaire. Aussi, l'air injecté dans la nappe (et non dans la zone non saturée comme dans le venting) va favoriser la volatilisation des polluants qui seront extraits au niveau de la zone vadose et traités sur site. Le sparging est souvent couplé au venting.
Pompage et traitement (pump and treat)	Le pompage et traitement consiste à extraire les eaux souterraines polluées et à les traiter on site avant rejet (ou à les éliminer en centres agréés). Le type de traitement varie en fonction des polluants, des débits et des pourcentages épuratoires à atteindre.
Pompage-écrémage (skimming)	En présence de surnageant, les eaux souterraines sont pompées, ce qui génère un cône de rabattement. Les produits en phase pure s'accumulent gravitairement au centre de ce cône, facilitant ainsi leur récupération en surface.
Techniques	Principes et variantes
Méthodes physiques par piégeage de la pollution	
Confinement par couverture et étanchéification (containment, landfill cap)	Le confinement n'est pas un traitement en tant que tel. Il consiste à isoler les contaminants de façon à prévenir d'une manière pérenne leur propagation. De telles mesures de confinement doivent être pérennes dans le temps et doivent être adaptées aux usages du site.
Confinement vertical (slurry trenches, slurry walls, underground barriers)	Le confinement n'est pas un traitement en tant que tel. Il consiste à : isoler les contaminants de façon à prévenir d'une manière pérenne leur propagation. Le but du confinement vertical est multiple : mise en place d'une barrière entre la source de pollution et les eaux souterraines/les eaux superficielles, renforcement de la stabilité mécanique du stockage, etc.
Piège hydraulique ou confinement hydraulique (hydraulic containment techniques, pumping, cut-off trenches and drains)	Le piège hydraulique ou confinement hydraulique n'est pas un traitement en tant que tel. Il consiste seulement à maintenir les eaux souterraines polluées dans un espace prédéfini afin de ne pas générer de pollution en aval. Ce confinement peut être réalisé de manière active (par pompage) ou de manière passive (via des tranchées drainantes).

Techniques	Principes et variantes
Solidification/stabilisation <i>in situ</i> (Solidification/stabilisation <i>in situ</i> , deep soil mixing, jet grouting)	Les procédés de solidification et de stabilisation ont pour but de piéger les polluants afin de réduire leur mobilité. La solidification consiste à lier physiquement ou à emprisonner les polluants au sein d'une masse stable, dure et inerte. La stabilisation consiste à transformer chimiquement un polluant lessivable en un composé peu ou non soluble ou/et à augmenter les capacités de sorption du polluant avec les matériaux par mélange avec différents adjuvants afin de les rendre moins mobilisables.
Méthodes chimiques	
Lavage <i>in situ</i> (soil flushing)	Ce procédé consiste à lessiver les sols sans excavation (zones saturée et non saturée) par injection d'eau (et d'agents mobilisateurs en solution) en amont ou au droit de la source de pollution. Par la suite, les eaux polluées sont pompées, traitées en surface, puis rejetées dans les réseaux d'eaux usées/eaux pluviales, les eaux superficielles ou dans certains cas réinjectées dans la nappe.
Oxydation chimique <i>in situ</i> (In Situ Chemical Oxidation)	L'oxydation chimique <i>in situ</i> consiste à injecter un oxydant dans les sols (zones saturée et non saturée) sans excavation. Cet oxydant va détruire totalement ou partiellement les polluants. Ce procédé permet donc d'aboutir à la destruction des polluants (transformation en eau, gaz carbonique et sels) ou à la formation de sous-produits de dégradation généralement plus biodégradables.
Réduction chimique <i>in situ</i> (In Situ Chemical Reduction)	La réduction chimique <i>in situ</i> consiste à injecter un réducteur dans les sols (zones saturée et non saturée) sans excavation. Ce réducteur est utilisé dans le but : i.) soit de détruire totalement ou partiellement des polluants organiques (minéralisation totale des polluants ou formation de sous-produits de dégradation généralement plus biodégradables) ; ii.) soit de réduire les polluants inorganiques afin de les stabiliser ou les rendre moins toxiques.
Méthodes thermiques	
Désorption thermique <i>in situ</i> (<i>in situ</i> heating (low temperature, <i>in situ</i> heating, SVE with thermal enhancement)	La désorption thermique <i>in situ</i> , issue de l'amélioration de procédé de venting, consiste à appliquer de la chaleur pour extraire du sol par volatilisation les polluants volatils et semi-volatils.
Vitrification <i>in situ</i>	Ce procédé consiste à solidifier/stabiliser les sols par élévation de la température afin de le transformer en un matériau fondu qui se vitrifie en se refroidissant.
Méthodes biologiques	
Biodégradation dynamisée (Enhanced Biodegradation/Bioremediation, Enhanced Natural Attenuation)	L'atténuation naturelle dynamisée ou biodégradation dynamisée <i>in situ</i> nécessite l'ajout de composés spécifiques dans les sols ou les eaux souterraines afin de créer les conditions favorables à l'activité des microorganismes responsables de la biodégradation des contaminants. Pour ce faire, les microorganismes sont maintenus dans les conditions optimales (oxygène, pH, température, potentiel d'oxydoréduction) et des nutriments sont ajoutés essentiellement sous forme liquide.
Bioventing	Le bioventing est un traitement biologique aérobie qui consiste à stimuler la biodégradation dans la zone non saturée par apport d'oxygène.
Biosparging	Le biosparging est un traitement biologique aérobie qui consiste à stimuler la biodégradation dans la zone saturée et la zone capillaire par apport d'oxygène. Le biosparging est souvent couplé au bioventing.

Techniques	Principes et variantes
Atténuation naturelle contrôlée (monitored natural attenuation)	« Processus se produisant naturellement dans les sols et les eaux souterraines, sans intervention humaine, visant à réduire la masse, la toxicité, la mobilité, le volume ou la concentration des contaminants dans ces milieux. Les processus pris en considération sont : la dispersion, la dilution, la volatilisation, l'adsorption, les mécanismes de stabilisation ou de destruction des polluants, qu'ils soient physiques, chimiques ou biologiques. »
Phytoremédiation	La phytoremédiation consiste à employer des plantes pour traiter les sols de subsurface par dégradation, transformation, volatilisation ou stabilisation. D'une manière générale, les composés inorganiques sont immobilisés ou extraits alors que les composés organiques sont dégradés.
Autres	
Barrière perméable réactive (permeable reactive barrier ou treatment wall)	Une Barrière Perméable Réactive (BPR) est constituée d'une zone perméable de matériaux réactifs (métaux réducteurs, accepteurs ou donneurs d'électrons, adsorbants, lit bactérien,...) située sur le passage d'un panache d'eau souterraine polluée. Par écoulement advectif naturel au travers de la barrière, les polluants présents dans les eaux souterraines sont dégradés en éléments non nocifs (organiques) ou adsorbés/complexés (organiques, métaux et métalloïdes) par le réactif.
Electroremédiation (electrokinetic extraction; electromigration, electrokinetic separation)	L'électroremédiation est un procédé <i>in situ</i> qui permet de séparer et d'extraire les métaux et certains polluants organiques polaires de la zone saturée et non saturée.
Techniques de dépollution ex situ ou on site	
Méthodes physiques par évacuation de la pollution	
Excavation des sols (excavation)	L'excavation ne constitue pas un procédé de traitement en tant que tel ; elle doit être accompagnée d'actions complémentaires afin de traiter et/ou stocker les terres excavées. Elle ne constitue donc qu'une phase préliminaire de traitement/réhabilitation.
Tri granulométrique (separation)	Le tri granulométrique permet de séparer les différentes fractions des sols. Les fractions fines qui représentent souvent les fractions les plus polluées sont ainsi isolées avant traitement.
Lavage à l'eau (soil washing)	Le lavage à l'eau est un procédé couramment employé après le tri granulométrique. Les contaminants adsorbés sur les particules fines, préalablement séparées des particules grossières, sont transférés vers la phase aqueuse (ou la solution extractante). Cette solution polluée est par la suite traitée. Afin d'augmenter les transferts des polluants des particules fines vers les eaux, il est couramment fait usage d'ajouts d'agents chélatants, d'ajustement de pH, d'ajouts de surfactants (on parle alors d'extraction chimique).
Méthodes physiques par piégeage de la pollution	
Encapsulation on site (infilling)	Le procédé d'encapsulation consiste à enfermer physiquement sur site les sols par un dispositif de parois, couverture et fonds très peu perméables.
Elimination en centres de stockage des déchets (landfill)	Hors site, la mise en décharge consiste à diriger les terres polluées dans des installations de stockage des déchets en fonction de leur degré de pollution et de leur potentiel de lixiviation.
Solidification/stabilisation	Les procédés de solidification et de stabilisation ont pour but de piéger les polluants afin de réduire leur mobilité. La solidification consiste à lier physiquement ou à emprisonner les polluants au sein d'une masse stable, dure et inerte. La stabilisation consiste à transformer chimiquement un polluant lessivable en un composé peu ou non soluble ou/et à augmenter les capacités de sorption du polluant avec les matériaux par mélange avec différents adjuvants afin de les rendre moins mobilisables. Le traitement est réalisé sur site ou ex situ préalablement à l'enfouissement des sols.

Techniques	Principes et variantes
Techniques de dépollution <i>ex situ</i> ou on site	
Méthodes chimiques	
Mise en solution et extraction chimiques	Cette technique est basée sur l'extraction des contaminants adsorbés sur les sols par des agents chimiques adaptés. On distingue deux techniques différentes : 1) extraction chimique qui a pour but de dissoudre les polluants métalliques dans l'eau, 2) extraction à l'aide de solvants plus spécifiquement adaptée aux polluants organiques. La filière de traitement est très proche du lavage à l'eau. Les étapes de traitement reposent donc sur un mélange intime entre la solution extractante et les sols homogénéisés puis une séparation de la solution extractante et des polluants.
Oxydation et réduction chimiques (Chemical Reduction/Oxidation)	Les procédés d'oxydation/réduction permettent de dégrader et transformer les polluants contenus dans les sols pollués excavés en éléments non toxiques (plus stables, moins mobiles ou inertes). Le procédé repose donc sur un mélange intime entre les oxydants/réducteurs et les sols homogénéisés.
Méthodes thermiques	
Incinération (incineration)	L'incinération est une des techniques de traitement les plus anciennes. Son principe repose sur une combustion aérobie (en présence d'air) dans un four où les températures sont importantes (870 à 1 200 °C). Ces hautes températures détruisent les polluants ou les volatilisent.
Désorption thermique (High Temperature Thermal Desorption / Low Temperature Thermal Desorption)	La désorption thermique consiste à appliquer de la chaleur pour extraire par volatilisation les polluants volatils et semi-volatils des sols excavés. La température utilisée est inférieure à celle nécessaire pour l'incinération.
Vitrification	La vitrification est un traitement thermique qui a pour but de solidifier/stabiliser les sols excavés par élévation de la température afin de les transformer en un matériau fondu qui se vitrifie en se refroidissant.
Pyrolyse ou thermolyse (pyrolysis)	La pyrolyse consiste à chauffer les sols en l'absence d'oxygène pour en extraire les polluants volatils et semi-volatils.
Méthodes biologiques	
Bioréacteur (bioslurry)	La technique consiste à mélanger les sols pollués avec de l'eau et divers additifs afin de former un mélange boueux et de mettre les particules de sols en suspension dans l'eau. Les boues sont traitées par voie biologique dans des bioréacteurs puis sont déshydratées.
Bioterre (biopile)	Le biotierre consiste à mettre des sols pollués en tas en vue d'un traitement biologique. Pour ce faire les sols pollués font généralement l'objet d'un amendement et les conditions dans le biotierre sont contrôlées (aération, ajouts de nutriments ...).
Compostage (composting)	Le compostage consiste à mélanger des sols excavés avec des amendements organiques (dénommés compost) et à les disposer en tas trapézoïdaux (andains) régulièrement espacés afin de favoriser la biodégradation.
Landfarming	Le procédé consiste à étaler sur une faible épaisseur des sols pollués sur un support imperméable et de favoriser, via des techniques agricoles classiques, leur biodégradation aérobie.

Le tableau suivant présente les différentes techniques de dépollution des eaux souterraines pompées.

Tableau 4 : Présentation des différentes techniques de dépollution de rejets aqueux sur site

Techniques	Principes et variantes
Traitement des rejets aqueux on site	
Récupérateurs des produits purs	Le principe de la séparation eaux souterraines/produit pur (free product ou produit en phase libre) repose sur le caractère non miscible de ces produits ainsi que sur la différence de densité. La technologie la plus souvent utilisée est le débourbeur/déshuileur.
Stripping à l'air	Ce procédé non destructif implique un transfert de polluants organiques dissous dans les eaux souterraines vers l'air (par volatilisation). Le procédé repose sur un mélange et un temps de contact suffisant pour permettre un transfert et donc une épuration importante.
Photo-oxydation sous UV	Cette technique permet d'oxyder les polluants organiques en dioxyde de carbone et en eau. L'oxydation est rendue possible grâce à la formation du radical hydroxyle (OH°), présentant un fort pouvoir oxydant, et capable d'oxyder une très grande majorité des polluants organiques.
Adsorption	Cette technique est basée sur l'adsorption des polluants organiques sur un matériau positionné dans un container. Il existe de nombreux produits adsorbants sur le marché ; néanmoins, compte tenu de son rapport performance/prix, le charbon actif est le plus utilisé.
Bioréacteurs (procédés intensifs)	Les eaux polluées sont mises en contact avec des microorganismes au sein de réacteurs afin d'assurer leur dépollution. On distingue deux types de bioréacteurs, parfois utilisés ensemble : les procédés à cultures libres (boues activées) et les procédés à cultures fixées (lits bactériens, disques biologiques).
Bioréacteurs (procédés extensifs)	Cette technique consiste à faire transiter les eaux usées dans plusieurs bassins de faibles profondeurs pendant une longue période durant laquelle les processus de dégradation naturels se mettent en place via l'action des microorganismes, des végétaux (microphytes et macrophytes), du vent et du soleil. Le processus est généralement aérobie ; l'apport d'oxygène est réalisé par échange avec l'atmosphère, par l'action chlorophyllienne des végétaux ou parfois artificiellement.
Séparation par membrane	Le principe de ces techniques (essentiellement l'osmose inverse et l'ultrafiltration) est d'exercer une pression sur les eaux souillées afin que celles-ci traversent une membrane. Les polluants présents en phase dissoute sont partiellement retenus (les composés de faibles poids moléculaires traversent les membranes alors que ceux de poids moléculaires plus élevés sont retenus).
Oxydo-réduction	Les réactions d'oxydoréduction sont utilisées pour transformer les métaux/métalloïdes en composés plus stables, moins mobiles ou moins toxiques. La définition et le contrôle du pH de la réaction ont une importance capitale lors de cette réaction (diagramme « potentiel-pH »). L'oxydo-réduction permet aussi de détruire les composés organiques.
Échange d'ionsc	Le traitement sur résines échangeuses d'ions consiste à substituer les polluants sous forme cationique ou anionique présents dans les eaux souterraines par des cations et des anions « inoffensifs » de la résine.
Précipitation, coagulation-floculation, décantation	La précipitation implique l'ajout de certains produits chimiques afin de transformer les métaux/métalloïdes dissous en précipités. L'insolubilisation est la plupart du temps réalisée à l'aide d'ajout de composés alcalins de type soude (NaOH) ou chaux [Ca(OH) ₂] aux eaux souterraines, ce qui a pour effet d'augmenter le pH et de causer la précipitation des cations métalliques.
Filtration	La filtration est un procédé d'épuration consistant à faire passer un liquide chargé en matières en suspension à travers un milieu poreux (filtre) afin de retenir les solides et laisser passer les liquides (filtrats). Il existe deux types de filtration : filtration sur support et filtration en profondeur ou dans la masse

Le tableau suivant présente les différentes techniques de dépollution des gaz pompés.

Tableau 5 : Présentation des différentes techniques de dépollution de rejets atmosphériques sur site

Techniques	Principes et variantes
Traitement des rejets atmosphériques on site	
Adsorption	Cette technologie de dépollution consiste à piéger les polluants gazeux par adsorption sur un matériau poreux, le plus souvent du charbon actif.
Absorption (ou lavage)	L'absorption consiste à réaliser l'opération inverse du stripping ; en effet, il s'agit de procéder à un lavage des gaz afin de transférer les polluants de la phase gazeuse à la phase liquide. Le transfert de matière est réalisé au sein de réacteurs gaz-liquide dans lesquels les deux phases sont mises en contact.
Condensation	Cette technique est couramment utilisée pour traiter les effluents gazeux chauds (notamment ceux issus de traitements thermiques). La condensation des polluants gazeux peut être réalisée en diminuant la température des gaz (à une pression constante) via des échangeurs thermiques ou/et en augmentant la pression des gaz. Les polluants sont alors récupérés sous forme liquide et traités.
Procédés d'oxydation thermiques	L'oxydation thermique classique (incinération) est une technologie qui consiste à éliminer les composés organiques combustibles via une réaction à haute température en présence d'oxygène. Lorsque la réaction est complète, les produits de la dégradation sont le CO ₂ et l'H ₂ O. on distingue l'oxydation catalytique, la photo-oxydation et le brûlage à la torche.
Photo-oxydation	L'oxydation est rendue possible grâce à la formation du radical hydroxyle (OH [•]), présentant un fort pouvoir oxydant, et capable d'oxyder la très grande majorité des polluants organiques
Réduction thermique	Ce procédé consiste à chauffer les gaz pollués à des températures de 800 à 900 °C, en présence d'hydrogène afin de provoquer leur réduction
Bioréacteurs	Le but des bioréacteurs est de réaliser un transfert des polluants gazeux vers la phase liquide et de procéder aux réactions de biodégradation. Il existe différents types de bioréacteurs : les biofiltres, les filtres percolateurs et les biolaveurs. Les biofiltres sont le plus couramment utilisés dans le domaine des sites et sols pollués.
Dépoussiéreurs	Les dépoussiéreurs permettent de maîtriser les impacts de poussières émises lors des opérations de transport et stockage des terres. On distingue les cyclones, les dépoussiéreurs humides (ou laveurs), les électrofiltres et les filtres.

2.2. PRESENTATION DES MILIEUX POTENTIELLEMENT IMPACTES PAR LES PROCÉDES DE DEPOLLUTION

Les techniques de dépollution précédemment mentionnées génèrent des rejets dans différents milieux dépendamment des procédés en jeux (sols, eaux souterraines, eaux superficielles, air). Ces rejets traités via des techniques plus ou moins performantes (dépendamment des seuils de dépollution) sont pollués à différentes concentrations et peuvent, de ce fait, générer des impacts dans les différents milieux. Le tableau suivant récapitule les différents milieux de rejets de ces techniques.

Tableau 6 : Présentation des différentes techniques de dépollution avec rejets dans les différents milieux associés

Techniques	Milieux potentiels de rejet de la technique de dépollution			
	Milieux sols	Milieux eaux souterraines	Milieux eaux superficielles	Milieu air
Techniques de dépollution <i>in situ</i> (avec traitement sur site ou hors site des produits récupérés)				
Méthodes physiques par évacuation de la pollution				
Ventilation de la zone non saturée				X
Extraction double phase		X	X	X
Barbotage <i>in situ</i> ou injection et bullage d'air <i>in situ</i>				X
Pompage et traitement		X	X	X*
Pompage-écrémage		X	X	X*
Méthodes physiques par piégeage de la pollution				
Confinement par couverture et étanchéification	X			
Confinement vertical	X			
Piège hydraulique ou confinement hydraulique		X	X	X*
Solidification/stabilisation <i>in situ</i>	X			
Méthodes chimiques				
Lavage <i>in situ</i>		X	X	X*
Oxydation chimique <i>in situ</i>		X	X	X*
Réduction chimique <i>in situ</i>		X	X	X*
Méthodes thermiques				
Désorption thermique <i>in situ</i>	X			X
Vitrification <i>in situ</i>	X			X
Méthodes biologiques				
Biodégradation dynamisée				X*
Bioventing				X
Biosparging				X
Atténuation naturelle contrôlée				X*
Phytoremédiation				
Autres				

Techniques	Milieux potentiels de rejet de la technique de dépollution			
	Milieux sols	Milieux eaux souterraines	Milieux eaux superficielles	Milieu air
Barrière perméable réactive				
Electroremédiation	X			
Techniques de dépollution ex situ ou on site				
Méthodes physiques par évacuation de la pollution				
Excavation des sols	X			
Tri granulométrique	X			X*
Lavage à l'eau	X	X	X	X*
Méthodes physiques par piégeage de la pollution				
Encapsulation on site et élimination en centres de stockage des déchets	X			
Solidification/stabilisation	X			
Techniques de dépollution ex situ ou on site				
Méthodes chimiques				
Mise en solution et extraction chimiques	X	X	X	X*
Oxydation et réduction chimiques	X	X	X	X*
Méthodes thermiques				
Incinération	X			X
Désorption thermique	X			X
Vitrification	X			X
Pyrolyse ou thermolyse	X			X
Méthodes biologiques				
Bioréacteur	X	X	X	X*
Bioterre				X*
Compostage				X*
Landfarming				X*
Traitement des rejets aqueux on site				
Récupérateurs des produits purs		X	X	X*
Stripping à l'air		X	X	X*
Photo-oxydation sous UV		X	X	

Techniques	Milieux potentiels de rejet de la technique de dépollution			
	Milieux sols	Milieux eaux souterraines	Milieux eaux superficielles	Milieu air
Adsorption		X	X	
Bioréacteurs (procédés intensifs)		X	X	X*
Bioréacteurs (procédés extensifs)		X	X	X*
Séparation par membrane		X	X	
Oxydo-réduction		X	X	X*
Échange d'ions		X	X	
Précipitation, coagulation-floculation, décantation		X	X	X*
Filtration		X	X	X*
Traitement des rejets atmosphériques on site				
Adsorption				X
Absorption (ou lavage)		X	X	X
Condensation		X	X	X
Procédés d'oxydation thermiques				X
Photo-oxydation				X
Réduction thermique				X
Bioréacteurs				X
Dépoussiéreurs				X

* : en assumant que les composés sont volatils

Les milieux considérés tiennent compte uniquement des milieux de rejets ; par exemple, le milieu air pour le venting. Par ailleurs, il n'a pas été tenu compte de mauvais fonctionnement des techniques de dépollution ; par exemple, un confinement bien réalisé aura un impact pratiquement nul sur le milieu eaux souterraines.

Ce tableau met en lumière les milieux impactés par les rejets des procédés de dépollution et démontre, par la même, la nécessité de prendre en compte les différents milieux dans l'évaluation des impacts globaux d'une technique de dépollution.

3. Evaluation des impacts secondaires

3.1. DEFINITION DES IMPACTS SECONDAIRES

Les impacts secondaires découlent directement de la mise en œuvre des techniques de dépollution et concernent tous les effets de ces techniques autres que l'abatement de la teneur en polluants. Il s'agit donc, dans le cadre de cette tâche, de réaliser un inventaire de tous les intrants et extrants du système (les émissions vers l'air, l'eau, le sol abordés dans le chapitre précédent et, les consommations d'énergies et de matières premières).

3.2. PRESENTATION GENERALE DES CAS D'ETUDE

Les impacts environnementaux de différentes techniques de dépollution (impacts secondaires) ont été estimés via différents cas d'études réels (partiellement adaptés pour les besoins de l'étude). Pour ce faire, quatre types de sites pollués, représentatifs de pollution couramment rencontrées, ont fait l'objet d'études de dimensionnement de dépollution détaillées (Rq : les solutions prises en compte permettent d'atteindre des risques sanitaires acceptables après traitement).

Les sites pris en considération sont les suivants :

- Site 1 : pollution des sols et de la nappe par du FOD (fioul ordinaire domestique) avec présence de surnageant,
- Site 2 : pollution des sols par des métaux et des métalloïdes,
- Site 3 : pollution des sols par du FOD,
- Site 4 : pollution des sols et de la nappe par des solvants chlorés.

Les cas d'études pris en considération sont représentatifs d'une part importante des sites pollués en France. Ainsi, d'après Basias, les pollutions organiques représentent 80 % des sites pollués ; les hydrocarbures pétroliers et les solvants chlorés représentant respectivement 39 % et 14% de ces cas. Les pollutions relatives aux métaux et métalloïdes, représentant 20 % des cas de pollution, ont également été pris en considération.

Le tableau 6 présente succinctement ces quatre sites ainsi que les technologies de dépollution prises en considération pour chacun d'entre eux (variantes de dépollution). Les présentations détaillées des sites sont exposées dans le chapitre 3.3. Les techniques de dépollution considérées sont spécifiques des pollutions et des contextes hydrogéologiques spécifiés.

Tableau 7 : Liste des différents exemples de dépollution pris en considération

Méthode de dépollution		N° de techniques	Objectif	
Pollution de la nappe par du FOD - Récupération surnageant	Pompage/écrémage	1	Eliminer le surnageant au droit du site afin que l'eau de la nappe réponde aux normes de potabilité à « 500 m » en aval de la source de pollution.	
	Tranchée drainante	2		
	Extraction multiphase	3		
Pollution des sols par des métaux/métalloïdes – Confinement	Recouvrement de surface (terre végétale)	4	Rendre l'usage du sol compatible au droit du site, en éliminant les risques d'ingestion	
	Recouvrement de surface (enrobé)	5		
	Recouvrement de surface (béton)	6		
	Encapsulation	7		
	Phytostabilisation	8		
Pollution des sols par du FOD - Traitement biologique	Biotertre	9		
	Compostage	10		
	Landfarming	11		
Pollution de la nappe par des COHV - Récupération plongeant/air dissous	Sparging/venting	12		Rendre l'usage du sol compatible au droit du site en éliminant les risques par inhalation ; l'eau de la nappe doit répondre aux normes de potabilité à « 500 m » en aval de la source de pollution.
	ISCR/Bio. Anaérobie	13		
	ISCO	14		
	BPR	15		
	Atténuation naturelle	16		

Certaines des techniques étudiées font partie des plus utilisées sur le marché des sites et sols pollués en France. Elles peuvent être considérées comme étant relativement représentatives du panel des techniques les plus employées. (cf. figures suivantes).

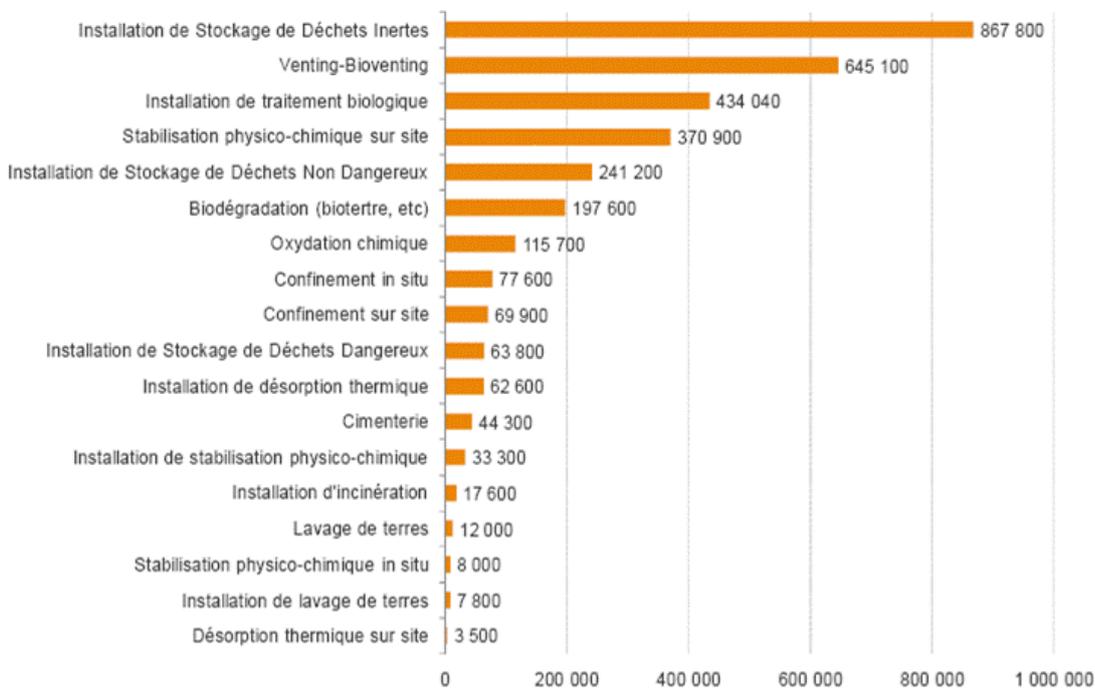


Figure 1 : Classement des filières et techniques de traitement des sols par tonnage décroissant (ADEME et Ernst & Young, 2009)

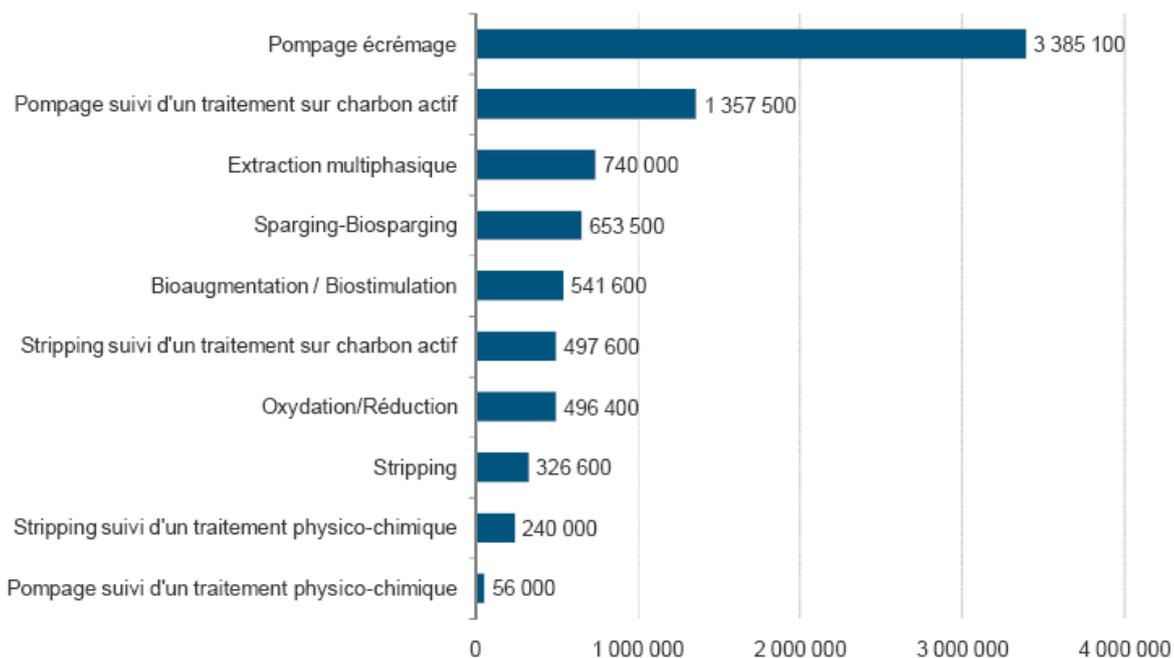


Figure 2 : Classement des filières et techniques de traitement des eaux par volume traité décroissant (ADEME et Ernst & Young, 2009)

Bien que peu usitée, la phytostabilisation, considérée comme étant une technique douce, a été prise en compte dans l'étude à des fins de comparaison avec d'autres techniques de dépollution.

3.3. DEFINITION DU CHAMPS ET DES OBJECTIFS EN VUE DE L'EVALUATION DES TECHNOLOGIES DE TRAITEMENT DE SOL ET DES EAUX SOUTERRAINES

Ce chapitre a pour objet de définir le cadre qui a été retenu pour réaliser l'évaluation environnementale des procédés de dépollution appliqués aux différents cas d'études.

3.3.1. Définitions des objectifs pour les différents cas d'études.

Le tableau 8 présente les objectifs qui ont été définis pour chacun des cas d'étude, c'est à dire la raison d'être de l'action de remédiation envisagée. La comparaison des technologies de traitement à l'aide de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) se fait en fonction de cet objectif.

Tableau 8 : Définition des objectifs pour chaque cas d'étude.

Cas d'étude	Objectif
Site 1 : récupération de surnageant – pollution de la nappe par du FOD	Eliminer le surnageant au droit du site afin que l'eau de la nappe réponde aux normes de potabilité à « 500 m » en aval de la source de pollution.
Site 2 : confinement – pollution des sols par des métaux / métalloïdes	Rendre l'usage du sol compatible au droit du site, en éliminant les risques d'ingestion.
Site 3 : traitement biologique des sols – pollution des sols par du FOD	
Site 4 : récupération du plongeant et de la phase dissoute - pollution de la nappe et de la ZNS par des COHV	Rendre l'usage du sol compatible au droit du site en éliminant/éliminant les risques par inhalation ; l'eau de la nappe doit répondre aux normes de potabilité à « 500 m » en aval de la source de pollution.

- Fonction du système

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. Le tableau 9 présente les fonctions retenues pour chaque cas d'étude.

Tableau 9 : Définition de la fonction du système pour les différents cas d'étude.

Cas d'étude	Fonction du système
Récupération de surnageant – pollution de la nappe par du FOD	Abaisser le taux d'hydrocarbures pour répondre aux normes de potabilisation en aval de la pollution
Confinement – pollution des sols par des métaux / métalloïdes	Eliminer les voies d'expositions pour rendre la libre jouissance du site
Traitement biologique des sols – pollution des sols par du FOD	Abaisser le taux d'hydrocarbures pour rendre la libre jouissance du site
Récupération du plongeant et de la phase dissoute - pollution de la nappe par des COHV	Abaisser le taux de COHV pour rendre la libre jouissance du site et répondre aux normes de potabilisation en aval de la pollution.

- Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle correspond à l'unité de référence qui permet de quantifier le service rendu par une technique de remédiation, donc de la fonction précédemment définie. Pour chaque cas d'étude, 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. 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.

Tableau 10 : Définition de l'unité fonctionnelle pour les différents cas d'étude.

Cas d'étude	Unité fonctionnelle
Site 1 : Récupération de surnageant – pollution de la nappe par du FOD	1 m ³ de sol traité pour répondre aux normes de potabilité de l'eau à 500 m en aval
Site 2 : Confinement – pollution des sols par des métaux / métalloïdes	1 m ² de sol recouvert
Site 3 : Traitement biologique des sols – pollution des sols par du FOD	1 m ³ de sol pollué traité
Site 4 : Récupération du plongeant et de la phase dissoute - pollution de la nappe par des COHV	1 m ³ de sol pollué traité

Ensuite, en fonction des différentes techniques mises en œuvre (mise en place de mesures constructives ou non), la quantité de polluants à éliminer dans 1 m³ de sol peut être différente pour atteindre l'objectif d'usage souhaité du sol à dépolluer.

Pour chaque technique évaluée, la quantité de polluant qu'il nécessaire d'éliminer est calculée en fonction des concentrations maximales admissibles (CMA) déterminées sur la base d'Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires (EQRS). Les scénarios d'expositions adoptés pour les calculs sont définis dans l'annexe 1, 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.

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

Cette dernière correspondant à la différence entre la concentration initiale en polluant et la concentration maximale admissible dans un volume d'un m³ de sol. Cette quantité

de polluant à éliminer est ainsi définie comme le flux de référence associé à l'unité fonctionnelle. Le flux de référence est spécifique à chaque technique de dépollution.

Le tableau 11 présente les flux de références associés aux unités fonctionnelles en fonction des sites et des techniques.

Tableau 11 : Flux de références pour les différentes techniques.

Cas d'étude	Technique	Flux de référence
Site 1 : Récupération de surnageant – pollution de la nappe par du FOD	Pompage/écrémage	6,61 kg/m ³
	Tranchée drainante	6,61 kg/m ³
	Extraction multiphase	6,61 kg/m ³
Site 2 : Confinement – pollution des sols par des métaux / métalloïdes	Recouvrement de surface (terre végétale)	1 m ²
	Recouvrement de surface (enrobé)	1 m ²
	Recouvrement de surface (béton)	1 m ²
	Encapsulation	1 m ²
	Phytostabilisation	-
Site 3 : Traitement biologique des sols – pollution des sols par du FOD	Bioterre	7,2 kg/m ³
	Compostage	7,2 kg/m ³
	Landfarming	7,2 kg/m ³
Site 4 : Récupération du plongeant et de la phase dissoute - pollution de la nappe par des COHV	Sparging/venting	0,0758 kg/m ³
	ISCR/Bio. Anaérobie	0,0112 kg/m ³
	ISCO	0,0758 kg/m ³
	BPR	0,0112 kg/m ³
	Atténuation naturelle	0,0112 kg/m ³

Dans le cas du confinement d'un sol pollué par des métaux / métalloïdes (site 2), le flux de références est identique à l'unité fonctionnelle car les techniques visent à couper les expositions aux polluants. La mise en place de mesures constructives telle qu'elles sont proposées pour le site 4, peuvent conduire à des flux de références différents selon les techniques, le calcul des CMA dépendant des voies d'expositions (cf. annexe 1). Il n'en demeure pas moins que les différentes techniques mises en œuvre permettent un usage identique du sol après remédiation et sont par conséquent comparable avec une même unité fonctionnelle et des flux de références s'y rapportant propre à chaque technique.

3.3.2. Définition du système

La définition du système décrit ce qui est pris en compte afin de réaliser l'inventaire du cycle de vie afin de réaliser l'évaluation des impacts secondaires des différentes techniques de remédiation. La figure 3 schématise le système pris en compte pour évaluer les impacts d'une technique de pompage-écrémage.

- Système

Le système étudié prend en compte tous les intrants et les extrants associés aux technologies de traitement des sols et des eaux souterraines.

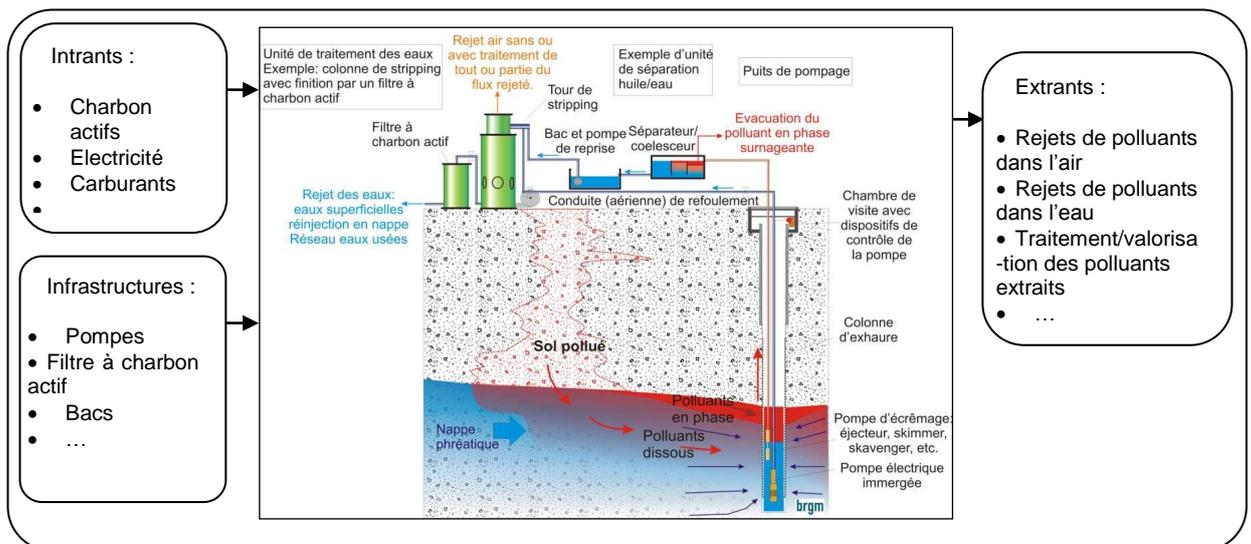


Figure 3 : Exemple de système pris en compte pour l'évaluation environnementale des impacts secondaires

Le système prend en compte :

- Les émissions directes de la technique de traitement, vers l'air, l'eau et le sol.

Ce sont les émissions résultant de la mise en œuvre d'une technique de traitement, par exemple les hydrocarbures rejetés dans l'air ou les eaux de surfaces lors d'un pompage-écrémage, ou encore les émissions résultant de la combustion de carburant par le matériel lors du traitement.

- Les consommations de matières

Ce sont tous les matériaux consommés pour le traitement. Cela peut être des réactifs (charbon actif, engrais, acides, bases...), ou encore des matériaux mis œuvre sur le site (géomembrane, graves, béton armé, asphalte...). Le cycle de production de ces matériaux génère également des pressions environnementales. Pour les évaluer, il est fait appel à des **sous-systèmes** au travers de bases de données d'inventaire de cycle de vie (ICV).

- Les infrastructures

Les impacts associés aux infrastructures correspondent aux impacts résultant de la fabrication des matériels utilisés pour réaliser le traitement ou préparer le site. Les impacts associés à l'utilisation des matériels sont pris en compte précédemment.

Ce sont les matériels utilisés sur le site pendant une durée limitée et qui seront réutilisés sur d'autres sites. Ce sont par exemple, les pompes, les cuves de stockage d'hydrocarbures ou encore les pelleteuses. L'affectation des impacts des infrastructures se fait au prorata de leur utilisation par rapport à leur durée de vie.

Le tableau suivant présente le calcul d'allocation de l'impact d'une pelleteuse utilisée pendant 8 journées de 8 h. L'impact de $3,33 \cdot 10^{-3}$ pelleteuses est alloué au chantier de dépollution.

Tableau 12 : Allocation de l'impact d'une pelleteuse « infrastructure »

	Vie de la pelleteuse	Chantier
Durée de vie (ans)	15 ans	-
Nombre de jours de fonctionnement	160 j	8 j
Nombre d'heures / jours	8 h	8 h
Nombre total d'heures	19200 h	64 h
Impact de la pelleteuse	1 p	0,00333333 p

- Sous-système

Les différents sous-systèmes auxquels il fait appel dans le projet (production de réactif, d'électricité, de carburant...) sont issus des bases de données Ecoinvent, par conséquent la définition du système est celle des "unit process" de Ecoinvent.

- Règles d'affectations

Les règles d'affectations permettent de déduire ou répartir les impacts d'un système lorsque ce dernier apporte un service supplémentaire par rapport à la fonction comparée.

L'affectation des impacts pour les procédés dit multifonctionnels se fait si possible avec une clé physique, sinon monétaire.

Le tableau suivant détaille les règles d'affectation retenues pour les différents cas d'études :

Tableau 13 : Règles d'affectation des impacts pour la valorisation des produits récupérés.

Cas d'étude	Produit valorisé	Mode de compensation
Récupération de surnageant – pollution de la nappe par du FOD	FOD récupéré	Compense du FOD raffiné avec une décote en fonction du PCI du produit prenant en compte la teneur eau du produit récupéré
	Charbon actif	<ul style="list-style-type: none"> • Valorisation énergétique en incinération • Régénération avec un taux de dégradation des charbons de 7 à 10 %

- Modèle énergétique

Les modèles énergétiques sont basés sur les consommations moyennes nationales de France (mix électriques) et les véhicules utilisés pour le transport sont exclusivement diesel.

- Modèle de transport

Afin de simplifier l'étude, nous avons retenu exclusivement du transport routier. Les distances d'approvisionnement ont été évaluées à dire d'expert. Le transport de matériaux est exprimé en tonne.kilomètre (tkm).

Le transport de personnes est exprimé en véhicule.kilomètre (vkm) et se fait en camionnette.

- Modèle de déchets

Il n'y pas de modèles prédéfinis, le traitement des déchets varie en fonction des technologies de traitement des sols. Plusieurs variantes sont possibles en fonction des cas et des techniques (recyclage du FOD ou valorisation énergétique, régénération des charbons actifs...). Les différentes hypothèses spécifiques ont été investiguées afin de tester la sensibilité du système à ces hypothèses.

Si les procédés de traitement génèrent des déchets qui doivent être traités par les techniques habituelles : enfouis ou incinérés alors les hypothèses suivantes sont appliquées :

- L'enfouissement des déchets en ISDND répond à la réglementation en vigueur en France. La valorisation énergétique du biogaz est basée sur le taux de valorisation moyen du biogaz observé en France pour les ISDND de classe 2.
- L'incinération des déchets répond à la réglementation en vigueur en France, la valorisation énergétique est basée sur la valorisation moyenne de l'incinération observée en France : 32 % électrique, 68 % chaleur (SOeS 2007).

3.3.3. Description des procédés sous SIMAPRO[®]

Les bases de données d'inventaire des technologies de traitement des sols sont réalisées à l'aide de l'outil logiciel d'ACV SIMAPRO[®] développé par la société Pré (www.pre.nl). La licence Simapro[®] donne accès à différentes bases de données ACV et en particulier Ecoinvent et la base de l'ELCD¹.

Dans le cadre du projet Solenv, chaque procédé de traitement fait l'objet d'un procédé au format « unit process » sous Simapro. Ce format permet de renseigner uniquement les émissions directes associées au procédé et les consommations de produits (réactifs, carburants du procédé), ces dernières font appel à d'autres procédés issus de la base de données Ecoinvent (ex : Electricity, medium voltage, at grid/FR U).

Un procédé comporte 4 onglets :

- Un onglet documentation qui renseigne les informations sur les sources de données qui ont permis de réaliser l'inventaire pour ce procédé et les informations relatives à la validité du procédé (plage horaire, géographie, technologie, représentativité, etc...)
- Un onglet entrées/sortants où sont renseignées les données d'inventaire :
 - Sortants connus vers la technosphère ; produits et co-produits,
 - Sortants connus vers la technosphère ; produits évités,
 - Entrées connues de la nature (ressources),
 - Entrées connues de la technosphère (matériaux/carburants),
 - Entrées connues de la technosphère (électricité / chaleur),
 - Emissions vers l'air,
 - Emissions vers l'eau,
 - Emissions vers le sol,
 - Flux de déchets finaux,
 - Sortants connus vers la technosphère ; déchets et émissions pour traitement.

Il n'est pas nécessaire de renseigner toutes les « rubriques ».

- Un onglet paramètres qui permet de définir des paramètres d'entrées qui peuvent être utilisés pour calculer les entrants et les sortants.
- Et un onglet description du système qui rappelle la description du système et des sous-systèmes, les règles d'affectations, de troncature, les modèles de transport et énergétiques ainsi que de gestion des déchets.

Les équipements utilisés par les procédés sont décrits par des procédés d'infrastructures (/FR I U).

Les procédés de dépollutions sont regroupés dans la rubrique traitement, sous-rubrique « remediation » :

- Site 1 :
 - FOD : élimination de surnageant, pompage-écrémage, *in situ* /FR U
 - FOD : élimination de surnageant, tranchée-drainante, *in situ* /FR U

¹ ELCD : European Reference Life Cycle Data System

- FOD : élimination de surnageant, triple phase, *in situ* /FR U
- Site 2 :
 - Métaux/métalloïdes : recouvrement (béton), *in situ* /FR U
 - Métaux/métalloïdes : recouvrement (enrobé), *in situ* /FR U
 - Métaux/métalloïdes :recouvrement (terre végétale), *in situ* /FR U
 - Métaux/métalloïdes :encapsulation, on site /FR U
- Site 3 :
 - FOD : compostage, on site /FR U
 - FOD : landfarming, on site /FR U
 - FOD : biotertre, on site /FR U
- Site 4 :
 - COHV : sparging - venting, *in situ* / FR U
 - COHV : oxydation chimique *in situ*, *in situ* / FR U
 - COHV : Barrière Perméable Réactive, *in situ* / FR U
 - COHV : traitement biologique anaérobie, *in situ* / FR U
 - COHV : atténuation naturelle monitorée, *in situ* / FR U

3.3.4. PRésentation détaillée des cas d'études

3.3.5. Site 1 : récupération de surnageant – pollution de la nappe par du FOD

Le site considéré, adapté d'un cas réel, est pollué par des hydrocarbures pétroliers de type FOD. Les solutions de remédiation prises en compte concernent uniquement la récupération de surnageant par des techniques actives et passives. Cette action a pour effet de diminuer l'impact sur les eaux souterraines (phase dissoute) en aval du site. Les solutions de remédiation des sols ne sont pas prises en compte dans ce chapitre. Les concentrations dans les gaz des sols sont compatibles avec un usage industriel au droit du site.

Présentation du site

Le site présente les caractéristiques suivantes.

Tableau 14 : Présentation des caractéristiques du site 1

Paramètres	Quantités	Unités
Caractéristiques du sol et de la nappe		
Type de polluant : FOD		
Surface à traiter :	1500	m ²
Hauteur (surnageant) :	0,3	m
Volume d'hydrocarbures total (produit pur, dans sols, gaz et phase dissoute)	25	m ³
Masse volumique du sol	1,8	t/m ³
Toit de la nappe	3	m
Perméabilité	10 ⁻³	m/s
Porosité : n	0,39	
Paramètre N de Van Genuchten	1,41	
Paramètre α de Van Genuchten	0,61	ft ⁻¹
Saturation irréductible en eau : S_{wr}	0,15	
Saturation résiduelle en surnageant dans la zone non saturée : S_{orv}	0,153	
Saturation résiduelle en surnageant dans la zone saturée : S_{ors}	0,229	
Caractéristiques du fluide		
Densité du contaminant : ρ_o	0.886	gm/cc
Tension de surface air/eau : σ_{aw}	65	dyne/cm
Tension de surface du surnageant (air :LNAPL) : σ_{ao}	27	dyne/cm
Tension interfaciale du surnageant (LNAPL/eau) : σ_{ow}	48	dyne/cm
Viscosité du fluide : μ_o	1,15	cp
Etendue de la lentille de pollution W_t (largeur)* L_t (longueur)	75 * 590	ft ²

Plus particulièrement, les concentrations dans le milieu sols et les eaux souterraines au droit du site sont les suivantes :

Tableau 15 : Présentation des concentrations en hydrocarbures dans les sols et les eaux souterraines du site 1

Composés	Concentrations moyennes (mg/kg) dans les sols	Concentrations moyennes dans les eaux souterraines (µg/l) au droit du site
HCt	12500	> 50 000

Les concentrations dans les gaz des sols sont présentées dans le tableau 9 :

Tableau 16 : Présentation des concentrations en hydrocarbures dans les gaz des sols du site 1

Composés	Concentrations moyennes dans les gaz des sols (µg/m ³)
Benzène	3,93E+01
Toluène	4,17E+01
Ethylbenzène	1,52E+02
Méta- et Paraxylène	9,57E+02
Orthoxylène	8,63E+02
Naphtalène	5,37E+01
Xylènes (Totaux)	2,67E+03
HC Com. ali. C>6-8	2,54E+04
HC Com. ali. C>8-10	5,83E+04
HC Com. C>10-12	2,51E+04
HC Com. C>12-16	1,02E+04
HC Com. ar. C>8-10	3,28E+01
HC Com. ar. C>10-12	2,62E+01
HC Com. ar. C>12-16	2,10E+01

Présentation des solutions de remédiation envisagées

Trois solutions de remédiation ont été envisagées :

- Pompage/écrémage – ce procédé de traitement actif permet de récupérer le surnageant en créant des cônes de rabattement ; il permet de traiter partiellement la phase dissoute ;
- Tranchée drainante – ce procédé de traitement passif permet de récupérer le surnageant dans des massifs drainants ; il permet de traiter partiellement la phase dissoute (mais de manière moins efficace que le pompage-écrémage) ;
- Extraction multi-phase – ce procédé de traitement actif permet de récupérer le surnageant par mise en dépression, mais aussi de récupérer une partie de la phase dissoute et de la phase gazeuse. Les rendements épuratoires de cette technique sont plus importants que ceux des deux techniques précédentes.

Les schémas de principe des procédés utilisés sont présentés dans les figures suivantes.

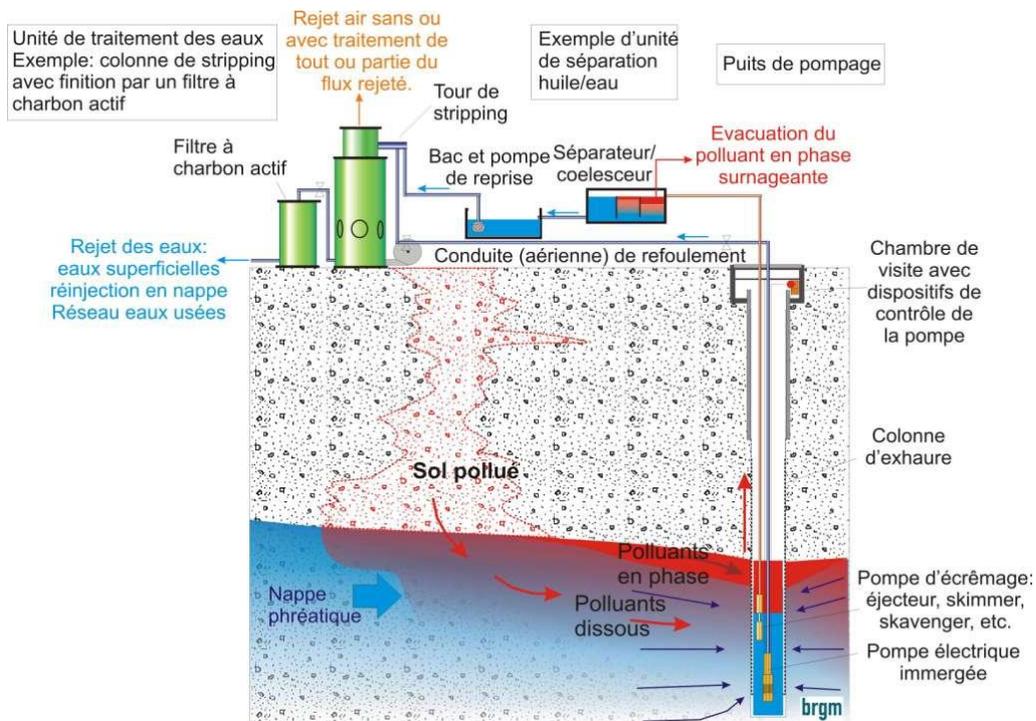


Figure 4 : Schéma de principe du pompage-écrémage (Colombano et al., 2010)

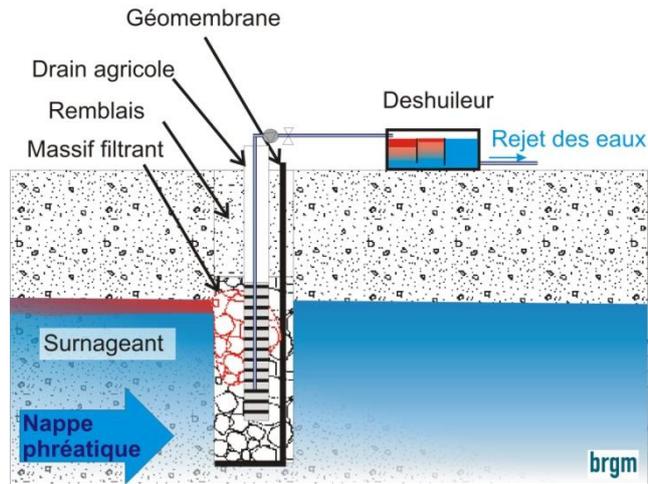


Figure 5 : Schéma de principe de la tranchée drainante (Colombano et al., 2010)

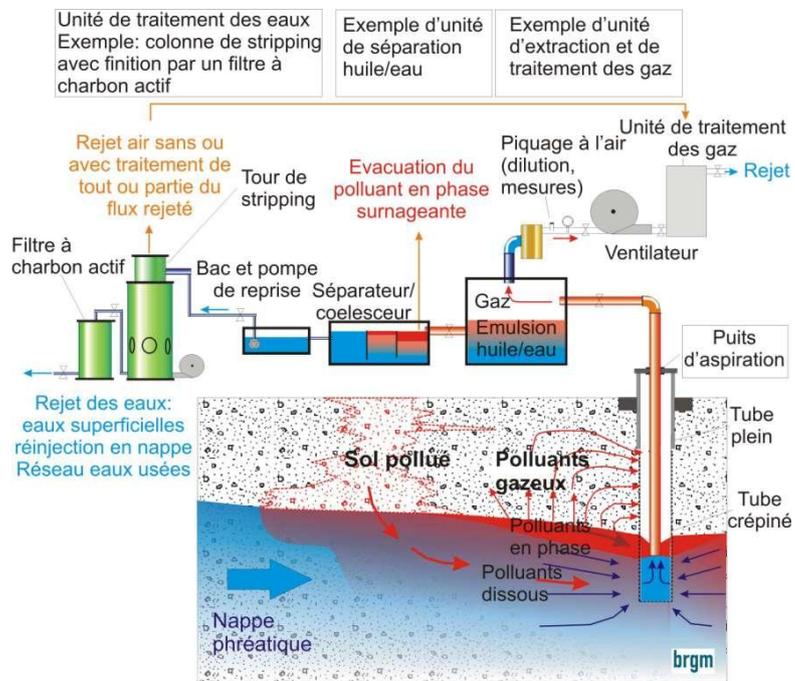


Figure 6 : Schéma de principe de l'extraction multi-phase (réseau unitaire) (Colombano et al., 2010)

Conception des projets de dépollution

Les logiciels utilisés pour dimensionner les unités de récupération du surnageant proviennent de l'American Petroleum Institut (API, 2003) et de données internes du Brgm. Les unités de traitement on site ont été dimensionnées à l'aide de SuperPRo Designer ® et de données internes du Brgm.

Pompage/écrémage

Le pompage/écrémage consiste en la foration de 5 puits de récupération, équipés de 5 pompes de rabattement associées à 5 écrémeurs pneumatiques. Les filières de traitement des eaux pompées consistent en un déshuilage et une filtration sur charbon actif.

Tableau 17 : Description détaillée du pompage-écrémage du site 1 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)

Poste	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarque
Type de pollution					
Volume d'hydrocarbures total	25	m ³	N/A	N/A	surnageant (estimé : HCt dans sols, gaz et phase dissoute)
Volume d'hydrocarbures récupéré	6	m ³	N/A	N/A	surnageant récupéré (pur dans les citernes)
Durée du chantier					
Durée	30	mois	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement par jour	21	heures	N/A	N/A	21 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne
Installation d'extraction					
<u>Pompe de rabattement</u>					
Nombre de pompes de rabattement	5		Oui	5 ans	
Pompe de rabattement (débits)	25	m ³ /h	Oui	5 ans	débit par pompe ; 5 pompes
Puissance des pompes	0,9	kW	N/A	N/A	Puissance nominale par pompe
Consommation			N/A	N/A	
Volume pompé (débits)	125	m ³ /h	Oui	5 ans	Durée de fonctionnement 21 h /24h
Pompe de rabattement (poids)	13,5	kg	N/A	5 ans	Poids de chaque pompe ; inox ; 5 pompes

Poste	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarque
<u>Pompe d'écumage (écumage pneumatique)</u>					
Nombre de pompes d'écumage	5		Oui	5 ans	
Pompe d'écumage (débits max nominal)	45	l/h	Oui	5 ans	
Puissance des pompes	N/A	N/A	N/A	N/A	alimentation via compresseur
Consommation	N/A	N/A	N/A	N/A	alimentation via compresseur
Volume pompé (débits)	225	l/h	Oui	5 ans	Durée de fonctionnement 21 h /24h
Pompe de rabattement (poids)	5	kg	N/A	5 ans	(poids de chaque pompe ; inox ; 5 pompes)
Compresseur (poids)	41	kg	Oui	5 ans	
Compresseur (consommation)	1,5	kW	Oui	5 ans	
Electricité chantier					électricité de l'usine

Réseau d'extraction					
<u>Réseau en surface (des piézomètres au traitement)</u>					
Tuyau (longueur) -réseau d'extraction	160,00	m	Oui	5 ans	
Tuyau (diamètre)	15,00	cm	N/A	N/A	diamètre interne
Poids tuyau (piézomètre)	376,00	kg	N/A	N/A	réseau d'extraction
Matériau	PEHD		N/A	N/A	réseau d'extraction+ piézomètre
<u>Piézomètres</u>					
Tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	35,00	m	Non	Non	
Tuyau (diamètre)	15,00	cm	N/A	N/A	diamètre interne
Poids tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	82,25	kg	N/A	N/A	tuyau piézomètre
Matériau (tubage piézomètre)	PEHD		N/A	N/A	tuyau piézomètre
Poids béton	283	kg	Non	Non	
Poids gravier/sable (massif filtrant)	1130	kg	Non	Non	
Poids argile	565	kg	Non	Non	
Poids tête de puits (en fer)	7	kg	Non	Non	poids par tête (5 têtes de piézomètre)
Matériau tête (piézomètre)	Acier		N/A	N/A	5 têtes de piézomètre

Poste	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarque
Mise en place et suivi du système de traitement					
<u>Foration des ouvrages</u>					
A/R pour la phase de foration	250	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) + remorque (20t)
Poids de la foreuse	5500	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la foreuse	70	CV	N/A		72 CV (diesel insonorisé)
Temps de forage	2	j	N/A		8 h (temps moyen de fonctionnement - 150 à 160 j/an)
<u>Installation des unités de traitement</u>					
A/R pour le personnel de dépollution	500	km	Oui	10 ans	camionnette (J9)
A/R pour le matériel de dépollution	500	km	Oui		camion de 25 t
Installation des unités de traitement	8	j	N/A		

Filière de traitement					
<u>Type de traitement 1 : déshuileur</u>			Oui	5 ans	
Caractéristiques (surface)	3,4	m ²	N/A		
Caractéristiques (H)	1,2	m	N/A		
Matériau		acier	N/A		
Rendement épuratoire	99,98	%	N/A		rendement maximal ; ne pas en tenir compte
Poids unités de traitement	491	kg	N/A		
Nombre de déshuileurs	2				installation de deux déshuileurs en parallèle
Concentrations de rejets dans le milieu naturel : <u>air</u>		mg/Nm ³	N/A		négligeable en première approche (semi-volatils)
Volume de rejets : air		mg	N/A		négligeable en première approche (semi-volatils)
Concentrations des eaux pompées (entrée déshuileur) : <u>eaux sup.</u>	1,6	mg/l			entrée déshuileur = moyenne des eaux pompés dans la nappe
Concentrations de rejets dans le milieu naturel : <u>eaux sup.</u>	0,7	mg/l	N/A		concentration max. de sortie garantie
Volume de rejets : eaux sup.	87,5	g/h	N/A		rejet massique horaire (21/24 h de fonctionnement)
Masse de rejets : <u>déchets</u>	5,1	t			t d'hydrocarbures récupérées dans la citerne
Elimination des déchets :	valorisation : lavage de cuve ou incinération				
<u>Stockage des Hydrocarbures purs</u>			Oui	10 ans	
Caractéristiques (surface)	5,5	m ²	N/A		
Caractéristiques (H)	5	m	N/A		
Matériau		acier	N/A		
Poids unités de traitement	1100	kg	N/A		

Poste	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarque
<u>Type de traitement 2 : charbon actif</u>			Oui	5 ans	filtres réutilisés mais pour le charbon, il s'agit de déchets
<i>Filtre à charbon actif 1 (débit 60 m³/h)</i>					
Caractéristiques (surface)	5	m ²	N/A		
Caractéristiques (H)	5	m	N/A		
Matériau		acier	N/A		
Rendement épuratoire	95	%	N/A		rendement maximal ; ne pas en tenir compte
Poids unités de traitement	1250	kg	N/A		
Nombre de filtre	1				
Poids charbon dans le filtre	3,5	t	N/A		
<i>Filtre à charbon actif 2 (débit 35 m³/h)</i>					
Caractéristiques (surface)	2,5	m ²	N/A		
Caractéristiques (H)	4,7	m	N/A		
Matériau		acier	N/A		
Rendement épuratoire	95	%	N/A		rendement maximal ; ne pas en tenir compte
Poids unités de traitement	750	kg	N/A		
Nombre de filtre	1				
Poids charbon dans le filtre	2,1	t	N/A		
<i>Rejets filtres à charbon 1 et 2</i>					
Concentrations de rejets dans le milieu naturel : <u>air</u>		mg/Nm ³	N/A		négligeable en première approche (semi-volatils)
Volume de rejets : air		mg	N/A		négligeable en première approche (semi-volatils)
Concentrations de rejets dans le milieu naturel : <u>eaux sup.</u>	0,2	mg/l	N/A		concentration max. de sortie garantie (après charbon actif)
Volume de rejets : eaux sup.	25	g/h	N/A		rejet massique horaire (21/24 h de fonctionnement)
Volume de HCt adsorbés	1181,25	kg	N/A		
Masse de rejets : <u>déchets</u>	3543,75	kg	N/A		kg d'hydrocarbures + charbon pollué (adsorption de 33% p/p)
Elimination des déchets :	incinération ou désorption (régénération thermique) ou ISDD				

Tranchée drainante

La tranchée drainante, remplie de matériaux graveleux, est équipée d'un système de récupération des hydrocarbures flottant de type bande oléophile ou écrémeur pneumatique. Le seul traitement consiste donc en la récupération du produit pur.

Tableau 18 : Description détaillée de la tranchée drainante du site 1 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)

Poste	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarque
Type de pollution					
Volume d'hydrocarbures total	25	m ³	N/A	N/A	surageant (estimé : HCt dans sols, gaz et phase dissoute)
Volume d'hydrocarbures récupéré	3,5	m ³	N/A	N/A	surageant récupéré (pur dans les citernes)
soit	2 975	kg			

Durée du chantier					
Durée	120	mois	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement par jour : option 1	4	heures	N/A	N/A	4 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne (écrémage pneumatique)
Nombre d'heures de fonctionnement par jour : option 2	12	heures	N/A	N/A	12 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne (écrémeur à bande)

Installation de récupération					
<u>Option 1 : Pompe d'écémage (écémage pneumatique)</u>					
Nombre de pompes d'écémage	3		Oui	5 ans	
Pompe d'écémage (débits max nominal)	45	l/h	Oui	5 ans	(débit par pompe ; 2 pompes)
Puissance des pompes	N/A	N/A	N/A	N/A N/A	alimentation via compresseur
Consommation	N/A	N/A	N/A	N/A N/A	alimentation via compresseur
Volume pompé (débits)	135	l/h	Oui	5 ans	Durée de fonctionnement 4h /24h
Pompe d'écémage (poids)	5	kg	N/A	5 ans	(poids de chaque pompe ; inox ; 3 pompes)
Pompe d'écémage (matériau)					inox
Compresseur (poids)	41	kg	Oui	5 ans	
Compresseur (matériau)					acier
Compresseur (consommation)	1,5	kW	Oui	5 ans	
Electricité chantier					électricité de l'usine

Poste	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarque
<u>Option 2 : Ecrémeur à bande</u>					
Nombre d'écrémeur	3		Oui	5 ans	
Ecrémeur à bande (débits max nominal)	N/A	l/h	Oui	5 ans	16 tr/min : ne sera pas un facteur limitant sur la durée
Puissance de l'écrémeur	0,09	kW	N/A	N/A	Puissance nominale
Consommation					
Volume pompé (débits)	N/A	l/h	Oui	5 ans	
Ecrémeur à bande (poids)	52	kg	Oui	5 ans	(poids de chaque écrémeur ; acier ; 3 écrémeurs)
Ecrémeur à bande (matériau)					acier
Fûts métalliques de 200 l (nombre)	3		Oui	5 ans	1 fut par écrémeur soit 3
Fûts métalliques de 200 l (poids)	15	kg	Oui	5 ans	1 fut par écrémeur soit 3
Fûts métalliques de 200 l (matériau)				acier	1 fut par écrémeur soit 3
Electricité chantier					électricité de l'usine

Réseau d'extraction					
<u>Tranchée drainante</u>					
Apport de matériaux graveleux (Ø = 100/150 mm)	1600	t	N/A	N/A	
A/R de matériau graveleux	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)
Géomembrane (surface)	900	m ²	N/A	N/A	
Géomembrane (matériau)			N/A	N/A	PEHD
Géomembrane (poids)	1,71	t	N/A	N/A	
<u>Piézomètres</u>					
Tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	21,00	m	Non	Non	
Tuyau (diamètre)	15,00	cm	N/A	N/A	diamètre interne
Poids tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	49,35	kg	N/A	N/A	tuyau piézomètre
Matériau (tubage piézomètre)	PEHD		N/A	N/A	tuyau piézomètre
Poids béton	340	kg	Non	Non	
Poids gravier/sable (massif filtrant)	0	kg	Non	Non	
Poids argile	0	kg	Non	Non	
Poids tête de puits (en fer)	7	kg	Non	Non	Poids par tête (3 têtes de piézomètre)
Matériau tête (piézomètre)	Acier		N/A	N/A	3 têtes de piézomètre

Poste	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarque
Mise en place et suivi du système de traitement					
<u>Engins de terrassement</u>					
A/R du plateau	50	km	Oui	10 ans	camion plateau pour la pelle
Poids de la pelle	22000	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la pelle	140	hp	N/A		1 hp =0.746 kW
Temps de terrassement	10	j	N/A		8 h (temps moyen de fonctionnement - 150 à 160 j/an)
A/R du tombereau	50	km	Oui	10 ans	camion plateau pour la pelle
Poids du tombereau	23000	kg	N/A	15 ans	
Puissance du tombereau	304	hp	N/A		72 CV (diesel insonorisé)
Temps de terrassement	10	j	N/A		8 h (temps moyen de fonctionnement - 150 à 160 j/an)
<u>Installation des unités de traitement</u>					
A/R pour le personnel de dépollution	500	km	Oui	10 ans	camionnette (J9)
A/R pour le matériel de dépollution	500	km	Oui		camion de 25 t
Installation des unités de traitement	10	j	N/A		
<u>Suivi des unités de traitement</u>					
A/R pour le personnel de dépollution	500	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) / une fois tous les 15 j

Filière de traitement (NA : pas de traitement en dehors de la récupération de produit pur)					
<u>Stockage des Hydrocarbures purs</u>			Oui	10 ans	
Caractéristiques (surface)	5,5	m ²	N/A		
Caractéristiques (H)	5	m	N/A		
Matériau		acier	N/A		
Poids unités de traitement	1100	kg	N/A		
Volume d'hydrocarbures récupéré	3,5	m ³	N/A	N/A	surageant récupéré (pur dans les citernes)
soit	2 975	kg			
Elimination des déchets :	Produit pur éliminé en incinération ou en solvant de nettoyage de cuve				

Extraction multi-phase

L'extraction multiphase est constituée de 25 puits d'extraction, d'une pompe à palette, d'un dévésiculateur, d'un déshuileur, d'un filtre à charbon actif air et d'un filtre à charbon actif eau.

Tableau 19 : Description détaillée de l'extraction multiphase du site 1 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)

Poste	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarque
Type de pollution					
Volume d'hydrocarbures total	25	m ³	N/A	N/A	surnageant (estimé : HCt dans sols, gaz et phase dissoute)
Volume d'hydrocarbures récupéré	9,5	m ³	N/A	N/A	surnageant récupéré (pur dans les citernes)

Durée du chantier					
Durée	24	Mois	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement par jour	21	Heures	N/A	N/A	21 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne

Installation d'extraction					
<u>Pompe d'extraction</u>					
Nombre de pompes d'extraction	1		Oui	5 ans	pompe à palette lubrifiée
Pompe d'extraction (débits d'eau)	5	m ³ eau/h	Oui	5 ans	débit phase liquide : 200 l/h/aiguille soit un Qmax : 5m ³ /h
Pompe d'extraction (débits d'air)	375	m ³ air/h	Oui	5 ans	débit phase gazeuse : 15 m ³ /h/aiguille soit Qmax : 375 m ³ /h
Puissance des pompes	11	kW	N/A	N/A	Puissance nominale de la pompe à palette
Consommation			N/A	N/A	
Pompe (poids)	105	kg	N/A	5 ans	
Matériau				N/A	acier et aluminium (80 %)

Poste	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarque
Réseau d'extraction					
<u>Réseau en surface (des piézomètres au traitement)</u>					
Tuyau (longueur) -réseau d'extraction	240,00	m	Oui	5 ans	
Tuyau (diamètre)	15,00	cm	N/A	N/A	diamètre externe
Poids tuyau (piézomètre)	564,00	kg	N/A	N/A	réseau d'extraction
Matériau	PEHD		N/A	N/A	réseau d'extraction+ piézomètre
<u>Puits de récupération</u>					
Tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	175,00	m	Non	Non	
Tuyau (diamètre)	7,50	cm	N/A	N/A	diamètre externe
Poids tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	119,00	kg	N/A	N/A	tuyau piézomètre
Matériau (tubage piézomètre)	PEHD		N/A	N/A	tuyau piézomètre
Poids béton	494,00	kg	Non	Non	
Poids gravier/sable (massif filtrant)	1 975,00	kg	Non	Non	
Poids argile	987,00	kg	Non	Non	
Poids tête de puits (en fer)	3	kg	Non	Non	Poids par tête (25 têtes de piézomètre)
Matériau tête (piézomètre)	Acier		N/A	N/A	25 têtes de piézomètre

Mise en place et suivi du système de traitement					
<u>Foration des ouvrages</u>					
A/R pour la phase de foration	250	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) + remorque (20t)
Poids de la foreuse	5500	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la foreuse	70	CV	N/A		72 CV (diesel insonorisé)
Temps de forage	4	j	N/A		8 h (temps moyen de fonctionnement - 150 à 160 j/an)
<u>Installation des unités de traitement</u>					
A/R pour le personnel de dépollution	500	km	Oui	10 ans	camionnette (J9)
A/R pour le matériel de dépollution	500	km	Oui		camion de 25 t
Installation des unités de traitement	8	j	N/A		

Poste	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarque
Filière de traitement					
<u>Pompe de reprise des eaux</u>					
Nombre de pompes	2		Oui	5 ans	
Pompe (débits)	5	m ³ /h	Oui	5 ans	(débit par pompe ; 5 pompes)
Puissance des pompes	0,75	CV	N/A	N/A	Puissance nominale par pompe
Consommation			N/A	N/A	
Volume pompé (débits)	5	m ³ /h	Oui	5 ans	Durée de fonctionnement 21 h /24h (2 pompes en série donc ne pas multiplier par 2
Pompe (poids)	18	kg	N/A	5 ans	poids de chaque pompe ; inox ; 2 pompes
<u>Séparateur ai/liquide (dévésiculateur)</u>					-
Caractéristiques (surface)	1,5	m ²	N/A		
Caractéristiques (H)	1,5	m	N/A		
Matériau		acier	N/A		
Rendement épuratoire		%	N/A		sans objet ==> ne pas en tenir compte ; répercuté sur les unités suivantes
Poids unités de traitement	220	kg	N/A		
Nombre de déshuileurs	1				installation de 1 séparateur air/liquide
Concentrations de rejets dans le milieu naturel : <u>air</u>		mg/Nm ³	N/A		négligeable en première approche (semi-volatils)
Volume de rejets : air		mg	N/A		négligeable en première approche (semi-volatils)
Concentrations des eaux pompées (entrée) : <u>eaux sup.</u>		mg/l			sans objet ==> ne pas en tenir compte ; répercuté sur les unités suivantes
Concentrations de rejets dans le déshuileur		mg/l	N/A		sans objet ==> ne pas en tenir compte ; répercuté sur les unités suivantes
Volume de rejets : eaux sup.		g/h	N/A		sans objet ==> ne pas en tenir compte ; répercuté sur les unités suivantes
Masse de rejets : <u>déchets</u>		t			sans objet ==> ne pas en tenir compte ; répercuté sur les unités suivantes
Elimination des déchets : régénération? ISDD ?					sans objet ==> ne pas en tenir compte ; répercuté sur les unités suivantes

Poste	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarque
<u>Déshuileur</u>			Oui	5 ans	
Caractéristiques (surface)	1,5	m ²	N/A		
Caractéristiques (H)	1,5	m	N/A		
Matériau		acier	N/A		
Rendement épuratoire	99,98	%	N/A		rendement maximal ; ne pas en tenir compte
Poids unités de traitement	225	kg	N/A		
Nombre de déshuileurs	1				installation de deux déshuileurs en parallèle
Concentrations de rejets dans le milieu naturel : air		mg/Nm ³	N/A		négligeable en première approche (semi-volatils)
Volume de rejets : air		mg	N/A		négligeable en première approche (semi-volatils)
Concentrations des eaux pompées (entrée déshuileur) : eaux sup.	58	mg/l			entrée déshuileur = moyenne des eaux pompés dans la nappe
Concentrations de rejets dans le milieu naturel : eaux sup.	5	mg/l	N/A		concentration max. de sortie garantie
Volume de rejets : eaux sup.	50	g/h	N/A		rejet massique horaire (21/24 h de fonctionnement)
Volume de rejets : déchets	8,075	t			t d'hydrocarbures récupérées dans la citerne
Elimination des déchets : régénération? ISDD ?					incinération ou lavage de cuve
<u>Stockage des Hydrocarbures purs</u>			Oui	10 ans	
Caractéristiques (surface)	5,5	m ²	N/A		
Caractéristiques (H)	5	m	N/A		
Matériau		acier	N/A		
Poids unités de traitement	1100	kg	N/A		

Poste	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarque
<u>Filtre à charbon actif (eau) - pour $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$</u>			Oui	5 ans	filtres réutilisés mais pour le charbon, il s'agit de déchets
Caractéristiques (surface)	1,8	m ²	N/A		
Caractéristiques (H)	2,5	m	N/A		
Matériau		acier	N/A		
Rendement épuratoire	95	%	N/A		rendement maximal ; ne pas en tenir compte
Poids unités de traitement	300	kg	N/A		
Nombre de filtre	1				
Poids charbon dans le filtre	0,7	t	N/A		
<u>Rejets filtres à charbon eau</u>					
Concentrations de rejets dans le milieu naturel : <u>air</u>		mg/Nm ³	N/A		négligeable en première approche (semi-volatils)
Volume de rejets : air		mg	N/A		négligeable en première approche (semi-volatils)
Concentrations de rejets dans le milieu naturel : <u>eaux sup.</u>	0,2	mg/l	N/A		concentration max. de sortie garantie (après charbon actif)
Volume de rejets : eaux sup.	2	g/h	N/A		rejet massique horaire (21/24 h de fonctionnement)
Masse de HCt adsorbés	725,76	kg	N/A		
Masse de rejets : <u>déchets</u>	2177,28	kg	N/A		kg d'hydrocarbures + charbon pollué (adsorption de 33% p/p)
Elimination des déchets :	incinération ou désorption (régénération thermique) ou ISDD				
<u>Filtre à charbon actif (air) - pour $Q_{air} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$</u>			Oui	5 ans	filtres réutilisés mais pour le charbon, il s'agit de déchets
Caractéristiques (surface)	0,6	m ²	N/A		
Caractéristiques (H)	1,85	m	N/A		
Matériau		acier	N/A		
Rendement épuratoire	95	%	N/A		rendement maximal (hypothèse retenue)
Poids unités de traitement	80	kg	N/A		
Nombre de filtre	1				
Poids charbon dans le filtre	0,245	t	N/A		
Masse de rejets : <u>déchets</u>	0,245	kg	N/A		kg d'hydrocarbures + charbon pollué (adsorption de 33% p/p)
Elimination des déchets :	incinération ou désorption (régénération thermique) ou ISDD				

3.3.6. Site 2 : confinement – pollution des sols par des métaux/métalloïdes

Le site pris en considération adapté d'un cas réel, présente une pollution en métaux/métalloïdes. Les concentrations dans les sols sont incompatibles avec l'usage résidentiel envisagé. Par ailleurs, cette pollution en composés inorganiques génère un impact sur les eaux souterraines. Les concentrations au droit du site sont supérieures aux valeurs de potabilité. La solution de remédiation prise en compte est basée sur un confinement de terres afin d'éviter les impacts entre les cibles (personnes) et les sols de subsurface. Certaines des solutions de confinement envisagées permettent aussi de limiter les impacts sur les eaux souterraines (limitation des infiltrations des eaux de pluie dans la zone vadose).

Présentation du site

Le site présenté, adapté d'un cas réel, possède les caractéristiques suivantes.

Tableau 20 : Présentation des caractéristiques du site 2

Description du type de pollution	Quantité	Unités
Type de polluant : métaux/métalloïdes		
Volume de sols pollués	30000	m ³
Longueur	125	m
Largeur	120	m
Hauteur (profondeur)	2	m
Masse volumique du sol	1,8	t/m ³
Tonnage de sols pollués	54000	t

Les concentrations dans le milieu sols et les eaux souterraines au droit du site sont les suivantes :

Tableau 21 : Présentation des concentrations en métaux /métalloïdes dans les sols et les eaux souterraines du site 2

Composés	Concentrations moyennes (mg/kg) dans les sols	Concentrations moyennes dans les eaux souterraines (µg/l) au droit du site
Arsenic	75	30
Cadmium	4,5	60
Chrome tot.	450	400
Cuivre	240	3000
Nickel	420	140
Plomb	250	30
Zinc	900	210
Mercuré	0,36	14

Présentation des solutions de remédiation envisagées

Cinq solutions de remédiation ont été envisagées :

- Recouvrement de surface (terre végétale) – excavation et élimination des terres excédentaires en ISDI (Installation de Stockage des Déchets Inertes) puis regroupement des terres impactées sous la couverture végétale ; cette solution ne permet pas de limiter le transfert vers les eaux souterraines ;
- Recouvrement de surface (enrobé) - excavation et élimination des terres excédentaires en ISDI puis regroupement des terres impactées sous la couverture ; cette solution permet de limiter fortement le transfert vers les eaux souterraines ;
- Recouvrement de surface (béton) - excavation et élimination des terres excédentaires en ISDI puis regroupement des terres impactées sous le recouvrement ; cette solution permet de limiter fortement le transfert vers les eaux souterraines ;
- Encapsulation – les terres excédentaires ne sont pas transportées hors site ; les terres sont encapsulées dans un confinement ; cette solution permet de supprimer le transfert vers les eaux souterraines ;
- Phytostabilisation – les sols sont partiellement mélangés avec de la terre végétale et des engrais afin d'y accueillir des plantes permettant de limiter le réenvol de poussière ; cette solution permet de réduire le transfert vers les eaux souterraines. Par contre, cette technique ne permet pas de rendre la jouissance du site, elle ne peut donc être comparée aux autres techniques.

La phytostabilisation, envisagée en première approche, ne permet pas de gérer les aspects sanitaires par ingestion. L'hypothèse de départ étant d'utiliser la phytostabilisation avec très peu de terre végétale et un peu d'engrais. Elle n'a pas pu, *de facto*, être prise en compte. Elle aurait pu être prise en compte sous réserve d'imposer une servitude de restriction d'usage. Dans ces conditions, la comparaison de cette technique avec les autres techniques n'est pas possible dans l'esprit de l'ACV (impossibilité de définir une unité fonctionnelle commune). La stabilisation/neutralisation des terres n'a pas non plus été étudiée.

Les différentes options de remédiation proposées sont compatibles avec l'usage futur. Notons, néanmoins, que les usages potentiels au droit d'un confinement, d'un recouvrement de surface (enrobé et béton), ou d'un apport de terre végétale ne peuvent pas être les mêmes : certaines solutions permettent d'envisager la construction de bâtiment ou de parking alors que d'autres ne peuvent être que reconverties en espace enherbés.

Par ailleurs, certaines solutions permettent une réutilisation partielle des terres impactées (au moins comme support « géotechnique ») alors que d'autres solutions ne le permettent pas. Enfin, certains scénarii requièrent des mouvements de terre conséquents (élimination et apport de terres).

Conception des projets de dépollution

Les résultats de conception des solutions de remédiation sont présentés ci-dessous. Les données nécessaires au dimensionnement sont tirées des bonnes règles de l'art et des données internes du Brgm.

Recouvrement de surface (terre végétale)

Le principe consiste à décaper une partie de la terre polluée sur 30 cm et à la remplacer par de la terre végétale sur la même épaisseur. Les terres excédentaires sont envoyées en ISDI.

Tableau 22 : Description détaillée du recouvrement de surface (terre végétale) du site 2
(présentation du matériel et des matériaux utilisés)

Poste	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarque
Type de pollution					
Type de polluant :	cf. tableau 14				Métaux/métalloïdes
Durée du chantier					
Durée	20	j	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement par jour : pelle hydraulique	8	heures	N/A	N/A	8 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne
Nombre d'heures de fonctionnement par jour : dumper	4	heures	N/A	N/A	4 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne / 4 h à tourner sans rouler
Mise en place de la terre végétale					
<u>Caractéristiques de la zone excavée (en excédent pour la terre végétale)</u>					
Hauteur	0,3	m			
Longueur	125	m			
Largeur	120	m			
Volume du décaissement	4500	m ³			volume nécessaire pour metre de la terre végétale

Poste	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarque
<u>Matériau</u>					
Volume de terre végétale nécessaire	4 500	m ³			
Poids de terre végétale nécessaire	7 200	t			
Surface de géotextile nécessaire	18 750	m ²			
Densité du géotextile antipoinçonnant non tissé	100	g/m ²			
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)
Poids géotextile antipoinçonnant	1 875	kg			
Type de matériau					Polypropylène
<u>Elimination des terres excédentaires</u>					
Volume du sol éliminé	4 500	m ³			
Masse volumique du sol	1,8	t/m ³			
Tonnage de sols pollués	8 100	t			
Transport et élimination des terres					ISDI terres excédentaires faiblement impactées
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)
<u>Engins de terrassement</u>					
A/R du plateau	50	km	Oui	10 ans	camion plateau pour la pelle
Poids de la pelle	22 000	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la pelle	140	hp	N/A		1 hp =0.746 kW
A/R du dumper	50	km	Oui		Capacité de charge : 24 000 kg
Poids du dumper	21 560	kg	N/A	15 ans	
Puissance du dumper	305	hp	N/A		72 CV (diesel insonorisé)

Recouvrement de surface (enrobé)

Le principe consiste à retirer une partie de la terre polluée (sur 70 cm d'épaisseur) et à la remplacer par un enrobé pour la circulation et le stationnement de véhicules. Les terres excédentaires sont envoyées en ISDI.

Tableau 23 : Description détaillée du recouvrement de surface (enrobé) du site 2 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)

Poste	Quantité	Unités	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Type de pollution					
Type de polluant :	cf. tableau 14				Métaux/métalloïdes

Durée du chantier					
Durée	20	j	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement par jour : pelle hydraulique	8	heures	N/A	N/A	8 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne
Nombre d'heures de fonctionnement par jour : dumper	4	heures	N/A	N/A	4 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne / 4 h à tourner sans rouler

Mise en place de l'enrobé					
<u>Caractéristiques de la zone excavée (en excédent pour le site)</u>					
Hauteur	0,7	m			
Longueur	125	m			
Largeur	120	m			
Volume du décaissement	10 500	m ³			volume nécessaire pour mettre en place l'enrobé
Masse volumique du sol	1,8	t/m ³			
Tonnage de sols pollués	18 900	t			

Poste	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarque
<u>Matériau</u>					
Enrobé					
Hauteur d'enrobé	0,1	m			
Volume d'enrobé nécessaire	1 500	m ³			
Densité de l'enrobé	1,2	t/m ³			densité entre 1,1 et 1,2
Poids de terre végétale nécessaire	1 800	t			
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)
Sous-couche					grave ciment
Hauteur de sous-couche (ternaire)	0,6	m			
Volume de sous-couche	9 000	m ³			
Densité de la sous-couche	1,8	t/m ³			
Poids de la sous-couche	16 200	t			
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)
<u>Elimination des terres excédentaires</u>					
Volume de sol éliminé	10 500	m ³			
Masse volumique du sol	1,8	t/m ³			
Tonnage de sols pollués	18 900	t			
Transport et élimination des terres	ISDI terres excédentaires faiblement impactées				
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)
<u>Engins de terrassement</u>					
Pelle					
A/R du plateau	50	km	Oui	10 ans	camion plateau pour la pelle
Poids de la pelle	22 000	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la pelle	140	hp	N/A		1 hp = 0.746 kW
Durée d'utilisation	20	j	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement/jour	8	heures	N/A	N/A	8 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne
Dumper					
A/R du dumper	50	km	Oui		Capacité de charge : 24 000 kg
Poids du dumper	21 560	kg	N/A	15 ans	
Puissance du dumper	305	hp	N/A		72 CV (diesel insonorisé)
Durée d'utilisation	20	j	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement/jour	4	heures	N/A	N/A	4 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne / 4 h à tourner sans rouler
Compacteur à bille					
A/R du compacteur	50	km	Oui	10 ans	camionnette pour le compacteur
Poids du compacteur	658	kg			
Puissance du compacteur	6,8	kW			
Durée d'utilisation	4	j	N/A	N/A	4 j pour la sous-couche et 4 j pour l'enrobé
Nombre d'heures de fonctionnement/jour	8	heures	N/A	N/A	8 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne

Recouvrement de surface (béton)

Le principe consiste à retirer une partie de la terre polluée (sur 65 cm d'épaisseur) et à la remplacer par une surface bétonnée. Les terres excédentaires sont envoyées en ISDI.

Tableau 24 : Description détaillée du recouvrement de surface (béton) du site 2 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)

Poste	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarque
Type de pollution					
Type de polluant :	cf. tableau 14				Métaux/métalloïdes

Durée du chantier					
Durée	20	j	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement par jour : pelle hydraulique	8	heures	N/A	N/A	8 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne
Nombre d'heures de fonctionnement par jour : dumper	4	heures	N/A	N/A	4 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne / 4 h à tourner sans rouler

Mise en place du béton					
<i>Caractéristiques de la zone excavée (en excédent pour la terre végétale)</i>					
Hauteur	0,65	m			
Longueur	125	m			
Largeur	120	m			
Volume du décaissement	9750	m ³			volume nécessaire pour mettre en place le béton
Masse volumique du sol	1,8	t/m ³			
Tonnage de sols pollués	17 550	t			
Matériau					
Béton					béton apporté par une toupie
Hauteur de béton	0,25	m			
Volume de béton nécessaire	3 750	m ³			
Densité du béton	2,1	t/m ³			densité entre 2,4 et 2,5
Poids de béton	7875	t			
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)
Ferrailles					béton apporté par une toupie
Poids ferrailles	1 181,25	t			ratio massique ferrailles/béton (0,15)
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)
Polyane					
Surface de polyane	18 000	m ²			
Densité de polyane	150	g/m ²			
Poids Polyane	2 700	kg			
Sous-couche					
Hauteur de sous-couche (gravier)	0,4	m			massif filtrant en gravier
Volume de sous-couche	6 000	m ³			
Densité de la sous-couche	1,8	t/m ³			
Poids de la sous-couche	10 800	t			
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)

Poste	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarque
<u>Elimination des terres excédentaires</u>					
Volume de sol éliminé	9 750	m ³			
Masse volumique du sol	1,8	t/m ³			
Tonnage de sols pollués	17 550	t			
Transport et élimination des terres	ISDI terres excédentaires faiblement impactées				
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)
<u>Engins de terrassement</u>					
Pelle					
A/R du plateau	50	km	Oui	10 ans	camion plateau pour la pelle
Poids de la pelle	22 000	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la pelle	140	hp	N/A		1 hp = 0.746 kW
Durée d'utilisation	20	j	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement/jour	8	heures	N/A	N/A	8 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne
Dumper					
A/R du dumper	50	km	Oui		Capacité de charge : 24 000 kg
Poids du dumper	21 560	kg	N/A	15 ans	
Puissance du dumper	305	hp	N/A		72 CV (diesel insonorisé)
Durée d'utilisation	20	j	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement/jour	4	heures	N/A	N/A	4 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne / 4 h à tourner sans rouler
Compacteur à bille					
A/R du compacteur	50	km	Oui	10 ans	camionnette pour le compacteur
Poids du compacteur	658	kg			
Puissance du compacteur	6,8	kW			
Durée d'utilisation	4	j	N/A	N/A	4 j pour la sous-couche
Nombre d'heures de fonctionnement/jour	8	heures	N/A	N/A	8 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne

Encapsulation

Le principe consiste à excaver les terres polluées et à les confiner dans un système de géomembrane et de massif filtrant *ad hoc*. Le système de confinement envisagé, **volontairement sécuritaire**, est constitué des éléments suivants :

- dispositif sus-jacent aux terres : terre végétale, géotextile antipoinçonnement non tissé, massif filtrant, géogrille, géomembrane, argile
- dispositif sous-jacent aux terres : géotextile antipoinçonnement non tissé, massif filtrant, géogrille, géomembrane, argile

La gestion des eaux de ruissèlement et des éventuels percolats n'a pas été considérée afin de faciliter la comparaison des différents *scenarii*. Par ailleurs, dans ce scénario, l'intégralité des terres polluées est confinée sur site. Aucune élimination en ISDI n'est envisagée.

Tableau 25 : Description détaillée de l'encapsulation du site 2 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)

	Quantité	Unités	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Type de pollution					
Type de polluant :	cf. tableau 14				Métaux/métalloïdes

Durée du chantier					
Durée	70	j	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement par jour : pelle hydraulique	8	heures	N/A	N/A	8 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne
Nombre d'heures de fonctionnement par jour : dumper	4	heures	N/A	N/A	4 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne / 4 h à tourner sans rouler

Mise en place de l'encapsulation					
<u>Caractéristiques de la zone excavée (en excédent pour le site)</u>					
Hauteur	1,6	m			
Longueur	135	m			
Largeur	130	m			
Volume du décaissement	28 080	m ³			volume nécessaire pour mettre de la terre végétale
Masse volumique du sol	1,8	t/m ³			
Tonnage de sols pollués	50 544	t			

Poste	Quantité	Unités	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
<u>Matériau du confinement de couverture</u>					
Terre végétale					
Hauteur de terre végétale	0,3	m			
Volume de terre végétale nécessaire	5265	m ³			
Densité de la terre végétale	1,6	t/m ³			
Poids de terre végétale nécessaire	8 424	t			
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)
Géotextile antipoinçonnant non tissé					
Surface du géotextile antipoinçonnant	21 300	m ²	N/A		
Matériau					polypropylène
Densité du géotextile antipoinçonnant non tissé	100	g/m ²	N/A		
Poids géotextile antipoinçonnant	2 130	kg	N/A		
Couche de filtration d'une cellule					
Surface de massif filtrant	17 550	m ²	N/A		
Matériau					gravier fin
Epaisseur de la couche de filtration	0,3	m	N/A		
Volume du massif filtrant	5 265	m ³	N/A		
Densité du massif filtrant	1,8	t/m ³			
Poids du massif filtrant	9 477	t	N/A		
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)
géotextile antipoinçonnant non tissé					
Surface du géotextile antipoinçonnant	21 300	m ²	N/A		
Matériau					polypropylène
Densité du géotextile antipoinçonnant non tissé	100	g/m ²	N/A		
Poids géotextile antipoinçonnant	2 130	kg	N/A		
Géo-grille					
Surface de la géo-grille	21 300	m ²	N/A		
Matériau					polypropylène
Densité de la géo-grille	150	g/m ²	N/A		
Poids de la géo-grille	3 195	kg	N/A		
Géo-membrane					
Surface de la géo-grille	21 300	m ²	N/A		
Matériau					PEHD 2 mm
Densité de la géo-grille	950	g/m ²	N/A		
Poids de la géo-grille	20 235	kg	N/A		
Couche d'argile					
Surface de massif filtrant	17 550	m ²	N/A		
Matériau					argile
Epaisseur de la couche d'argile	0,5	m	N/A		
Volume d'argile	8 775	m ³	N/A		
Densité de l'argile	1,8	t/m ³			
Poids d'argile	15 795	t	N/A		
A/R de matériau	50	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)

Poste	Quantité	Unités	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
<u>Matériau de fond de confinement</u>					
Géotextile antipoinçonnant non tissé					
Surface du géotextile antipoinçonnant	21 300	m ²	N/A		
Matériau					polypropylène
Densité du géotextile antipoinçonnant non tissé	100	g/m ²	N/A		
Poids géotextile antipoinçonnant	2 130	kg	N/A		
Couche de filtration d'une cellule					
Surface de massif filtrant	17 550	m ²	N/A		
Matériau					gravier fin
Epaisseur de la couche de filtration	0,3	m	N/A		
Volume du massif filtrant	5 265	m ³	N/A		
Densité du massif filtrant	1,8	t/m ³			
Poids du massif filtrant	9 477	t	N/A		
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)
Géotextile antipoinçonnant non tissé					
Surface du géotextile antipoinçonnant	21 300	m ²	N/A		
Matériau					polypropylène
Densité du géotextile antipoinçonnant non tissé	100	g/m ²	N/A		
Poids géotextile antipoinçonnant	2 130	kg	N/A		
Géogrille					
Surface de la géogrille	21 300	m ²	N/A		
Matériau					polypropylène
Densité de la géogrille	150	g/m ²	N/A		
Poids de la géogrille	3 195	kg	N/A		
Géomembrane					
Surface de la géogrille	21 300	m ²	N/A		
Matériau					PEHD 2 mm
Densité de la géogrille	950	g/m ²	N/A		
Poids de la géogrille	20 235	kg	N/A		
Couche d'argile					
Surface de massif filtrant	17 550	m ²	N/A		
Matériau					argile
Epaisseur de la couche d'argile	0,5	m	N/A		
Volume d'argile	8 775	m ³	N/A		
Densité de l'argile	1,8	t/m ³			
Poids d'argile	15 795	t	N/A		
A/R de matériau	50	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)

Poste	Quantité	Unités	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
<u>Engins de terrassement</u>					
Pelle					
A/R du plateau	50	km	Oui	10 ans	camion plateau pour la pelle
Poids de la pelle	22 000	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la pelle	140	hp	N/A		1 hp =0.746 kW
Durée d'utilisation	70	j	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement/jour	8	heures	N/A	N/A	8 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne
Dumper					
A/R du dumper	50	km	Oui		Capacité de charge : 24 000 kg
Poids du dumper	21 560	kg	N/A	15 ans	
Puissance du dumper	305	hp	N/A		72 CV (diesel insonorisé)
Durée d'utilisation	70	j	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement/jour	4	heures	N/A	N/A	4 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne / 4 h à tourner sans rouler
Compacteur à bille					
A/R du compacteur	50	km	Oui	15 ans	camionnette pour le compacteur
Poids du compacteur	658	kg			
Puissance du compacteur	6,8	kW			
Durée d'utilisation	15	j	N/A	N/A	4 j pour la sous-couche et 4 j pour le régalage
Nombre d'heures de fonctionnement/jour	8	heures	N/A	N/A	8 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne
Tractopelle					
A/R du plateau	50	km	Oui	10 ans	camion plateau pour la pelle
Poids de la pelle	7 080	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la pelle	68	kW	N/A	N/A	1 hp =0.746 kW
Durée d'utilisation	20	j	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement/jour	8	heures	N/A	N/A	8 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne

3.3.7. Site 3 : traitement biologique des sols – pollution des sols par du FOD

Le site présenté est adapté d'un cas réel. Il est pollué par des hydrocarbures pétroliers de type FOD. La zone vadose est principalement concernée par cette source de pollution. Les concentrations dans les eaux souterraines sont acceptables.

Les solutions de remédiation de type biologique sont les seules prises en compte car elles sont les mieux adaptées à ce type de pollution moyennement concentrée.

Présentation du site

Le site présenté, adapté d'un cas réel, possède les caractéristiques suivantes.

Tableau 26 : Présentation des caractéristiques du site 3

Description du type de pollution	Quantité	Unités
Type de polluant : FOD dans les sols		
Volume de sols à traiter :	1 350,5	m ³
Masse volumique du sol	1,8	t/m ³
Masse de sols	2 430,9	t
Concentration initiale (sols)	8 000,0	mg/kg
Concentrations HCt	8 000,0	mg/kg
Porosité : n	0,3	
Saturation initiale	0,2	

Présentation des solutions de remédiation envisagées

Trois solutions de remédiation ont été envisagées :

- Bioterre – dégradation biologique des hydrocarbures sur site (après excavation des terres) avec recouvrement des terres, apport d'eau, apport de nutriments et apport d'air par légère mise en dépression du terte,
- Compostage – dégradation biologique des hydrocarbures sur site (après excavation des terres) avec apport d'eau, apport de nutriments et apport d'air par retournement d'andains (et apport de compost) ; ce procédé est considéré comme étant plus lent et moins efficace que le bioterre,
- Landfarming – dégradation biologique des hydrocarbures sur site (après excavation des terres) avec apport d'eau, apport de nutriments et apport d'air par labourage des terres ; ce procédé est considéré comme étant plus lent et moins efficace que le compostage ; par ailleurs, il nécessite plus de place.

Notons que le compostage et le lanfarming ne sont pas utilisables partout sans mesure compensatoires idoines (notamment en ville).

Les schémas de principe des procédés utilisés sont présentés dans les figures suivantes.

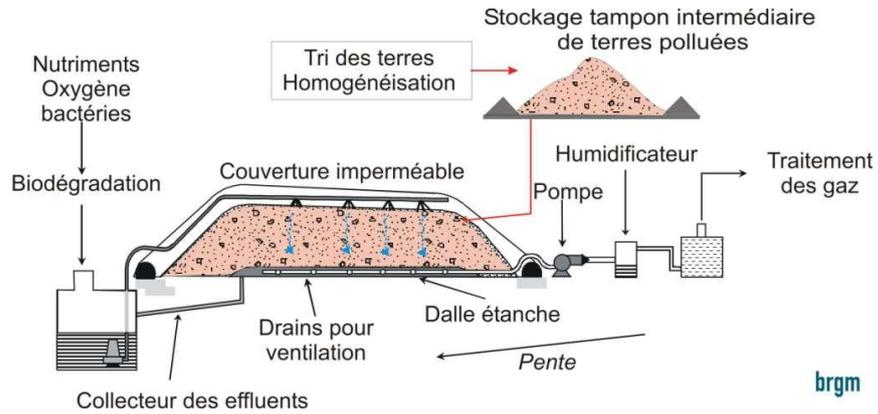


Figure 7 : Schéma de principe du biotertre (Colombano et al., 2010)

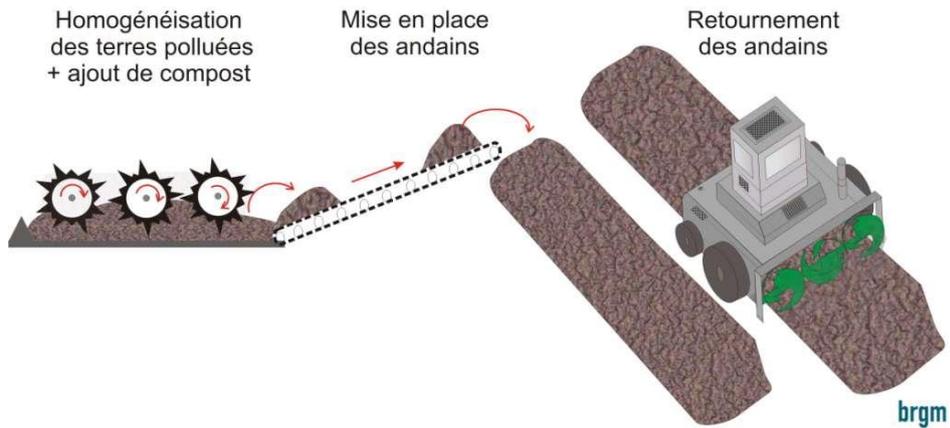


Figure 8 : Schéma de principe du compostage (Colombano et al., 2010)

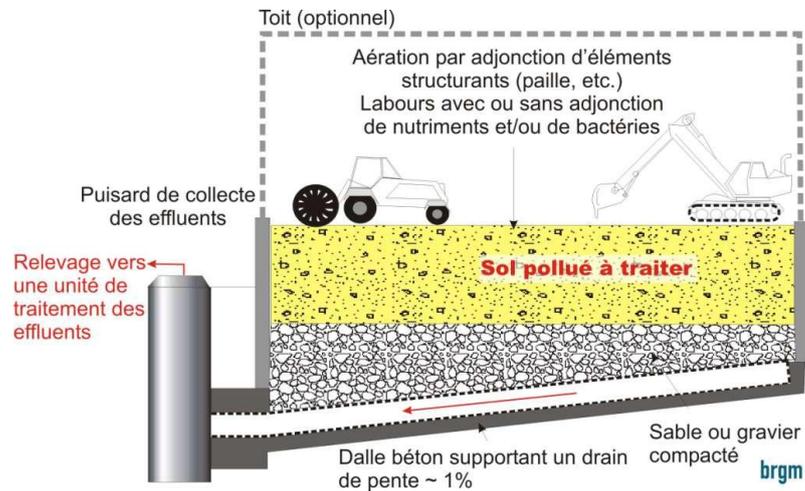


Figure 9 : Schéma de principe du landfarming (Colombano et al., 2010)

Conception des projets de dépollution

Les résultats de conception des solutions de remédiation sont présentés ci-dessous.

Les données utilisées pour dimensionner les unités de traitement proviennent de rapports Battelle et NFESC (1996) et de données internes du Brgm.

Bioterre

Tableau 27 : Description détaillée du bioterre du site 3 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)

Poste	Quantité	Unités	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Type de pollution					
Concentration initiale (sols)	8 000,0	mg/kg	N/A		
Concentration finale (sols)	1 500,0	mg/kg	N/A		
Masse Hydrocarbures	19 447,5	kg	N/A		
Rendement épuratoire	81,3	%			
Volume d'hydrocarbures dégradé	15 801,1	kg	N/A	N/A	dégradation biologique dans le bioterre
Durée du chantier					
Durée	6	mois	N/A		durée du bioterre
Durée	8	j	N/A		durée de construction du bioterre
Nombre d'heures de fonctionnement par jour	23	heures	N/A		23 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne pour le bioterre
Mise en place du système de traitement					
<u>Engins de terrassement</u>					
Pelle					
A/R du plateau	50	km	Oui	10 ans	camion plateau pour la pelle
Poids de la pelle	22 000	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la pelle	140	hp	N/A		1 hp = 0.746 kW
Durée d'utilisation	8	j	N/A		
Nombre d'heures de fonctionnement/jour	8	heures	N/A		8 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne
Dumper					
A/R du dumper	50	km	Oui	10 ans	Capacité de charge : 24 000 kg
Poids du dumper	21 560	kg	N/A	15 ans	
Puissance du dumper	305	hp	N/A		72 CV (diesel insonorisé)
Durée d'utilisation	8	j	N/A		
Nombre d'heures de fonctionnement/jour	4	heures	N/A		4 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne / 4 h à tourner sans rouler

Poste	Quantité	Unités	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
<u>Caractéristiques des cellules de confinement</u>					
Nombre de cellules	3		N/A		
Dimension des cellules : L	40	m	N/A		
Dimension des cellules : l	10	m	N/A		
Dimension des cellules : H	1,5	m	N/A		au maximum
Volume des cellules	450,2	m ³	N/A		
<u>Géomembrane au fond de la cellule</u>					
Fond de biotierre en PEHD	400	m ²	N/A		
Fond de biotierre en PEHD avec merlon (25 % de perte env.)	500	m ²	N/A		
densité du PEHD 2 mm	950	g/m ²	N/A		
Poids PEHD	475	kg	N/A		
<u>Couche de filtration d'une cellule</u>					
Sable au fond	400	m ²	N/A		
Epaisseur de la couche de filtration	0,3	m	N/A		
Volume du massif filtrant	120	m ³	N/A		
Poids du massif filtrant	216	t	N/A		
<u>Géotextile antipoinçonnant non tissé au fond d'une cellule</u>					
Fond de biotierre en polypropylène	400	m ²	N/A		
densité du géotextile antipoinçonnant non tissé	100	g/m ²	N/A		
Poids géotextile antipoinçonnant	40	kg	N/A		
<u>Tuyau de bioventing d'une cellule</u>					
Espacement	2,5	m	Oui	5 ans	
Nombre (dans le sens de la longueur)	3		N/A		
Matériau			N/A		PVC performé
Diamètre	7,5	cm	N/A		
Longueur	240	m	N/A		(*2 pour le réseau extérieur)
Poids du PVC (7,5 cm de diam)/m	782	g/m	N/A		
Poids du PVC (7,5 cm de diam)	187,68	kg	N/A		

Poste	Quantité	Unités	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
<u>Tuyau d'apport d'eau d'une cellule</u>			Oui	5 ans	
Espacement	2,5	m	N/A		
Nombre (dans le sens de la longueur)	3		N/A		
Matériau			N/A		PVC perforé
Diamètre	7,5	cm	N/A		
longueur	240	m	N/A		(*2 pour le réseau extérieur)
Poids du PVC (7,5 cm de diam)/m	782	g/m	N/A		
Poids du PVC (7,5 cm de diam)	187,7	kg	N/A		
<u>Géomembrane au-dessus de la cellule</u>			N/A		
Recouvrement du biotertre en PEHD	400	m ²	N/A		
Fond du biotertre en PEHD avec merlon (25 % de perte env.)	500	m ²	N/A		
densité du PEHD 2 mm	950	g/m ²	N/A		
Poids PEHD	475	kg	N/A		
<u>Apport d'eau + nutriments + agent structurants</u>			N/A		
Volume d'eau nécessaire	162	m ³	N/A		
Pompe de récupération des lixiviats	0,33	hp	N/A		0,25kW
Poids pompe	4	kg	N/A		(nombre total 3 pour les trois biopile)
Nombre de pompes	3		N/A		(nombre total 3 pour les trois biopile)
Matériau		acier	N/A		(nombre total 3 pour les trois biopile)
Masse de ((NH4)2SO4) nécessaire	7 487,3	kg	N/A		
Masse de (Na3PO4•12H2O) nécessaire	4 310,9	kg	N/A		
Volume d'agents structurants (compost de déchets végétaux)	5,00	m ³	N/A		
Masse d'agents structurants (compost de déchets végétaux)	2,50	t	N/A		
<u>Apport d'air</u>					
Pompe de récupération des lixiviats	2	hp	1,5		1,5 kW (85 m ³ /h max)
Poids pompe	26	kg	Oui	5 ans	(nombre total 3 pour les trois biopile)
Nombre de pompes	3				(nombre total 3 pour les trois biopile)
Matériau			acier		(nombre total 3 pour les trois biopile)

Poste	Quantité	Unités	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
<u>Réservoir de collecte des eaux avant réinjection</u>			Oui	5 ans	
Caractéristiques (surface)	1,4	m ²	N/A		
Caractéristiques (H)	1,5	m	N/A		
Poids des réservoirs	90	kg	N/A		poids par réservoir (2 réservoirs)
Volume des réservoirs	500	gal	N/A		(nombre total 2 pour les trois biopiles)
Volume des réservoirs	1,893	m ³	N/A		(nombre total 2 pour les trois biopiles)
Nombre de réservoirs	2		N/A		(nombre total 2 pour les trois biopiles)
Matériel			N/A		PEHD
<u>Traitement des gaz</u>			Oui	5 ans	filtres réutilisés mais pour le charbon, il s'agit de déchets
<u>Filtre à charbon actif (air)</u>			Oui	5 ans	
Caractéristiques (surface)	0,2	m ²	N/A		
Caractéristiques (H)	1	m	N/A		
Poids du conteneur	8	kg	N/A		poids par fûts (4 fûts)
Volume des filtres	55	gal	N/A		(nombre total 4 pour les trois biopiles)
Volume des filtres	0,208	m ³	N/A		(nombre total 4 pour les trois biopiles)
Nombre de filtres	4		N/A		(nombre total 4 pour les trois biopiles)
Rendement épuratoire	95	%	N/A		rendement maximal (hypothèse retenue)
Matériau			N/A		PEHD
Poids charbon dans le filtre	0,073	t	N/A		poids par fûts (4 fûts)
Suivi des unités de traitement					
A/R pour le personnel de dépollution	500	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) / une fois tous les 15 j

Compostage

Tableau 28 : Description détaillée du compostage du site 3 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)

Poste	Quantité	Unités	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Type de pollution					
Concentration initiale (sols)	8 000,0	mg/kg	N/A		
Concentration finale (sols)	2 500,0	mg/kg	N/A		
Masse Hydrocarbures	19 447,5	kg	N/A		
Rendement épuratoire	68,8	%			
Volume d'hydrocarbures dégradé	13 370,1	kg	N/A	N/A	dégradation biologique (compostage)
Durée du chantier					
Durée	9	mois	N/A		durée du biotertre
Durée	8	j	N/A		durée de construction du biotertre
Nombre d'heures de fonctionnement par jour	-	heures	N/A		voir ligne relative au retourneur d'andain
Mise en place du système de traitement					
Engins de terrassement					
Pelle					
A/R du plateau	50	km	Oui	10 ans	camion plateau pour la pelle
Poids de la pelle	22 000	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la pelle	140	hp	N/A		1 hp =0.746 kW
Durée d'utilisation	8	j	N/A		
Nombre d'heures de fonctionnement/jour	8	heures	N/A		8 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne
Dumper					
A/R du dumper	50	km	Oui	10 ans	Capacité de charge : 24 000 kg
Poids du dumper	21 560	kg	N/A	15 ans	
Puissance du dumper	305	hp	N/A		72 CV (diesel insonorisé)
Durée d'utilisation	8	j	N/A		
Nombre d'heures de fonctionnement/jour	4	heures	N/A		4 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne / 4 h à tourner sans rouler
Caractéristiques des tas de composte					
Nombre de tas de compostage	10		N/A		
Dimension d'un tas : L	77,2	m	N/A		
Dimension d'un tas : l	2,5	m	N/A		
Dimension d'un tas : H	1,4	m	N/A		au maximum
Volume des tas au total	1 351	m ³	N/A		
Surface de l'unité de compostage					

Poste	Quantité	Unités	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
<u>Caractéristiques de l'unité de compostage (avec tous les tas)</u>					
Dimension : L	100,36	m			30 % pour les côtés et les manœuvres
Dimension : l	65	m			30 % pour les côtés et les manœuvres ; 2 pour l'espace entre les tas
Dimension : S	6 523,4	m ²			
<u>Géomembrane au fond de la cellule</u>					
Fond de la cellule en PEHD	6 523,4	m ²	N/A		
Fond de la cellule en PEHD avec merlon (25 % de perte env.)	8 154,25	m ²	N/A		
densité du PEHD 2 mm	950	g/m ²	N/A		
Poids PEHD	7 746,5	kg	N/A		
<u>Couche de filtration d'une cellule</u>					
Sable au fond	6523,4	m ²	N/A		
Epaisseur de la couche de filtration	0,3	m	N/A		
Volume du massif filtrant	1957,02	m ³	N/A		
Poids du massif filtrant	3522,636	t	N/A		
<u>Géotextile antipoinçonnant non tissé au fond d'une cellule</u>					
Fond de composteur en polypropylène	6523,4	m ²	N/A		
densité du géotextile antipoinçonnant non tissé	100	g/m ²	N/A		
Poids géotextile antipoinçonnant	652,34	kg	N/A		
<u>Apport d'eau + nutriments + agent structurants</u>					
Volume d'eau nécessaire	162	m ³	N/A		
Masse de ((NH ₄) ₂ SO ₄) nécessaire	7 487,3	kg	N/A		
Masse de (Na ₃ PO ₄ •12H ₂ O) nécessaire	4 310,9	kg	N/A		
Volume d'agents structurants (compost de déchets végétaux)	120,00	m ³	N/A		
Masse d'agents structurants (compost de déchets végétaux)	60,00	t	N/A		

Poste	Quantité	Unités	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
<u>Apport d'air - retournement d'andain</u>			N/A		
Retourneur d'andains tracté			N/A	15 ans	
Poids	450	kg			
Matériel			N/A		Acier
Tracteur			N/A	15 ans	
Poids	4,9	t			
Matériel			N/A		Acier
Puissance	115	ch	N/A		
Temps de fonctionnement du retourneur d'andain + tracteur			N/A		
largeur de passage	2,5	m	N/A		
hauteur de passage	1,4	m	N/A		
section de l'andain	1,75	m ²	N/A		
Vitesse de retournement	200	m/h	N/A		
Longueur des tas de compostage	772	m	N/A		
Temps de travail pour le retournement	3,86	h	N/A		
Nombre de passages/semaine	2	fois/semaines	N/A		
Durée du travail hebdomadaire	7,72	h/semaine	N/A		
Durée du travail mensuel	30,88	h/mois	N/A		

Suivi des unités de traitement					
A/R pour le personnel de dépollution	500	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) / une fois tous les 15 j
A/R pour le personnel de dépollution non spécialisé	100	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) / deux fois par semaine (retournement andains)

Landfarming

Tableau 29 : Description détaillée du landfarming du site 3 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)

Type de pollution	Quantité	Unités	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Type de polluant :					FOD dans les sols _ impact sur les eaux négligeables
Concentration initiale (sols)	8 000,0	mg/kg	N/A		
Concentration finale (sols)	3 500,0	mg/kg	N/A		
Masse Hydrocarbures	19 447,5	kg	N/A		
Rendement épuratoire	56,3	%			
Volume d'hydrocarbures dégradé	10 939,2	kg	N/A	N/A	dégradation biologique (landfarming)
Durée du chantier					
Durée	12	mois	N/A		durée du landfarming
Durée	12	j	N/A		durée de construction du landfarming
Nombre d'heures de fonctionnement par jour	-	heures	N/A		voir ligne relative au retourneur d'andain
Mise en place du système de traitement					
<u>Engins de terrassement</u>					
Pelle					
A/R du plateau	50	km	Oui	10 ans	camion plateau pour la pelle
Poids de la pelle	22 000	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la pelle	140	hp	N/A		1 hp =0.746 kW
Durée d'utilisation	12	j	N/A		
Nombre d'heures de fonctionnement/jour	8	heures	N/A		8 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne
Dumper					
A/R du dumper	50	km	Oui	10 ans	Capacité de charge : 24 000 kg
Poids du dumper	21 560	kg	N/A	15 ans	
Puissance du dumper	305	hp	N/A		72 CV (diesel insonorisé)
Durée d'utilisation	12	j	N/A		
Nombre d'heures de fonctionnement/jour	4	heures	N/A		4 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne / 4 h à tourner sans rouler
<u>Caractéristiques du traitement par landfarming</u>					
Nombre de tas pour le landfarming	1		N/A		
Dimension d'un tas : L	67,5	m	N/A		
Dimension d'un tas : l	67	m	N/A		
Dimension d'un tas : H	0,3	m	N/A		au maximum
Volume des tas au total	1 356,8	m ³	N/A		
<u>Caractéristiques de l'unité par landfarming</u>					
Dimension : L	80	m			30 % pour les côté et les manœuvres
Dimension : l	80	m			30 % pour les côté et les manœuvres ; 2 pour l'espace entre les tas
Dimension : S	6 400	m ²			

Type de pollution	Quantité	Unités	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
<u>Géomembrane au fond de la cellule</u>					
Fond de <u>landfarming</u> en PEHD	6 400	m ²	N/A		
Fond de <u>landfarming</u> en PEHD avec merlon (25 % de perte env.)	8 000	m ²	N/A		
densité du PEHD 2 mm	950	g/m ²	N/A		
Poids PEHD	7 600	kg	N/A		
<u>Couche de filtration d'une cellule</u>					
Sable au fond	6 400	m ²	N/A		
Epaisseur de la couche de filtration	0,3	m	N/A		
Volume du massif filtrant	1 920	m ³	N/A		
Poids du massif filtrant	3 456	t	N/A		
<u>Géotextile antipoinçonnant non tissé au fond d'une cellule</u>					
Fond de la cellule en polypropylène	6 400	m ²	N/A		
densité du géotextile antipoinçonnant non tissé	100	g/m ²	N/A		
Poids géotextile antipoinçonnant	640	kg	N/A		
<u>Apport d'eau + nutriments + agent structurants</u>					
Volume d'eau nécessaire	162	m ³	N/A		
Masse de ((NH ₄) ₂ SO ₄) nécessaire	7 487,3	kg	N/A		
Masse de (Na ₃ PO ₄ •12H ₂ O) nécessaire	4 310,9	kg	N/A		
Volume d'agents structurants (compost de déchets végétaux)	120,00	m ³	N/A		
Masse d'agents structurants (compost de déchets végétaux)	60,00	t	N/A		

Type de pollution	Quantité	Unités	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
<u>Apport d'air - retournement pour le landfarming</u>			N/A		
Engin tracté - fraise rotative			N/A	15 ans	
Poids	525	kg			
Matériel			N/A		Acier
Tracteur			N/A	15 ans	
Poids	4,9	t			
Matériel			N/A		Acier
Puissance	115	ch	N/A		
Temps de fonctionnement du retourneur d'andain + tracteur			N/A		
largeur de passage	1,8	m	N/A		
hauteur de passage	0,3	m	N/A		
section de passage	0,54	m ²	N/A		
Vitesse de retournement	3	km/h	N/A		
Vitesse de retournement	3000	m/h	N/A		
Longueur des tas de compostage	67,5	m	N/A		
Nombre de passage nécessaire	37,2		N/A		64
Nombre de passage nécessaire (arrondi)	40		N/A		
Distance pour un retournement entier du champ de landfarming	2 700	m			
Temps de travail pour le retournement	0,9	h	N/A		
Temps de travail pour le retournement (arrondi)	1	h	N/A		
Nombre de passage/semaine	2	fois/semaines	N/A		
Durée du travail hebdomadaire	2	h/semaine	N/A		
Durée du travail mensuel	8	h/mois	N/A		

Suivi des unités de traitement					
A/R pour le personnel de dépollution	500	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) / une fois tous les 15 j
A/R pour le personnel de dépollution non spécialisé	100	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) / deux fois par semaine (retournement pour compostage)

3.3.8. Site 4 : récupération du plongeant et de la phase dissoute - pollution de la nappe par des COHV

Le site présenté est adapté d'un cas réel. Il est pollué par des solvants halogénés. Les solutions de remédiation prises en compte concernent la récupération/dégradation des COHV dans la ZNS (matrice sols et gaz) et la ZS (matrice sols et eaux).

Présentation du site

Le site présenté, adapté d'un cas réel, possède les caractéristiques suivantes.

Tableau 30 : Présentation des caractéristiques du site 4

Type de pollution	Quantité	Unité
Données de base		
Type de polluant :		
Surface à traiter :	750	m ²
Puissance ZNS :	5	m
Puissance ZS :	10	m
Puissance ZNS à traiter :	3	m
Puissance ZS à traiter :	10	m
Porosité	0,38	
Perméabilité	1,00E-03	m/s
Masse volumique du sol	1,8	t/m ³
Concentrations en polluants		
PCE : Concentrations moyennes dans les eaux souterraines	45 000	µg/l
PCE : Concentrations maximales dans les eaux souterraines	65 000	µg/l
PCE : Concentrations moyennes dans les sols (ZNS)	420	mg/kg
PCE : Concentrations maximales dans les sols (ZNS)	2 645	mg/kg
PCE : Concentrations moyennes dans les gaz des sols (ZNS)	360	µg/m ³
PCE : Concentrations maximales dans les gaz des sols (ZNS)	4 350	µg/m ³
TCE : Concentrations moyennes dans les eaux souterraines	24 000	µg/l
TCE : Concentrations maximales dans les eaux souterraines	55 000	µg/l
TCE : Concentrations moyennes dans les sols (ZNS)	94	mg/kg
TCE : Concentrations maximales dans les sols (ZNS)	378	mg/kg
TCE : Concentrations moyennes dans les gaz des sols (ZNS)	850	µg/m ³
TCE : Concentrations maximales dans les gaz des sols (ZNS)	1 561	µg/m ³
Masses initiales de polluants		
PCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	1,28E-01	t
PCE : Masse totale estimée dans les sols	7,37E+00	t
PCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	5,13E-07	t
TCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	6,84E-02	t
TCE : Masse totale estimée dans les sols	1,65E+00	t
TCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	1,21E-06	t

Présentation des solutions de remédiation envisagées

Cinq solutions de remédiation ont été envisagées :

- Sparging/venting - le sparging est réalisé dans la zone saturée et dans la frange capillaire. L'air injecté dans la nappe va favoriser la volatilisation des polluants qui seront extraits au niveau de la zone vadose et traités sur site. Le sparging est couplé au venting qui met en dépression la zone vadose afin d'extraire les composés organiques volatils ;
- Traitement biologique anaérobie - l'atténuation naturelle dynamisée ou biodégradation dynamisée *in situ* nécessite l'ajout de composés spécifiques dans les sols ou les eaux souterraines afin de créer les conditions favorables à l'activité des microorganismes responsables de la biodégradation des contaminants. Dans notre cas, les conditions favorables sont de type anaérobie. Pour ce faire, les microorganismes sont maintenus dans les conditions optimales (oxygène, pH, température, potentiel d'oxydoréduction) et des nutriments sont ajoutés essentiellement sous forme liquide ;
- Oxydation chimique *in situ* – l'ISCO consiste à injecter un oxydant dans les sols (zones saturée et non saturée) sans excavation. Cet oxydant va détruire totalement ou partiellement les polluants. Ce procédé permet donc d'aboutir à la destruction des polluants (transformation en eau, gaz carbonique et sels) ou à la formation de sous-produits de dégradation généralement plus biodégradables ;
- Barrière perméable réactive – une BPR est constituée d'une zone perméable de matériaux réactifs (métaux réducteurs, accepteurs ou donneurs d'électrons, adsorbants, lit bactérien,...) située sur le passage d'un panache d'eau souterraine polluée. Par écoulement advectif naturel au travers de la barrière, les polluants présents dans les eaux souterraines sont dégradés en éléments non nocifs (organiques) ou adsorbés/complexés (organiques, métaux et métalloïdes) par le réactif. Dans notre cas, la BPR est constituée de matériaux permettant de réaliser une réduction ;
- Atténuation naturelle contrôlée – il s'agit d'un processus se produisant naturellement dans les sols et les eaux souterraines, sans intervention humaine, visant à réduire la masse, la toxicité, la mobilité, le volume ou la concentration des contaminants dans ces milieux. Les processus pris en considération sont : la dispersion, la dilution, la volatilisation, l'adsorption, les mécanismes de stabilisation ou de destruction des polluants, qu'ils soient physiques, chimiques ou biologiques.

Les schémas de principe des procédés utilisés sont présentés dans les figures suivantes.

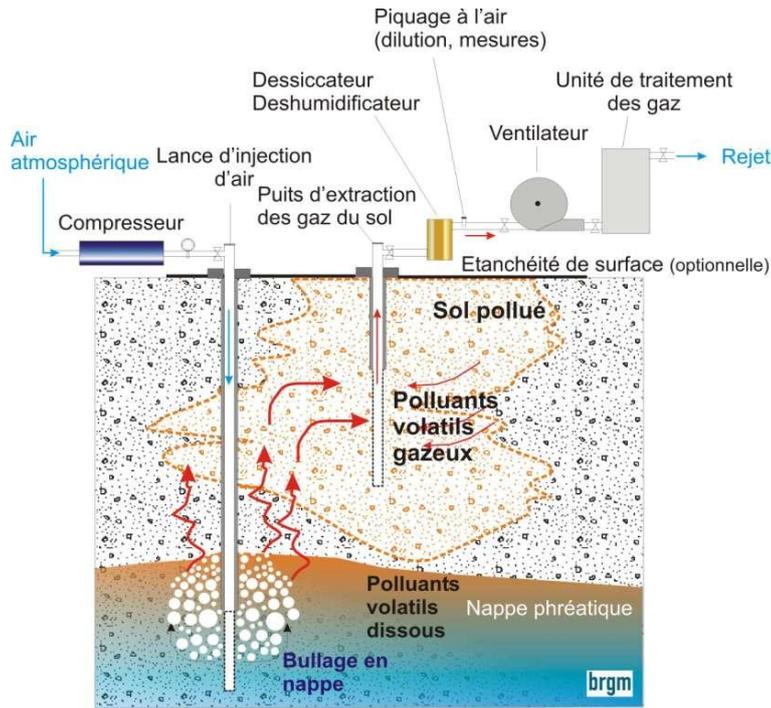


Figure 10 : Schéma de principe du sparging/venting (Colombano et al., 2010)

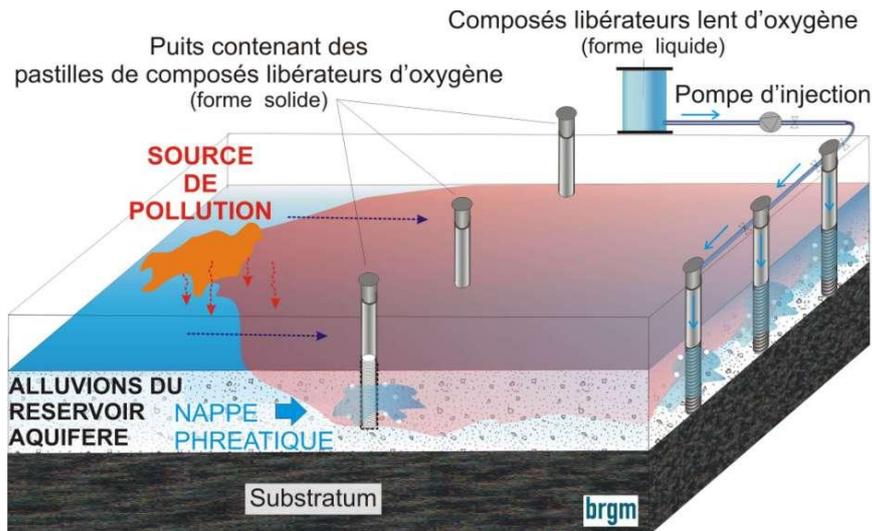


Figure 11 : Schéma de principe du traitement biologique dynamisé (Colombano et al., 2010)

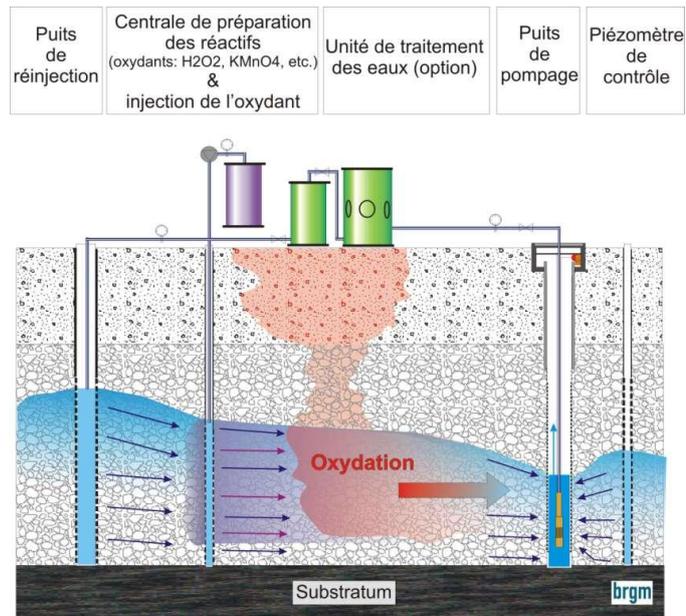
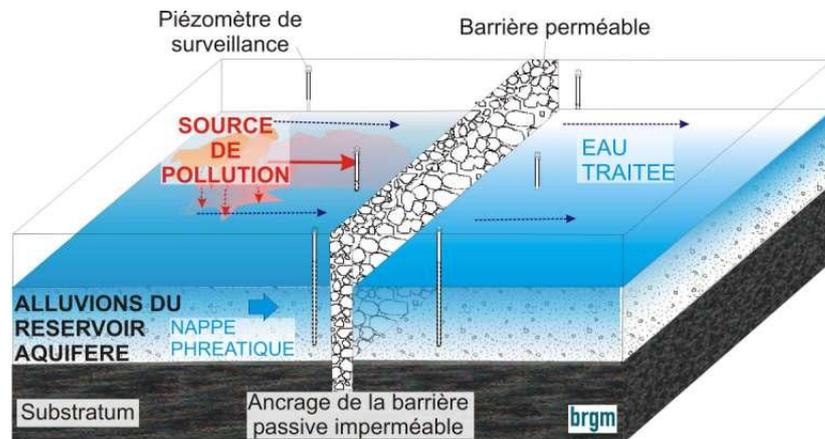
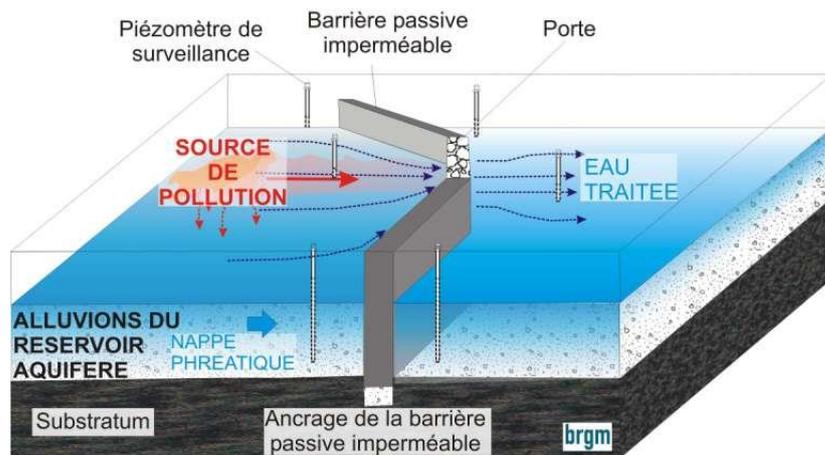


Figure 12 : Schéma de principe de l'oxydation chimique in situ (Colombano et al., 2010)



Barrière perméable réactive classique



Système porte

Figure 13 : Schéma de principe de la barrière perméable réactive (Colombano et al., 2010)

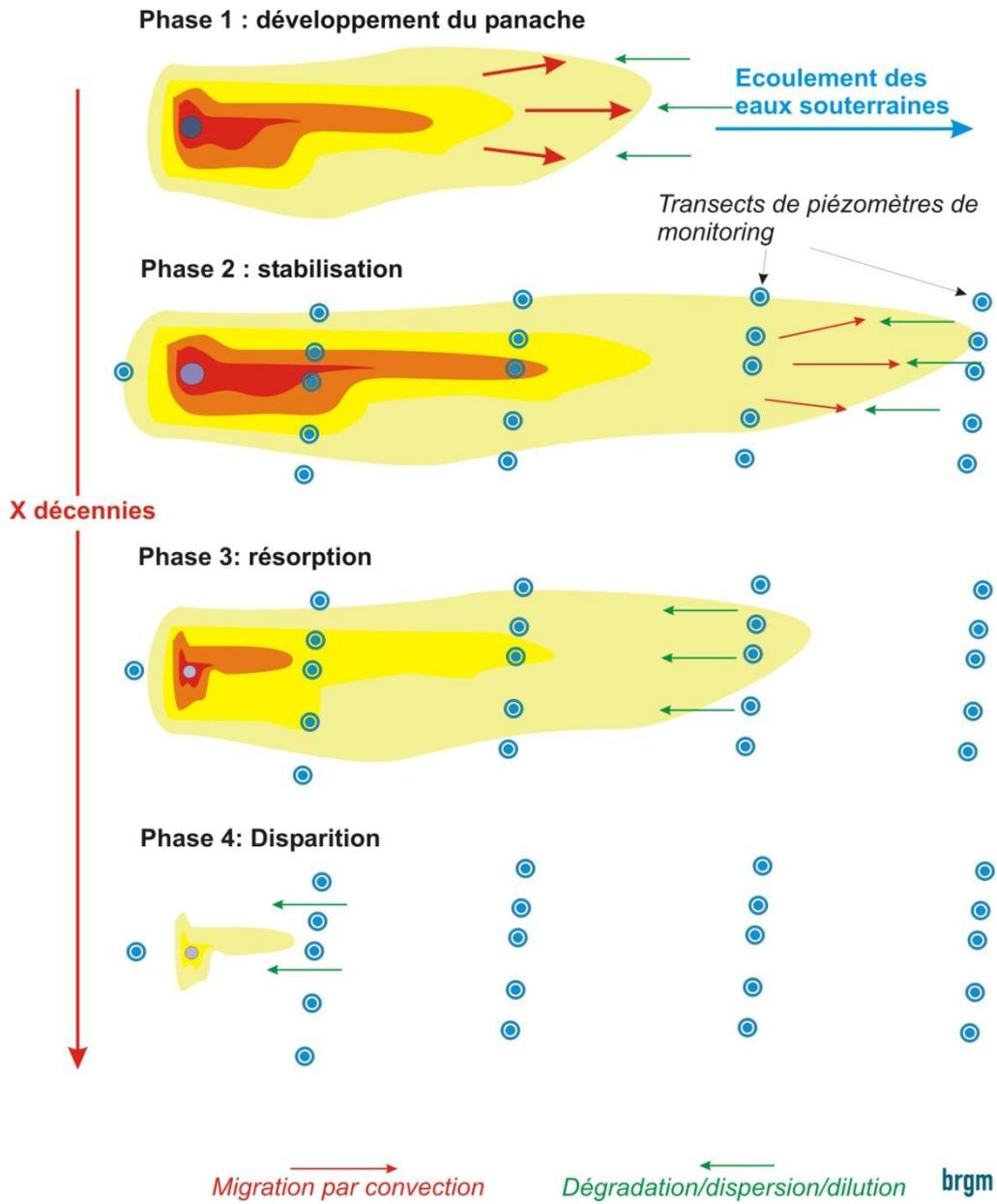


Figure 14 : Schéma de principe de l'atténuation naturelle contrôlée (adaptée de Sinke et Le Hécho, 1999)

Conception des projets de dépollution

Les résultats de la phase de conception des solutions de remédiation sont présentés ci-dessous. Les données utilisées pour dimensionner les unités de traitement proviennent de rapports Battelle (2002), ITRC (2005), US Air force (2010) et de données internes du Brgm. Les unités de traitement on site ont été dimensionnées à l'aide de SuperPRo Designer ® et de données internes du Brgm.

Sparging/venting

Le système d'injection d'air est constitué de 15 puits d'injection connectés à un compresseur. Le système d'extraction est composé de 12 puits d'extraction connectés à un dévésiculateur et un filtre sur charbon actif.

Tableau 31 : Description détaillée du sparging/venting du site 4 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Données de base					
Masses initiales de polluants					
PCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	1,28E-01	t	N/A	N/A	
PCE : Masse totale estimée dans les sols	7,37E+00	t	N/A	N/A	
PCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	5,13E-07	t	N/A	N/A	
TCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	6,84E-02	t	N/A	N/A	
TCE : Masse totale estimée dans les sols	1,65E+00	t	N/A	N/A	
TCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	1,21E-06	t	N/A	N/A	
Masses finales de polluants			N/A	N/A	
Rendement épuratoire estimée de 70	70	%			Rendement estimé à partir de retours d'expérience dans des configurations similaires
PCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	3,85E-02	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
PCE : Masse totale estimée dans les sols	2,21E+00	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
PCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	1,54E-07	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
TCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	2,05E-02	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
TCE : Masse totale estimée dans les sols	4,95E-01	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
TCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	3,63E-07	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Durée du chantier					
Durée	24	mois	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement par jour	21	heures	N/A	N/A	21 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne

Unité d'injection d'air (sparging)					
<u>Compresseur</u>					
			Oui	5 ans	
Nombre de compresseur	1		N/A	N/A	
Débits d'injection	225	m ³ air/h	N/A	N/A	400 V ; pour un débit de 15 m ³ /h par puits soit 225 m ³ /h (max) ; intermittence
Puissance	20	HP	N/A	N/A	
Consommation	électrique		N/A	N/A	
Poids	190	kg	N/A	N/A	
Matériau	Acier		N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement par jour	6	h	N/A	N/A	fonctionnement par intermittence (25 % du temps) à env. 1 bar de surpression

Unité d'extraction d'air (venting)					
<u>Pompe d'extraction (venting)</u>					
			Oui	5 ans	
Nombre de pompes d'extraction	1		N/A	N/A	pompe à palette lubrifiée
Débit d'extraction (débits d'air)	500	m ³ air/h	N/A	N/A ans	débit phase gazeuse : 15 m ³ /h/aiguille soit Qmax : 375 m ³ /h
Puissance des pompes	12	hp	N/A	N/A	Puissance nominale de la pompe à palette
Consommation	électrique		N/A	N/A	
Pompe (poids)	105	kg	N/A	N/A ans	
Matériau			N/A	N/A	acier et aluminium (80 %)
Nombre d'heures de fonctionnement par jour	21	h	N/A	N/A	21 h de fonctionnement sur 24 h en moyenne

Réseau d'injection d'air					
<u>Réseau en surface (du compresseur à l'injection)</u>					
			Oui	5 ans	
Tuyau (longueur) - réseau d'extraction	300,00	m	Oui	5 ans	
Tuyau (diamètre)	4,00	cm	N/A	N/A	diamètre externe
Poids tuyau	69,00	kg	N/A	N/A	réseau d'extraction
Matériau	PEHD		N/A	N/A	réseau d'extraction+ piézomètre

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
<u>Puits d'injection</u>					
Nombre de puits	15,00		N/A	N/A	
Tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	225,00	m	Oui	5 ans	
Tuyau (diamètre)	4,00	cm	N/A	N/A	diamètre externe
Poids tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	51,75	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Matériau (tubage piézomètre)	PEHD		N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids béton	60,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids gravier/sable (massif filtrant)	300,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids argile	540,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection

Réseau d'extraction d'air					
<u>Réseau en surface (du venting au traitement)</u>					
Tuyau (longueur) -réseau d'extraction	300,00	m	Oui	5 ans	
Tuyau (diamètre)	15,00	cm	N/A	N/A	diamètre externe
Poids tuyau (piézomètre)	705,00	kg	N/A	N/A	réseau d'extraction
Matériau	PEHD		N/A	N/A	réseau d'extraction+ piézomètre
<u>Puits de récupération</u>					
Nombre de puits	12,00		N/A	N/A	
Tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	54,00	m	N/A	N/A	
Tuyau (diamètre)	4,00	cm	N/A	N/A	diamètre externe
Poids tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	12,42	kg	N/A	N/A	tuyau piézomètre
Matériau (tubage piézomètre)	PEHD		N/A	N/A	tuyau piézomètre
Poids béton	48,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'extraction
Poids gravier/sable (massif filtrant)	120,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'extraction
Poids argile	48,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'extraction

Mise en place et suivi du système de traitement					
<u>Foration des ouvrages</u>					
A/R pour la phase de foration	250	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) + remorque (20t)
Poids de la foreuse	5 500	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la foreuse	70	CV	N/A		72 CV (diesel insonorisé)
Temps de forage	10	j	N/A		8 h (temps moyen de fonctionnement - 150 à 160 j/an)
<u>Installation des unités de traitement</u>					
A/R pour le personnel de dépollution	500	km	Oui	10 ans	camionnette (J9)
A/R pour le matériel de dépollution	500	km	Oui		camion de 25 t
Installation des unités de traitement	8	j	N/A		

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Filière de traitement					
<u>Filtre à charbon actif (air) - pour Q_{air} = 500m³/h (min)</u>			Oui	5 ans	filtres réutilisés mais pour le charbon, il s'agit de déchets (1,5 m ³ /filtre)
Caractéristiques (surface)	1,13	m ²	N/A	N/A	
Caractéristiques (H)	2,2	m	N/A	N/A	
Matériau		acier	N/A	N/A	
Rendement épuratoire	95	%	N/A	N/A	rendement maximal (hypothèse retenue)
Poids unités de traitement	220	kg	N/A	N/A	
Nombre de filtre	2		N/A	N/A	
Poids charbon dans le filtre	0,525	t	N/A	N/A	
Concentrations de rejets dans le milieu air					
PCE	2	mg/N m ³	N/A	N/A	Arrêté du 02 Février 1998
TCE	2	mg/N m ³	N/A	N/A	Arrêté du 02 Février 1999
Poids de TCE et PCE adsorbé	6,45	t	N/A	N/A	
Poids de rejets : déchets	25,81	kg	N/A	N/A	kg PCE ET TCE + charbon pollué (adsorption de 25% p/p)
<u>Séparateur ai/liquide (dévésiculeur)</u>		Oui	5	ans	-
Caractéristiques (surface)	0,5	m ²	N/A	N/A	
Caractéristiques (H)	1	m	N/A	N/A	
Matériau		acier	N/A	N/A	
Rendement épuratoire		%	N/A	N/A	sans objet ==> ne pas en tenir compte
Poids unités de traitement	45	kg	N/A	N/A	
Nombre de dévésiculeur	1		N/A	N/A	installation de 1 séparateur air/liquide
Concentrations de rejets dans le milieu naturel : air		mg/N m ³	N/A	N/A	négligeable en première approche
Volume de rejets : air		mg	N/A	N/A	négligeable en première approche
Concentrations des eaux pompées (entrée) : eaux sup.		mg/l	N/A	N/A	négligeable en première approche
Concentrations de rejets dans le déshuileur		mg/l	N/A	N/A	négligeable en première approche
Volume de rejets : eaux sup.		g/h	N/A	N/A	négligeable en première approche
Masse de rejets : déchets	-	t	N/A	N/A	négligeable en première approche
Elimination des déchets : régénération? ISDD ?	-		N/A	N/A	négligeable en première approche

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Suivi des unités de traitement					
A/R pour le personnel de dépollution	500	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) / une fois tous les 15 j

Réseau de surveillance					
<u>Piézomètre</u>					
Nombre de piézomètres	6,00		N/A	N/A	
Tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	90,00	m	N/A	N/A	
Tuyau (diamètre)	6,00	cm	N/A	N/A	diamètre externe
Poids tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	44,10	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Matériau (tubage piézomètre)	PEHD		N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids béton	27,35	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids gravier/sable (massif filtrant)	300,83	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids argile	82,04	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids tête de puits	12,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection

Mise en place des ouvrages de surveillance					
<u>Foration des ouvrages</u>					
A/R pour la phase de foration		km	Oui	10 ans	pris en compte précédemment : camionnette (J9) + remorque (20t)
Poids de la foreuse	5500	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la foreuse	70	CV	N/A	N/A	72 CV (diesel insonorisé)
Temps de forage	3	j	N/A	N/A	8 h (temps moyen de fonctionnement - 150 à 160 j/an)

Traitement biologique anaérobie

Le système de traitement biologique anaérobie est basé sur l'injection d'acide lactique via 10 puits d'injection. Le traitement biologique anaérobie ne traite donc que la zone saturée (le traitement de la zone non saturée se faisant uniquement par équilibre de phase liée à la diminution des concentrations en polluants dans la zone saturée). La gestion du site doit également mettre en œuvre des mesures constructives ad hoc (i.e. un vide sanitaire ventilé afin de gérer les impacts sanitaires résiduels par inhalation trop élevés – cf. calculs en annexe 1).

Tableau 32 : Description détaillée du traitement biologique anaérobie du site 4 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Données de base					
Masses initiales de polluants			N/A	N/A	
PCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	1,28E-01	t	N/A	N/A	
PCE : Masse totale estimée dans les sols (ZS)	5,67E+00	t	N/A	N/A	
PCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	5,13E-07	t	N/A	N/A	
TCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	6,84E-02	t	N/A	N/A	
TCE : Masse totale estimée dans les sols (ZS)	1,27E+00	t	N/A	N/A	
TCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	1,21E-06	t	N/A	N/A	
Masses finales de polluants			N/A	N/A	
Rendement épuratoire estimée de	80	%			Rendement estimé à partir de retours d'expérience dans des configurations similaires et des données de Mc Guire et al. (2006) et Carey et Mc Bean (2010) ; pas de traitement de la ZNS
PCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	2,57E-02	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
PCE : Masse totale estimée dans les sols	1,13E+00	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
PCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	1,03E-07	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
TCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	1,37E-02	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
TCE : Masse totale estimée dans les sols	2,54E-01	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
TCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	2,42E-07	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Durée du chantier					
Durée	24	mois	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement par jour	8	heures	N/A	N/A	8h/j pendant 1 mois puis attente de 3 mois soit 4 mois/an de fonctionnement

Unité d'injection d'additif					
<u>Mélangeur</u>					
Nombre de mélangeur (unité de rétention)	1		N/A	N/A	
Caractéristiques (surface)	1,13	m ²	N/A	N/A	
Caractéristiques (H)	2,2	m	N/A	N/A	
Matériau		acier	N/A	N/A	
Poids unités de rétention	220	kg	N/A	N/A	
<u>Pompe doseuse</u>					
Nombre de pompe doseuse	1		N/A	N/A	
Débits d'injection	1 à 4	m ³ /h	N/A	N/A	50 à 75 l/h aiguille max
Puissance	2,2	kW	N/A	N/A	
Consommation			N/A	N/A	
Poids	165	kg	N/A	N/A	
Matériau	Acier		N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement par jour	8	h	N/A	N/A	8h/j pendant 1 mois puis attente de 3 mois soit 4 mois/an de fonctionnement
<u>Additif utilisé</u>					
Type d'additif	Acide lactique		N/A	N/A	
Quantité totale estimée d'acide lactique	24,2	t	N/A	N/A	Stœchiométrie pour l'acide lactique : g AL/g PCE = 2,14 ; g AL/g TCE = 2,04 (avec facteur de sécurité de 2 pour les EEQ (électron équivalents) - Gossett et Zinder (1996))
Dosage en livraison	50,0	%	N/A	N/A	
Dosage en injection	5,0	%	N/A	N/A	
Quantité d'eau utilisée	460,2	t	N/A	N/A	
Quantité d'eau utilisée	460,2	m ³	N/A	N/A	

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Réseau d'injection d'additif					
<u>Réseau en surface (du bac de rétention aux ouvrages)</u>					
Tuyau (longueur) - réseau d'extraction	250,00	m	Oui	5 ans	
Tuyau (diamètre)	4,00	cm	N/A	N/A	diamètre externe
Poids tuyau	57,50	kg	N/A	N/A	réseau d'injection
Matériau	PEHD		N/A	N/A	réseau d'injection
<u>Puits d'injection</u>					
Nombre de puits	10,00		N/A	N/A	
Tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	150,00	m	N/A	N/A	
Tuyau (diamètre)	7,50	cm	N/A	N/A	diamètre externe
Poids tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	102,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Matériau (tubage piézomètre)	PEHD		N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids béton	65,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids gravier/sable (massif filtrant)	841,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids argile	65,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection

Mise en place et suivi du système de traitement					
<u>Foration des ouvrages</u>					
A/R pour la phase de foration	250	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) + remorque (20t)
Poids de la foreuse	5 500	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la foreuse	70	CV	N/A	N/A	72 CV (diesel insonorisé)
Temps de forage	5	j	N/A	N/A	8 h (temps moyen de fonctionnement - 150 à 160 j/an)
<u>Installation des unités de traitement</u>					
A/R pour le personnel de dépollution	500	km	Oui	10 ans	camionnette (J9)
A/R pour le matériel de dépollution	500	km	Oui	10 ans	camion de 25 t
Installation des unités de traitement	5	j	N/A	N/A	

Suivi des unités de traitement					
A/R pour le personnel de dépollution	500	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) / une fois tous les 15 j

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Réseau de surveillance					
<u>Piézomètre</u>					
Nombre de piézomètres	6,00		N/A	N/A	
Tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	90,00	m	N/A	N/A	
Tuyau (diamètre)	6,00	cm	N/A	N/A	diamètre externe
Poids tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	44,10	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Matériau (tubage piézomètre)	PEHD		N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids béton	27,35	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids gravier/sable (massif filtrant)	300,83	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids argile	82,04	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids tête de puits	12,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection

Mise en place des ouvrages de surveillance					
<u>Foration des ouvrages</u>					
A/R pour la phase de foration		km	Oui	10 ans	prise en compte précédemment : camionnette (J9) + remorque (20t)
Poids de la foreuse	5 500	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la foreuse	70	CV	N/A	N/A	72 CV (diesel insonorisé)
Temps de forage	3	j	N/A	N/A	8 h (temps moyen de fonctionnement - 150 à 160 j/an)

Mise en place des mesures constructives (vide sanitaire)					
<u>Construction vide sanitaire</u>					
Poids parpaing	8 640	kg	N/A	N/A	
<u>Béton (semelle filante ferrillée)</u>					
Volume de béton nécessaire	16	m ³	N/A	N/A	
Densité du béton	2,2	t/m ³	N/A	N/A	
Poids de béton	35,2	t	N/A	N/A	
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)
<u>Ferrailles</u>					béton apporté par une toupie
Poids ferrailles	5,28	t	N/A	N/A	ratio massique ferrailles/béton (0,15)
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t
<u>VMC</u>					
Poids	4,5	kg	Oui	10 ans	
Matériau	plastique		N/A	N/A	
Puissance	75	W	N/A	N/A	195 m ³ /h (1,1 v/h)

Oxydation chimique in situ

L'oxydation chimique *in situ* est basée sur de l'injection de permanganate de potassium via 10 puits d'injection. Le traitement chimique traite la zone saturée ainsi que la zone non saturée, la gestion du site ne nécessite pas la mise en œuvre de mesures constructives ad hoc (i.e. un vide sanitaire ventilé afin de gérer les impacts sanitaires résiduels calculés en annexe 1).

Tableau 33 : Description détaillée de l'oxydation chimique *in situ* du site 4 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Données de base					
Masses initiales de polluants			N/A	N/A	
PCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	1,28E-01	t	N/A	N/A	
PCE : Masse totale estimée dans les sols	7,37E+00	t	N/A	N/A	
PCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	5,13E-07	t	N/A	N/A	
TCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	6,84E-02	t	N/A	N/A	
TCE : Masse totale estimée dans les sols	1,65E+00	t	N/A	N/A	
TCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	1,21E-06	t	N/A	N/A	
Masses finales de polluants			N/A	N/A	
Rendement épuratoire estimée de	90	%			Rendement estimé à partir de retours d'expérience dans des configurations similaires et des données de Mc Guire et al. (2006) et Carey et Mc Bean (2010)
PCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	1,28E-02	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
PCE : Masse totale estimée dans les sols	7,37E-01	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
PCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	5,13E-08	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
TCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	6,84E-03	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
TCE : Masse totale estimée dans les sols	1,65E-01	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
TCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	1,21E-07	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisabl e	Amortissement (année)	Remarques
Durée du chantier					
Durée	12	mois	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement par jour	8	heures	N/A	N/A	8h/j pendant 1 mois puis attente de 3 mois soit 4 mois/an de fonctionnement
Unité d'injection d'oxydant					
<u>Mélangeur</u>			Oui	5 ans	
Nombre de mélangeur (unité de rétention)	2		N/A	N/A	
Caractéristiques (surface)	1,13	m ²	N/A	N/A	
Caractéristiques (H)	2,2	m	N/A	N/A	
Matériau		acier	N/A	N/A	
Poids unités de rétention	220	kg	N/A	N/A	
<u>Pompe doseuse</u>			Oui	5 ans	
Nombre de pompe doseuse	2		N/A	N/A	
Débits d'injection	1 à 4	m ³ /h	N/A	N/A	50 à 75 l/h aiguille max
Puissance	2,2	kW	N/A	N/A	
Consommation	électrique		N/A	N/A	
Poids	165	kg	N/A	N/A	
Matériau	Acier		N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement par jour	8	h	N/A	N/A	8h/j pendant 1 mois puis attente de 3 mois soit 4 mois/an de fonctionnement
<u>Oxydant utilisé</u>					
Type d'oxydant	Permanganate de sodium		N/A	N/A	
Quantité totale estimée de KMnO4 (hors DNO)	9,3	t	N/A	N/A	Stœchiométrie pour le KMNO4 : g MnO4-/g PCE = 0,96 ; g MnO4-/g TCE = 1,81
Quantité totale estimée de KMnO4 (avec DNO)	23,3	t	N/A	N/A	DNO faible (estimée à 800 mg/kg)
Dosage en livraison	40,0	%	N/A	N/A	
Dosage en injection	4,0	%	N/A	N/A	
Quantité d'eau utilisée	559,6	m ³	N/A	N/A	

Réseau d'injection d'oxydant					
<u>Réseau en surface (du bac de rétention aux ouvrages)</u>					
Tuyau (longueur) - réseau d'extraction	250,00	m	Oui	5 ans	
Tuyau (diamètre)	4,00	cm	N/A	N/A	diamètre externe
Poids tuyau	57,50	kg	N/A	N/A	réseau d'injection
Matériau	PEHD		N/A	N/A	réseau d'injection
<u>Puits d'injection</u>					
Nombre de puits	10,00		N/A	N/A	
Tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	150,00	ml	N/A	N/A	
Tuyau (diamètre)	7,50	cm	N/A	N/A	diamètre externe
Poids tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	102,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Matériau (tubage piézomètre)	PEHD		N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids béton	65,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids gravier/sable (massif filtrant)	841,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids argile	65,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Mise en place et suivi du système de traitement					
<u>Foration des ouvrages</u>					
A/R pour la phase de foration	250	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) + remorque (20t)
Poids de la foreuse	5 500	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la foreuse	70	CV	N/A	N/A	72 CV (diesel insonorisé)
Temps de forage	5	j	N/A	N/A	8 h (temps moyen de fonctionnement - 150 à 160 j/an)
<u>Installation des unités de traitement</u>					
A/R pour le personnel de dépollution	500	km	Oui	10 ans	camionnette (J9)
A/R pour le matériel de dépollution	500	km	Oui	10 ans	camion de 25 t
Installation des unités de traitement	5	j	N/A	N/A	
Suivi des unités de traitement					
A/R pour le personnel de dépollution	500	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) / une fois tous les 15 j
Réseau de surveillance					
<u>Piézomètre</u>					
Nombre de piézomètres	6,00		N/A	N/A	
Tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	90,00	ml	N/A	N/A	
Tuyau (diamètre)	6,00	cm	N/A	N/A	diamètre externe
Poids tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	44,10	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Matériau (tubage piézomètre)	PEHD		N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids béton	27,35	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids gravier/sable (massif filtrant)	300,83	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids argile	82,04	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids tête de puits	12,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Mise en place des ouvrages de surveillance					
<u>Foration des ouvrages</u>					
A/R pour la phase de foration		km	Oui	10 ans	pris en compte précédemment : camionnette (J9) + remorque (20t)
Poids de la foreuse	5 500	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la foreuse	70	CV	N/A	N/A	72 CV (diesel insonorisé)
Temps de forage	3	j	N/A	N/A	8 h (temps moyen de fonctionnement - 150 à 160 j/an)

Barrière perméable réactive

La BPR est composée d'un mélange de massif drainant, de Fe⁰ et de compost, propices à la dégradation anaérobie des COHV. Le procédé ne traite donc que la zone saturée (le traitement de la zone non saturée est effectué uniquement par équilibre de phase liée à la diminution des concentrations en polluants dans la zone saturée). Un vide sanitaire ventilé est également nécessaire afin de gérer les impacts sanitaires résiduels par inhalation trop élevés – cf. calculs en annexe 1.

Tableau 34 : Description détaillée de la barrière perméable réactive du site 4 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Données de base					
Masses initiales de polluants			N/A	N/A	
PCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	1,28E-01	t	N/A	N/A	
PCE : Masse totale estimée dans les sols (ZS)	5,67E+00	t	N/A	N/A	
PCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	5,13E-07	t	N/A	N/A	
TCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	6,84E-02	t	N/A	N/A	
TCE : Masse totale estimée dans les sols (ZS)	1,27E+00	t	N/A	N/A	
TCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	1,21E-06	t	N/A	N/A	
Masses finales de polluants			N/A	N/A	
Rendement épuratoire estimée de	60	%			Rendement estimée à partir de retours d'expérience dans des configurations similaires et des données de Mc Guire et al. (2006) et Carey et Mc Bean (2010) ; pas de traitement de la ZNS ; traitement uniquement du panache au niveau de la BPR ; pas de traitement de la ZNS
PCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	7,70E-02	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux (rendements de 60% sur site et rendement de 90 entre l'amont et l'aval de la BPR)
PCE : Masse totale estimée dans les sols	2,27E+00	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
PCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	2,05E-07	t	N/A	N/A	cf. ligne supérieur
TCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	2,74E-02	t	N/A	N/A	cf. ligne supérieur
TCE : Masse totale estimée dans les sols	5,08E-01	t	N/A	N/A	cf. ligne supérieur
TCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	4,85E-07	t	N/A	N/A	cf. ligne supérieur

Durée du chantier					
Durée	360	mois	N/A	N/A	360 mois pour l'ANM et 100 j pour la BPR
Nombre d'heures de fonctionnement par jour	-	heures	N/A	N/A	sans objet

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Mise en place du traitement					
<u>Barrière perméable de type mur continu</u>					
Apport de matériaux graveleux + compost + Fer° (Ø @ 100/150 mm)	600	m ³	N/A	N/A	Fer° (5%) et compost (10%) et matériau graveleux (85%) ; dimensions : 40 *1 * 15 m
Masse volumique des matériaux d'apport	1,8	t/m ³			
Tonnage des matériaux d'apport	1 080	t			
A/R de matériau graveleux	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)
A/R de Fer°	150	km	N/A	N/A	
A/R de compost	30	km	N/A	N/A	
<u>Engins de terrassement</u>					
A/R du plateau	50	km	Oui	10 ans	camion plateau pour la pelle
Poids de la pelle	22 000	kg	N/A	15 ans	travail avec palplanche en escalier
Puissance de la pelle	140	hp	N/A		1 hp =0.746 kW
Temps de terrassement	30	j	N/A		8 h (temps moyen de fonctionnement - 150 à 160 j/an)
A/R du tombereau	50	km	Oui	10 ans	1 tombereau
Poids du tombereau	23000	kg	N/A	ans	
Puissance du tombereau	304	hp	N/A		72 CV (diesel insonorisé)
<u>Mise en place des palplanches</u>					
<u>Palplanches</u>					
A/R des palplanches	150	km	Oui	10 ans	
Poids des palplanches	175000	kg	Oui	5 ans	réutilisable
Matériau	Acier		N/A	N/A	
<u>Pelle à câble</u>					
A/R du plateau	150	km	Oui	10 ans	
Poids de la pelle	54000	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la pelle à câble	367	hp	N/A		
<u>Centrale hydraulique</u>					
A/R de la centrale hydraulique	150	km	Oui	10 ans	
Poids de la centrale hydraulique	5 500	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la centrale hydraulique	400	hp	N/A		diesel
Matériau	Acier		N/A	N/A	
<u>Vibreux hydraulique (fonctionne avec la centrale hydraulique)</u>					
A/R du plateau	150	km	Oui	10 ans	A/R avec la pelle à câble
Poids du vibreur hydraulique	4 980	kg	Oui	10 ans	alimentation via la centrale hydraulique
Matériau	Acier		N/A	N/A	
Temps de mise en place des palplanches	30	j			8 h (temps moyen de fonctionnement - 150 à 160 j/an)

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
<u>Elimination des terres</u>					
Volume de sols éliminés	600	m ³			
Masse volumique du sol	1,8	t/m ³			
Tonnage de sols pollués	1 080	t			
Transport et élimination des terres					ISDI terres excédentaires faiblement impactées
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)

Réseau de surveillance					
<u>Piézomètre</u>					
Nombre de piézomètres	8,00		N/A	N/A	
Tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	120,00	m	N/A	N/A	
Tuyau (diamètre)	6,00	cm	N/A	N/A	diamètre externe
Poids tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	58,80	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Matériau (tubage piézomètre)	PEHD		N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids béton	36,46	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids gravier/sable (massif filtrant)	401,11	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids argile	109,39	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids tête de puits	16,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection

Mise en place des ouvrages de surveillance					
<u>Foration des ouvrages</u>					
A/R pour la phase de foration	250	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) + remorque (20t)
Poids de la foreuse	5 500	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la foreuse	70	CV	N/A	N/A	72 CV (diesel insonorisé)
Temps de forage	3	j	N/A	N/A	8 h (temps moyen de fonctionnement - 150 à 160 j/an)

Suivi du traitement					
A/R pour le personnel de dépollution	500	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) / une fois tous les 3 mois

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Mise en place des mesures constructives (vide sanitaire)					
<u>Construction vide sanitaire</u>					
Poids parpaing	8 640	kg	N/A	N/A	
<u>Béton (semelle filante ferrillée)</u>					
Volume de béton nécessaire	16	m ³	N/A	N/A	
Densité du béton	2,2	t/m ³	N/A	N/A	
Poids de béton	35,2	t	N/A	N/A	
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)
<u>Ferrailles</u>					béton apporté par une toupie
Poids ferrailles	5,28	t	N/A	N/A	ratio massique ferrailles/béton (0,15)
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t
<u>VMC</u>					
Poids	4,5	kg	Oui	10 ans	
Matériau	plastique		N/A	N/A	
Puissance	75	W	N/A	N/A	195 m ³ /h (1,1 v/h)

Atténuation naturelle contrôlée

L'atténuation naturelle contrôlée est seulement basée sur le suivi des conditions du milieu via un réseau piézométrique dense (8 piézomètres) et des analyses ad hoc. Le procédé ne traite donc que la zone saturée (le traitement de la zone non saturée se faisant uniquement par équilibre de phase liée à la diminution des concentrations en polluants dans la zone saturée). Un vide sanitaire ventilé est également nécessaire afin de gérer les impacts sanitaires résiduels par inhalation trop élevés (cf. calculs en annexe 1).

Tableau 35 : Description détaillée de l'atténuation naturelle contrôlée du site 4 (présentation du matériel et des matériaux utilisés)

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Données de base					
Masses initiales de polluants			N/A	N/A	
PCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	1,28E-01	t	N/A	N/A	
PCE : Masse totale estimée dans les sols (ZS)	5,67E+00	t	N/A	N/A	
PCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	5,13E-07	t	N/A	N/A	
TCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	6,84E-02	t	N/A	N/A	
TCE : Masse totale estimée dans les sols (ZS)	1,27E+00	t	N/A	N/A	
TCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	1,21E-06	t	N/A	N/A	
Masses finales de polluants			N/A	N/A	
Rendement épuratoire estimée de	60	%			Rendement estimée à partir de retours d'expérience dans des configurations similaires et des données de Mc Guire et al. (2006) et Carey et Mc Bean (2010) ; pas de traitement de la ZNS
PCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	5,13E-02	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
PCE : Masse totale estimée dans les sols	5,67E+00	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
PCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	2,05E-07	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
TCE : Masse totale estimée dans les eaux souterraines	2,74E-02	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
TCE : Masse totale estimée dans les sols	5,08E-01	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
TCE : Masse totale estimée dans les gaz des sols	4,85E-07	t	N/A	N/A	Approche simplifiée avec des rendements épuratoires identiques dans les différents milieux
Durée du chantier					
Durée	360	mois	N/A	N/A	
Nombre d'heures de fonctionnement par jour	-	heures	N/A	N/A	sans objet

Type de pollution	Quantité	Unité	Réutilisable	Amortissement (année)	Remarques
Réseau de surveillance					
<u>Piézomètre</u>					
Nombre de piézomètres	8,00		N/A	N/A	
Tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	120,00	m	N/A	N/A	
Tuyau (diamètre)	6,00	cm	N/A	N/A	diamètre externe
Poids tuyau piézomètre (longueur) - plein + crépine	58,80	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Matériau (tubage piézomètre)	PEHD		N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids béton	36,46	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids gravier/sable (massif filtrant)	401,11	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids argile	109,39	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection
Poids tête de puits	16,00	kg	N/A	N/A	Pour tous les ouvrages d'injection

Mise en place et suivi du système de traitement					
<u>Foration des ouvrages</u>					
A/R pour la phase de foration	250	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) + remorque (20t)
Poids de la foreuse	5 500	kg	N/A	15 ans	
Puissance de la foreuse	70	CV	N/A	N/A	72 CV (diesel insonorisé)
Temps de forage	3	j	N/A	N/A	8 h (temps moyen de fonctionnement - 150 à 160 j/an)

Suivi du traitement					
A/R pour le personnel de dépollution	500	km	Oui	10 ans	camionnette (J9) / une fois tous les 3 mois

Mise en place des mesures constructives (vide sanitaire)					
<u>Construction vide sanitaire</u>					
Poids parpaing	8 640	kg	N/A	N/A	
<u>Béton (semelle filante ferrillée)</u>					
Volume de béton nécessaire	16	m ³	N/A	N/A	
Densité du béton	2,2	t/m ³	N/A	N/A	
Poids de béton	35,2	t	N/A	N/A	
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t (plusieurs A/R pour le tonnage)
<u>Ferrailles</u>					béton apporté par une toupie
Poids ferrailles	5,28	t	N/A	N/A	ratio massique ferrailles/béton (0,15)
A/R de matériau	30	km	N/A	N/A	camion de 25 t
<u>VMC</u>					
Poids	4,5	kg	Oui	10 ans	
Matériau	plastique		N/A	N/A	
Puissance	75	W	N/A	N/A	195 m ³ /h (1,1 v/h)

3.4. EVALUATION DES IMPACTS DES PROCÉDES DE DEPOLLUTION PAR SITE.

Une fois la phase d'inventaire du cycle de vie réalisée, il s'agit d'analyser les impacts résultant de cet inventaire et de comparer les performances environnementales des procédés de dépollution pour chacun des cas d'étude (sites 1 à 4).

La comparaison des procédés se fait sur la base du traitement d'une unité fonctionnelle et du flux de référence qui y est associé, tel que cela est défini dans les tableaux 10 et 11.

L'analyse des impacts est réalisée à partir de l'inventaire du cycle de vie (ICV) à l'aide des méthodes ReCiPe² « Hierarchist » dans sa version « Midpoint Europe » et USEtox pour les catégories d'impacts toxicité humaine et écotoxicité. Ces méthodes permettent de calculer les impacts potentiels à mi-parcours, ils sont décrits dans l'annexe 2.

Les différents impacts pris en compte pour évaluer les procédés de dépollution dans le cadre de l'ACV sont les suivants :

- Echelle Globale : changement climatique, déplétion de la couche d'ozone, déplétion des ressources en énergie fossile, déplétion des ressources métalliques ;
- Echelle Régionale : acidification terrestre, eutrophisation aquatique, eutrophisation marine, formation d'ozone photochimique ;
- Echelle Locale : toxicité humaine, cancérigène, toxicité humaine, non-cancérigène, écotoxicité aquatique, écotoxicité terrestre, écotoxicité marine, particules / effets respiratoires inorganiques, occupation de sol urbain, occupation de sol agricole, transformation d'espace naturel, déplétion des ressources en eau, radiation ionisante.

Ensuite il est également possible d'exprimer les impacts sous une forme normalisée. Les impacts sont alors exprimés en **équivalents habitants européens**. Pour chaque catégorie d'impact, les facteurs de normalisation sont calculés à partir de la totalité des émissions qui contribuent à l'impact au cours d'une année de référence (cf. annexe 2). La valeur obtenue est ensuite divisée par le nombre d'habitants dans l'EU27, ce qui permet d'obtenir un facteur de normalisation qui correspond à par exemple 6900 kg éq de CO₂ par habitant de l'EU27. Il n'existe pas à ce jour de facteurs de normalisation disponibles pour la méthode USEtox.

Le chapitre suivant (cf. 3.5.1) illustre pour une technique de traitement – gestion par cas d'étude, via l'arborescence de l'impact « changement climatique », la contribution des matériaux utilisés, de l'énergie consommée, du matériel utilisé (cf. figures 15 à 18). Les postes dont la contribution est inférieure à 2 % ne sont pas représentés sur les figures.

Les chapitres 3.5.2 à 3.5.5 présentent ensuite les résultats de la comparaison des techniques de remédiation mises en œuvre pour les différents cas d'étude (Site 1 à 4).

² Méthode ReCiPe : <http://www.lcia-recipe.net/>

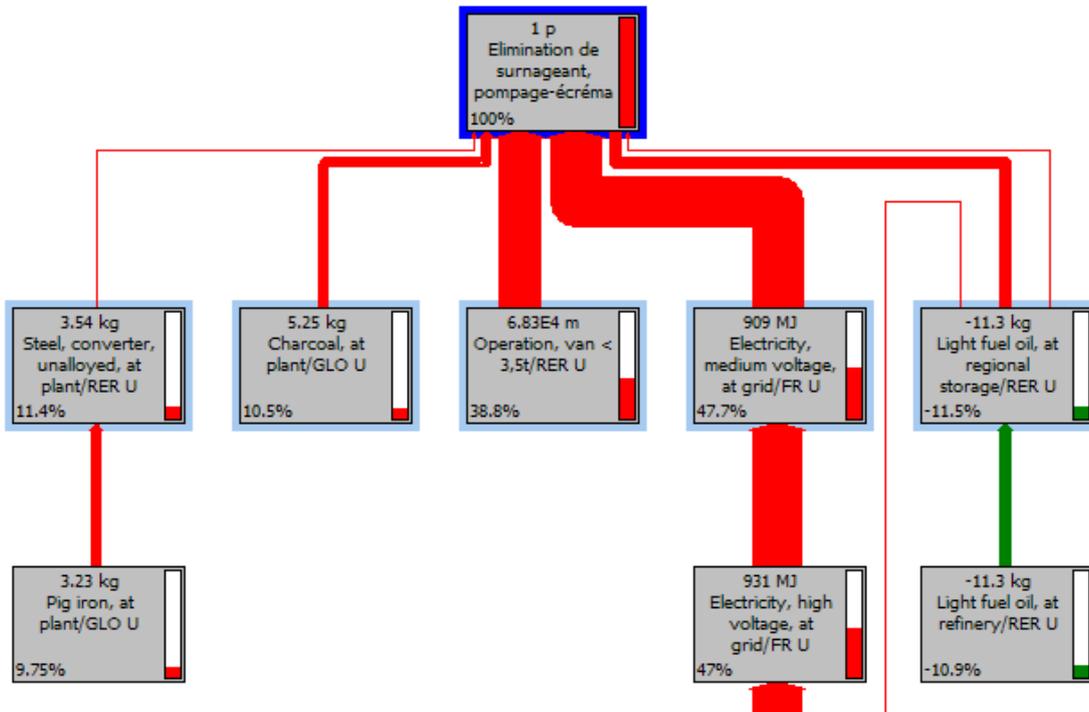
3.4.1. Contribution à l'arborescence d'impact, exemple du changement climatique.

Les figures suivantes représentent les contributions des différents postes aux procédés de dépollution pour les cas d'études sols pollués par du FOD (cf. Figure 15), sols contaminés par des métaux (cf. Figure 16), élimination de surnageant (cf. Figure 17) et récupération du plongeant et de la phase dissoute - pollution de la nappe par des COHV (cf. Figure 18).

Il apparaît clairement sur les figures qu'en fonction des cas d'étude, ce ne sont pas les mêmes postes qui vont contribuer à l'impact.

a) Site 1 : Pollution de la nappe par du FOD

Dans le cas de l'élimination du surnageant par pompage/écrémage, la consommation d'électricité et le déplacement du personnel qui assure la maintenance du site contribuent majoritairement à l'impact (respectivement 47,7 % et 38,8%). Le FOD récupéré et valorisé permet de réduire l'impact (arborescence verte donc positive de l'ordre de 11,5%).

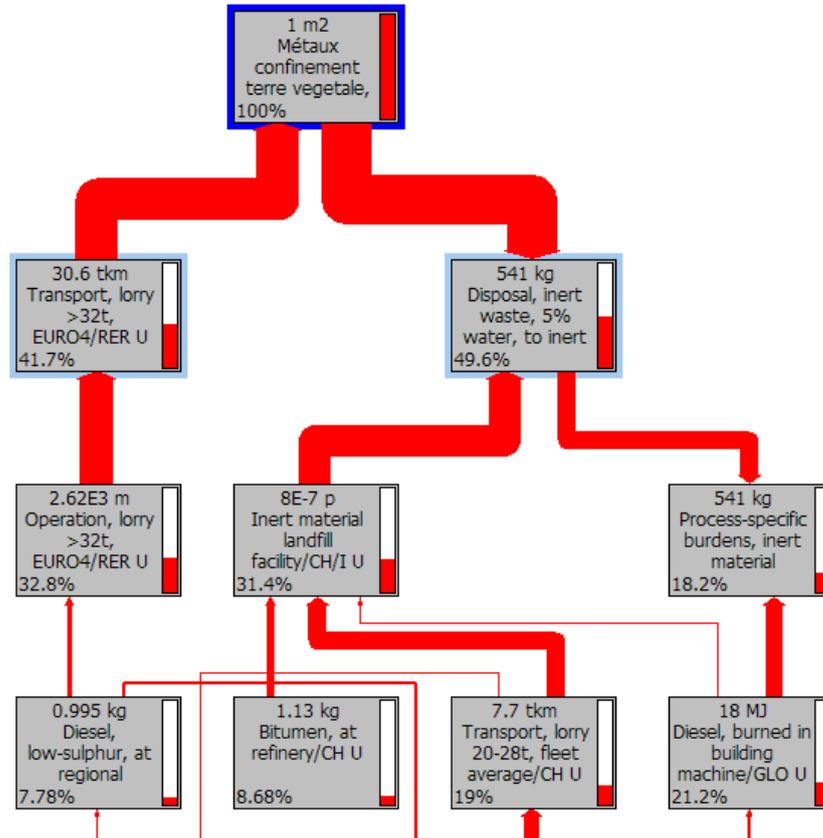


* 1P représente une unité fonctionnelle

Figure 15 : Arborescence d'impact : changement climatique ; Procédé d'élimination de surnageant par pompage-écrémage, sous Simapro.

b) Site 2 : Pollution des sols par des métaux / métalloïdes

Dans le cas de la gestion de sols pollués par des métaux/métalloïdes, ce sont le transport et la mise en décharge des terres excavées en excès qui contribuent majoritairement à l'impact relatif au changement climatique (respectivement 41,7 et 49,6 % pour le recouvrement par de la terre végétale).

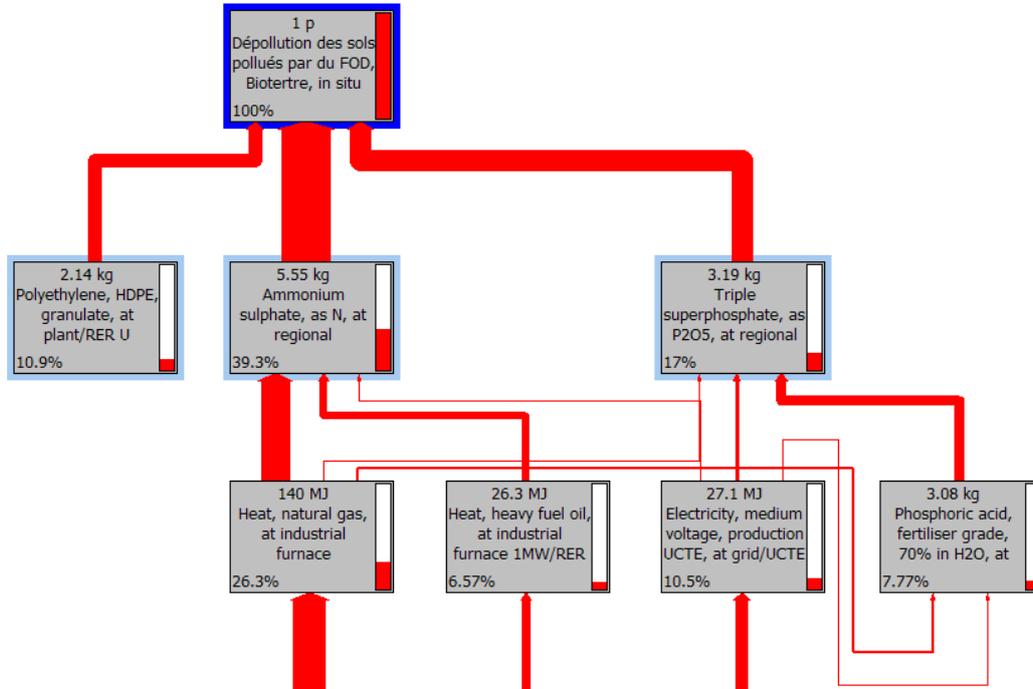


* 1P représente une unité fonctionnelle

Figure 16 : Arborescence d'impact : changement climatique ; Procédé dépollution des sols pollués par des métaux/métalloïdes, confinement, recouvrement de surface par de la terre végétale, sous Simapro.

c) Site 3 : Pollution des sols par du FOD

Dans le cas de la dépollution des sols contaminé par du FOD à l'aide d'un biotertre on site, ce sont les engrais utilisés par le traitement qui contribuent majoritairement à l'impact relatif au changement climatique (39,3%+17%).

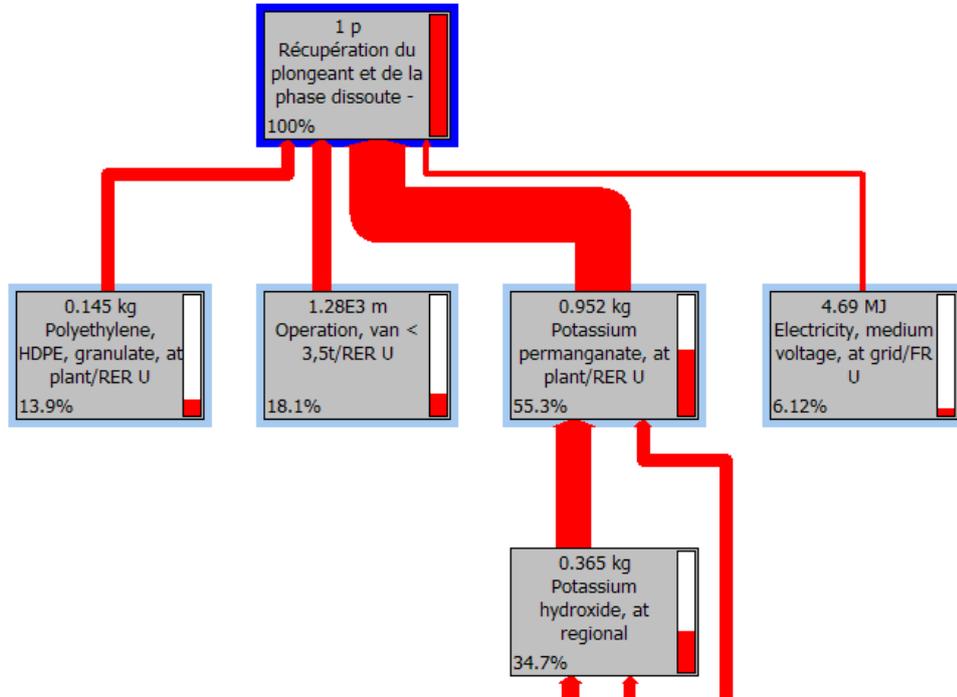


* 1P représente une unité fonctionnelle

Figure 17 : Arborescence d'impact : changement climatique ; Procédé dépollution des sols pollués par du FOD, biotertre on site, sous Simapro.

d) Site 4 : Pollution de la nappe par des COHV.

Dans le cas du traitement des COHV par ISCO, la consommation de permanganate de potassium contribue majoritairement à l'impact changement climatique (55,3%).



* 1P représente une unité fonctionnelle

Figure 18 : Arborescence d'impact : changement climatique ; Traitement des COHV par ISCO, sous Simapro.

3.4.2. Site 1 : récupération de surnageant - pollution de la nappe par du FOD.

Les figures 19 à 22 présentent les résultats obtenus pour la comparaison des procédés de récupération du surnageant d'une nappe polluée par du FOD, avec et sans valorisation du FOD récupéré. La comparaison est effectuée sur la base d'une unité fonctionnelle définie précédemment (cf. tableau 10 et 11) soit : un m³ de sol traité pour répondre aux normes de potabilité de l'eau à 500 m en aval de la pollution.

La comparaison des impacts potentiels (cf. figure 19) montre que les performances environnementales sont les plus défavorables pour la tranchée drainante et les meilleures pour le procédé triple-phase.

La figure 21 fait apparaître la contribution importante du transport aux impacts, avec pour principale raison la durée de mise en œuvre des procédés et les allers - retours pour la maintenance et la surveillance du site. Le transport contribue environ pour moitié aux impacts pour une majorité de catégorie d'impacts.

La durée de mise en œuvre des procédés a également une forte influence sur les consommations d'énergie (consommation d'électricité) et les impacts qui y sont associés. Par exemple, l'impact sur les radiations ionisantes (figure 21 et 22) est directement liée à la consommation d'électricité des procédés d'où un fort impact pour le pompage-écrémage.

Dans le cas de la tranchée drainante, les consommations de matériaux (cf. tableau 36, matériaux graveleux et géomembrane) contribuent également de manière significative aux impacts, la contribution de la consommation de matériaux peut représenter 50 % de l'impact total pour la catégorie d'impact transformation d'espace naturel.

L'influence de la valorisation du FOD (cf. figure 20 et 22) ne modifie pas la hiérarchie de l'évaluation environnementale des procédés de récupération du surnageant. De plus, la valorisation du FOD récupéré a un impact significatif sur un nombre limité de catégories d'impact principalement les catégories : déplétion des ressources en énergie fossile et transformation d'espace naturel. L'impact de la valorisation du FOD récupéré apparaît clairement sur la figure 21, la contribution du poste énergie est négative pour les catégories déplétion des ressources en énergie fossile et transformation d'espace naturel. La valorisation du FOD permet d'éviter un impact d'où une contribution négative aux impacts.

Tableau 36 : Comparaison des principaux postes des procédés de récupération de surnageant (FOD) qui ont une forte influence sur le résultat de l'évaluation environnementale.

	Pompage- écrémage	Tranchée-drainante	Extraction multi- phase
Durée du chantier	30 mois	120 mois	24 mois
Performance, FOD traité	6 281 kg	2 975 kg	8 800 kg
Matériaux graveleux	1 130 kg	1 600 000 kg	1 975 kg

Tableau 37 : Impacts totaux, par unité fonctionnelle, pour les différents procédés de récupération de surnageant (FOD) avec valorisation du FOD caractérisés avec les méthodes ReCiPe Hierarchist et USEtox.

Echelle	Catégorie d'impact*	Unité	Pompage-écrémage	Tranché drainante	Multi-phase
Globale	Changement climatique	kg CO ₂ éq.	4,99E+01	1,17E+02	2,16E+01
	Déplétion de la couche d'ozone	kg CFC-11 éq.	-8,51E-07	1,19E-05	-5,16E-06
	Déplétion des ressources en énergie fossile	kg oil éq.	1,59E+00	3,74E+01	-1,30E+01
	Déplétion des ressources métalliques	kg Fe éq.	7,82E+00	1,24E+01	4,49E+00
Régionale	Acidification terrestre	kg SO ₂ éq.	1,61E-01	3,98E-01	1,41E-02
	Eutrophisation aquatique	kg P éq.	1,49E-02	1,88E-02	5,92E-03
	Eutrophisation marine	kg N éq.	6,32E-02	1,62E-01	2,92E-02
	Formation d'ozone photochimique	kg NMVOC	2,71E-01	5,37E-01	1,35E-01
Locale	Toxicité humaine, cancérigène	CTUh	4,23E-06	9,52E-06	2,10E-06
	Toxicité humaine, non-cancérigène	CTUh	2,30E-05	1,56E-05	1,06E-05
	Ecotoxicité aquatique	CTUe	5,58E+02	1,37E+02	8,00E+01
	Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DB éq.	6,49E-03	1,53E-02	5,07E-05
	Ecotoxicité marine	kg 1,4-DB éq.	6,15E-01	5,32E-01	3,43E-01
	Particules / effets respiratoires inorganiques	kg PM10 éq.	9,29E-02	1,90E-01	3,06E-02
	Occupation de sol urbain	m ² a	4,29E-01	2,87E+00	5,27E-01
	Occupation de sol agricole	m ² a	2,32E+01	7,76E-01	1,40E+01
	Transformation d'espace naturel	m ²	-8,48E-03	5,47E-02	-2,46E-02
	Déplétion des ressources en eau	m ³	5,25E+03	5,61E+00	1,68E+02
	Radiation ionisante	kg U235 éq.	2,82E+02	7,46E+01	4,42E+01

*Les catégories d'impacts et les unités caractéristiques sont décrites dans l'annexe 2

Tableau 38 : Impacts totaux, par unité fonctionnelle, pour les différents procédés de récupération de surnageant (FOD) **sans valorisation du FOD** caractérisés avec les méthodes ReCiPe Hierarchist et USEtox.

Echelle	Catégorie d'impact	Unité	Pompage-écrémage	Tranché drainante	Multi-phase
Globale	Changement climatique	kg CO ₂ éq.	5,57E+01	1,21E+02	3,07E+01
	Déplétion de la couche d'ozone	kg CFC-11 éq.	4,37E-06	1,49E-05	3,11E-06
	Déplétion des ressources en énergie fossile	kg oil éq.	1,60E+01	4,58E+01	9,91E+00
	Déplétion des ressources métalliques	kg Fe éq.	7,97E+00	1,25E+01	4,73E+00
Régionale	Acidification terrestre	kg SO ₂ éq.	2,21E-01	4,33E-01	1,10E-01
	Eutrophisation aquatique	kg P éq.	1,60E-02	1,94E-02	7,65E-03
	Eutrophisation marine	kg N éq.	7,14E-02	1,66E-01	4,22E-02
	Formation d'ozone photochimique	kg NMVOC	3,11E-01	5,60E-01	1,98E-01
Locale	Toxicité humaine, cancérigène	CTUh	4,51E-06	9,69E-06	2,55E-06
	Toxicité humaine, non-cancérigène	CTUh	2,35E-05	1,59E-05	1,15E-05
	Ecotoxicité aquatique	CTUe	5,63E+02	1,40E+02	8,80E+01
	Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DB éq.	9,61E-03	1,71E-02	4,99E-03
	Ecotoxicité marine	kg 1,4-DB éq.	6,54E-01	5,55E-01	4,06E-01
	Particules / effets respiratoires inorganiques	kg PM10 éq.	1,10E-01	2,00E-01	5,72E-02
	Occupation de sol urbain	m ² a	4,92E-01	2,91E+00	6,26E-01
	Occupation de sol agricole	m ² a	2,32E+01	7,89E-01	1,41E+01
	Transformation d'espace naturel	m ²	1,24E-02	6,69E-02	8,44E-03
	Déplétion des ressources en eau	m ³	5,25E+03	5,64E+00	1,68E+02
Radiation ionisante	kg U235 éq.	2,83E+02	7,51E+01	4,55E+01	

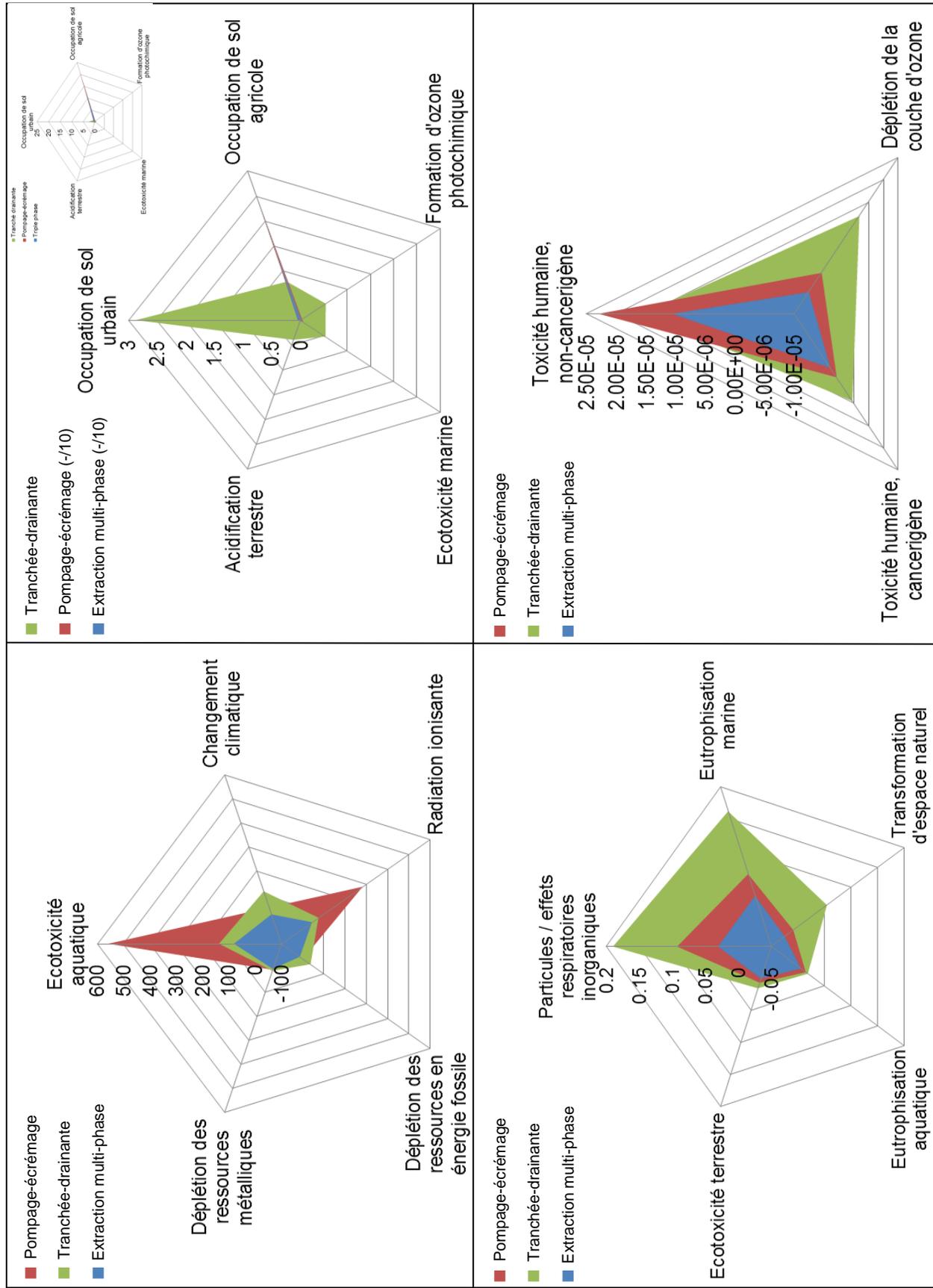


Figure 19 : Comparaison des procédés de traitement pour l'élimination de surnageant (FOD). Impacts potentiels à mi-parcours exprimés en unité caractéristique (cf. tableau 36), calculs réalisés avec les méthodes ReCI/Pe Hierarchist et USEtox.

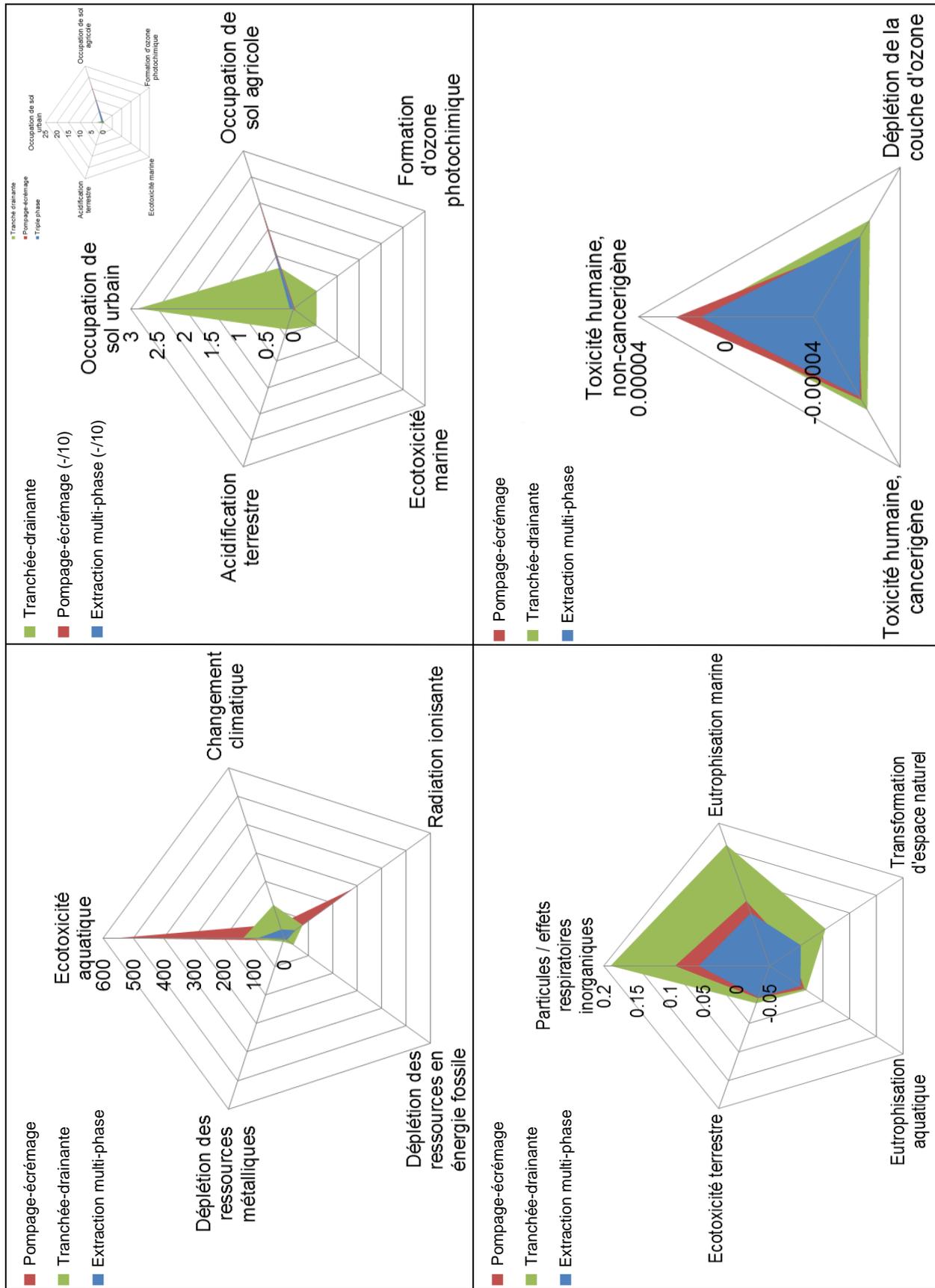


Figure 20 : Comparaison des procédés de traitement pour l'élimination de surnageant (FOD). Impacts potentiels à mi-parcours exprimés en unité caractéristique (cf. tableau 37), calculs réalisés avec les méthodes ReCI/Pe Hierarchist et USEtox, sans valorisation du FOD récupéré.

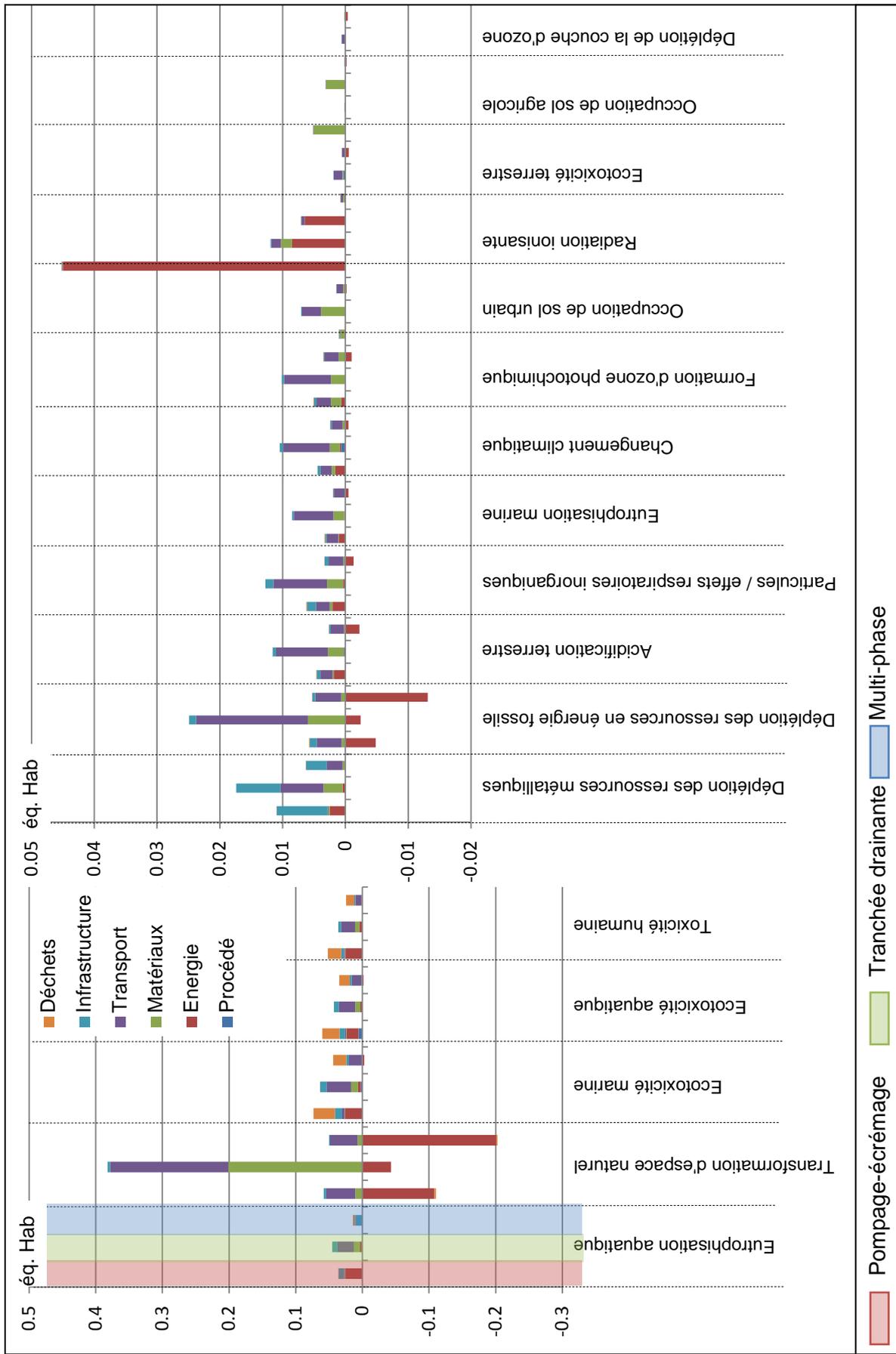


Figure 21 : Comparaison du poids des différents postes pour les procédés de traitement pour l'élimination de surnageant (FOD). Impacts potentiels à mi-parcours **normalisés**, calculs réalisés avec la méthode ReCiPe, Hierarchist.

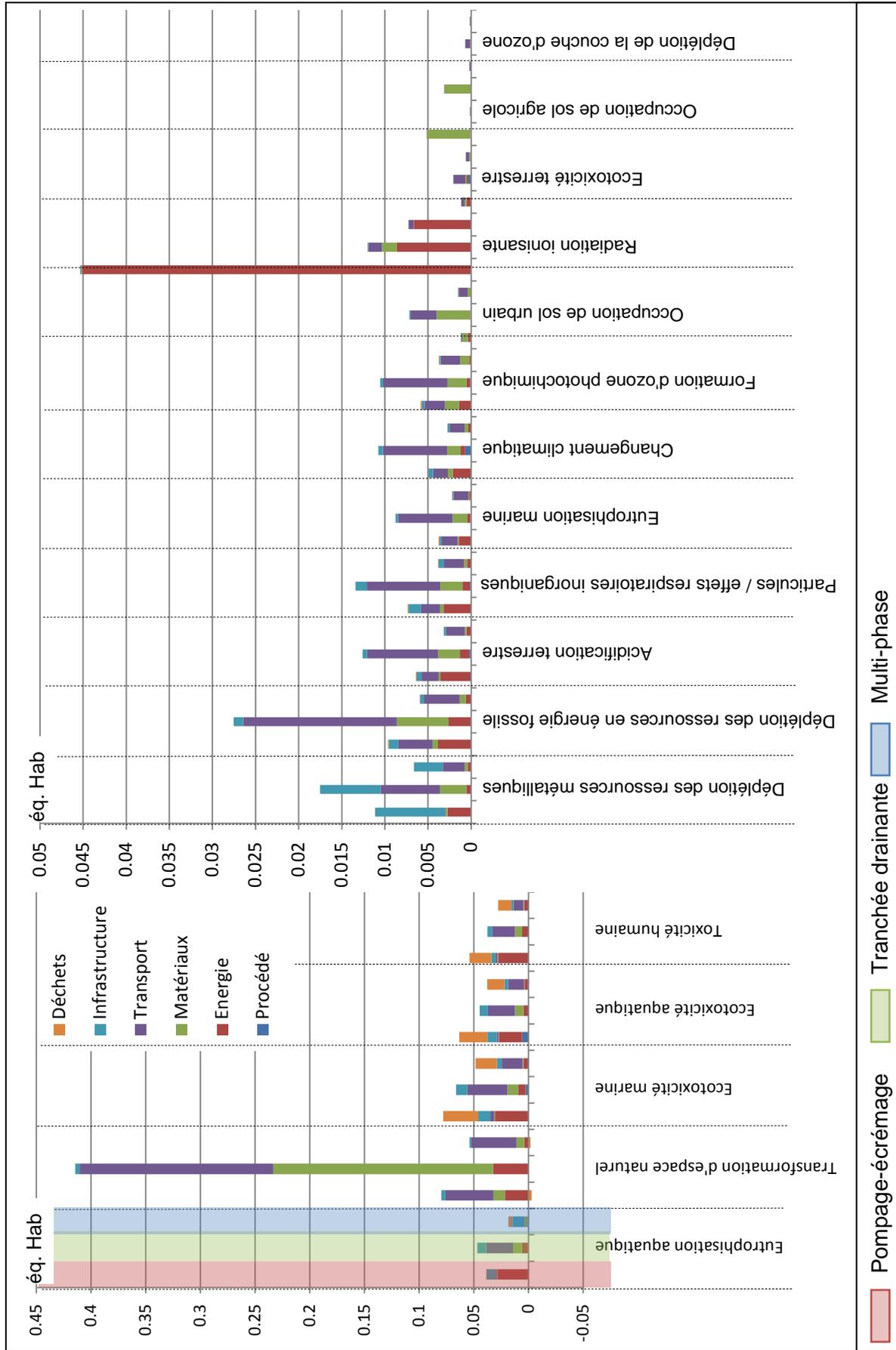


Figure 22 : Comparaison du poids des différents postes pour les procédés de traitement pour l'élimination de surageant (FOD). Impacts potentiels à mi-parcours normalisés, calculs réalisés avec la méthode ReCiPe, Hierarchist, sans valorisation du FOD récupéré.

3.4.3. Site 2 : confinement d'un sol pollué aux métaux/métalloïdes

Les figures 23, 24 et 25 présentent les résultats obtenus pour la comparaison des différents procédés de recouvrement de surface pour le confinement d'un sol pollué aux métaux/métalloïdes. La comparaison est effectuée sur la base d'une unité fonctionnelle soit : **un mètre carré (m²) de sol recouvert.**

La comparaison des procédés de traitement laisse apparaître d'importantes différences entre les procédés. Le recouvrement de surface avec du béton est le procédé le plus impactant, alors que l'utilisation de terre végétale apparaît comme la solution la moins pénalisante ; par ailleurs, le recouvrement par de l'enrobé et l'encapsulation ont des impacts comparables (cf. Figure 23).

Une observation plus détaillée des différents postes (cf. Figure 24) montre que l'impact des différentes techniques est principalement imputable aux consommations de matériaux utilisés pour réaliser le recouvrement. Le béton et l'acier utilisés pour le recouvrement de surface avec du béton contribuent pour 80 à plus de 90 % aux impacts totaux.

Une comparaison des trois autres procédés (hors recouvrement béton): recouvrement de surface avec de la terre végétale recouvrement de surface avec de l'enrobé et encapsulation laissent apparaître des différences d'impacts (cf. Figure 25). Ces dernières sont également imputables aux besoins en matériaux des techniques. Par exemple, l'impact de l'utilisation d'enrobé est supérieur à celui de la terre végétale. La technique qui apparaît comme la moins impactante est celle qui consomme le moins de matériaux, à savoir le recouvrement de surface avec de la terre végétale.

Le tableau 39 présente les principales caractéristiques des différents procédés de confinement – recouvrement de la pollution aux métaux - métalloïdes qui influencent de façon significative les résultats d'ACV pour la comparaison de ces procédés.

Tableau 39 : Comparaison des principales caractéristiques des procédés de recouvrement / confinement des sols pollués par des métaux – métalloïdes.

Procédé de traitement	Recouvrement par du béton	Recouvrement par de l'enrobé	Recouvrement par de la terre végétale	Encapsulation
Quantité de matériaux consommée par les techniques de traitement	7 880 t de béton 1 180 t d'acier 10 800 t de graves	1 800 t d'enrobé 16 200 t de graves	7 200 t de terre végétale	15 800 t d'argile 9 480 t de graves 55 t de plastiques
t.km parcourues pour le transport des matériaux et des terres excavées	1,12.10 ⁶ t.km	1,11.10 ⁶ t.km	4,59.10⁵ t.km	1,08.10 ⁶ t.km
Tonnages de terres excavées enfouies en centre de stockage	17 600 t	18 900 t	8 100 t	-

Tableau 40 : Impacts potentiels à mi-parcours totaux, calculs réalisés avec les méthodes ReCiPe Hierarchist Europe et USEtox

Echelle	Catégorie d'impact	Unité	Métaux : recouvrement par du béton	Métaux : recouvrement par de l'enrobé	Métaux : recouvrement par de la terre végétale	Métaux : encapsulation
Globale	Changement climatique	kg CO ₂ éq.	2,19E+02	2,19E+01	7,74E+00	2,13E+01
	Déplétion de la couche d'ozone	kg CFC-11 éq.	1,22E-05	8,48E-06	1,73E-06	2,04E-06
	Déplétion des ressources en énergie fossile	kg oil éq.	5,98E+01	2,12E+01	4,04E+00	1,14E+01
	Déplétion des ressources métalliques	kg Fe éq.	2,45E+02	1,02E+00	3,68E-01	1,05E+00
	Acidification terrestre	kg SO ₂ éq.	7,01E-01	1,38E-01	3,87E-02	9,27E-02
Régionale	Eutrophisation aquatique	kg P éq.	9,17E-02	2,56E-03	6,83E-04	1,79E-03
	Eutrophisation marine	kg N éq.	2,24E-01	5,41E-02	2,00E-02	4,02E-02
	Formation d'ozone photochimique	kg NMVOC	7,68E-01	1,87E-01	6,55E-02	1,41E-01
	Toxicité humaine, cancérigène	CTUh	1,12E-04	1,99E-06	6,65E-07	1,72E-06
	Toxicité humaine, non-cancérigène	CTUh	1,31E-04	1,23E-06	4,27E-07	1,23E-06
Locale	Ecotoxicité aquatique	CTUe	1,40E+03	1,87E+01	6,44E+00	2,33E+01
	Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DB éq.	2,20E-02	5,06E-03	1,10E-03	2,34E-03
	Ecotoxicité marine	kg 1,4-DB éq.	4,15E+00	8,42E-02	2,17E-02	5,51E-02
	Particules / effets respiratoires inorganiques	kg PM10 éq.	5,80E-01	5,47E-02	1,75E-02	4,00E-02
	Occupation de sol urbain	m ² a	3,36E+00	1,46E+00	5,73E-01	5,46E-01
	Occupation de sol agricole	m ² a	4,24E+00	3,69E-01	1,48E-01	7,93E-02
	Transformation d'espace naturel	m ²	-1,29E-02	-2,88E-02	-2,04E-02	6,93E-03
	Déplétion des ressources en eau	m ³	3,65E+00	5,21E-01	1,08E-01	9,49E-01
	Radiation ionisante	kg U235 éq.	3,39E+01	2,69E+00	6,76E-01	2,79E+00

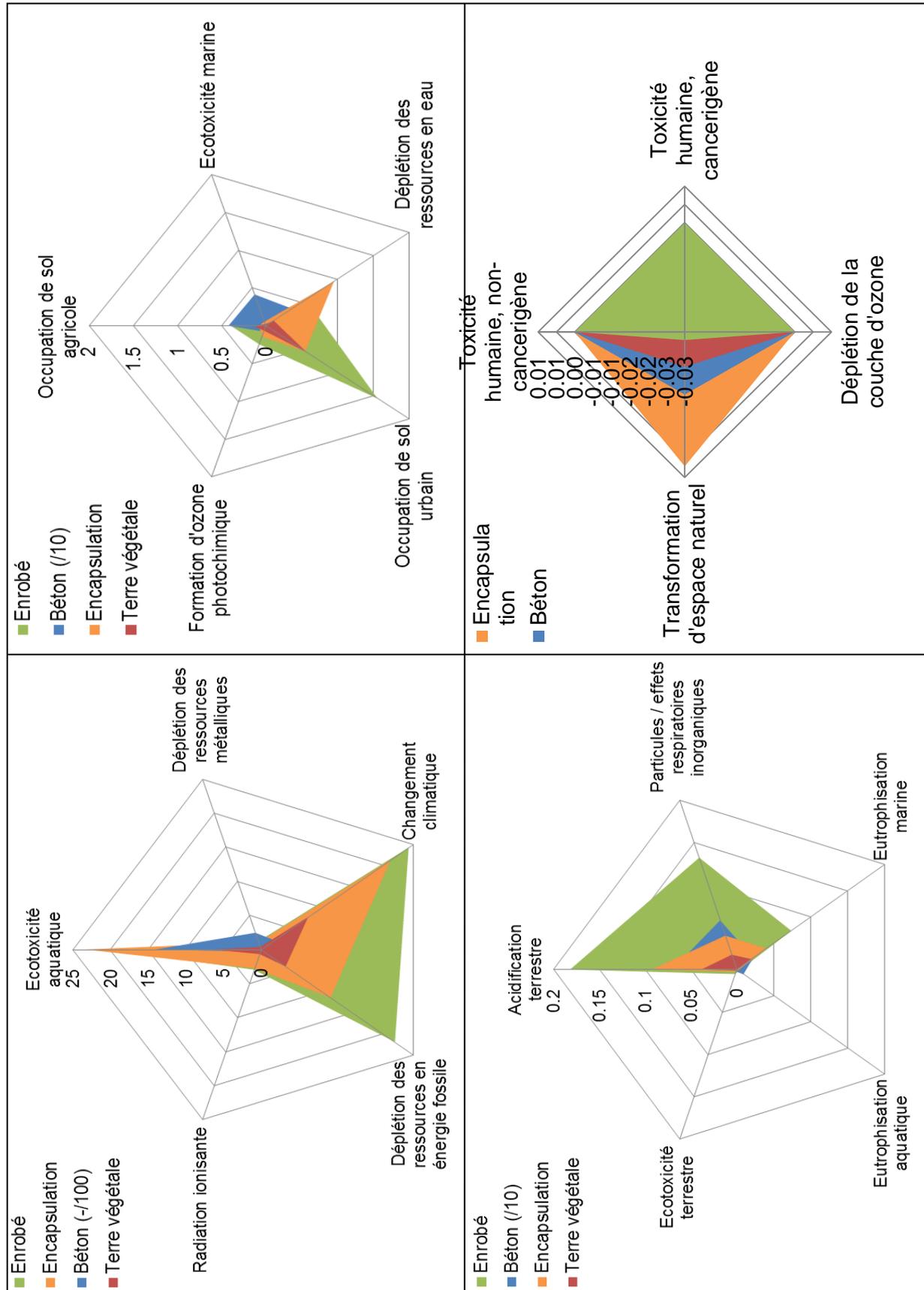


Figure 23 : Comparaison des procédés de traitement pour le confinement d'un sol pollué par des métaux. Impacts potentiels à mi-parcours exprimés en unité caractéristique (cf. tableau 39), calculs réalisés avec les méthodes ReCiPe Hierarchist Europe et USEtox.

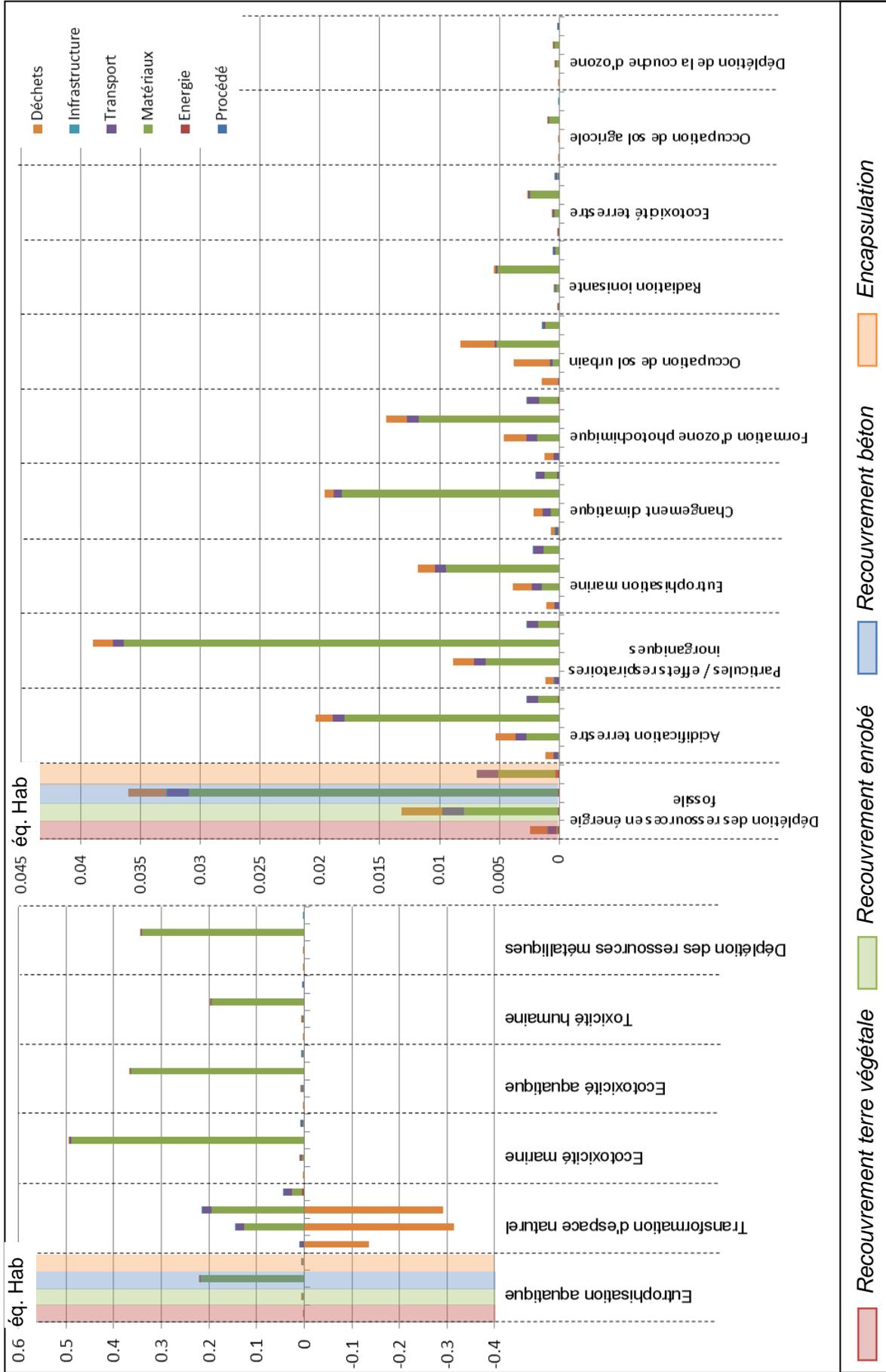


Figure 24 : Comparaison des procédés de traitement pour le confinement d'un sol pollué par des métaux. Impacts potentiels à mi-parcours normalisés, calculs réalisés avec la méthode ReCiPe, Hierarchist, Europe.

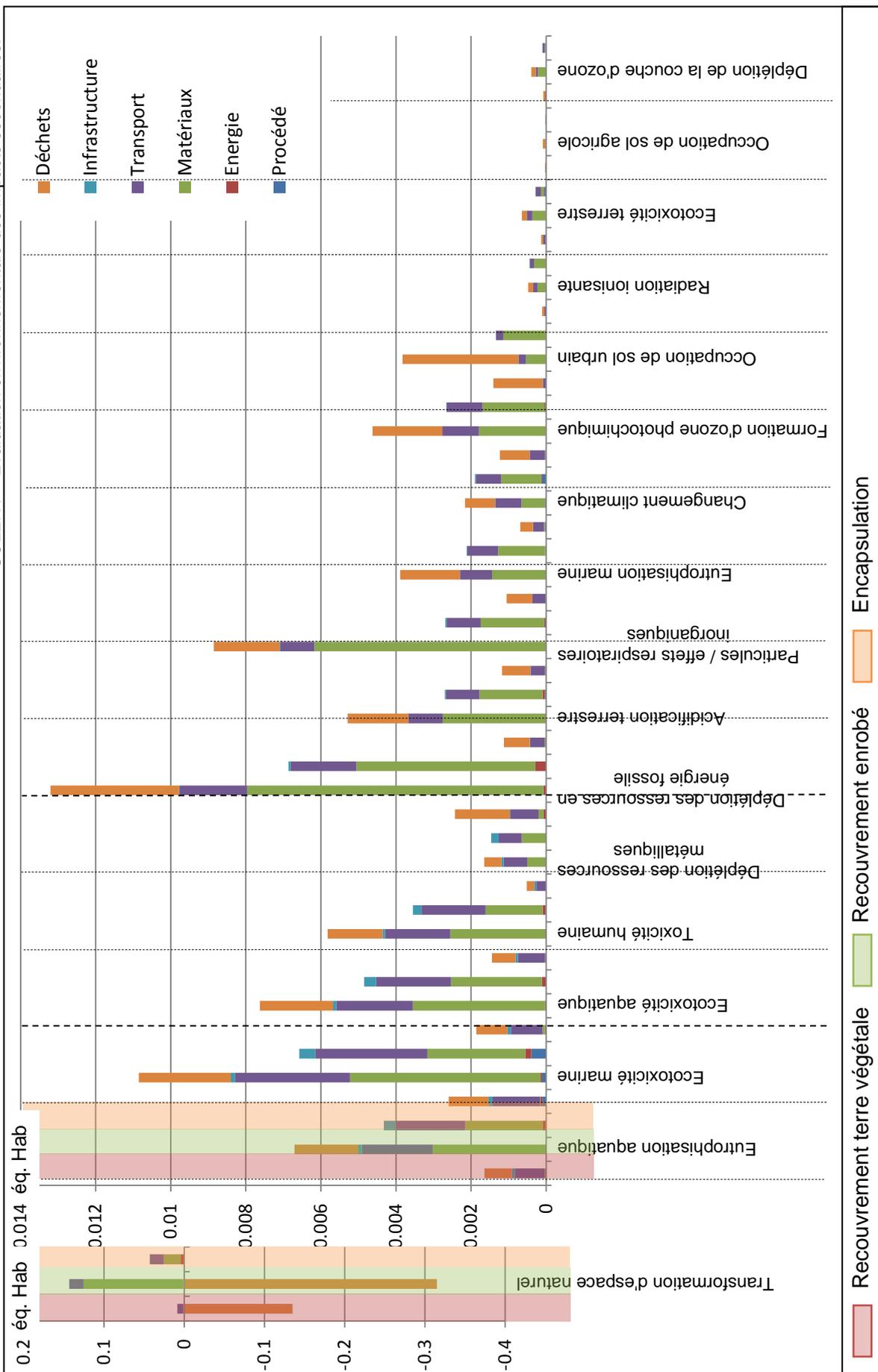


Figure 25 : Comparaison des procédés de traitement pour le confinement d'un sol pollué par des métaux (hors recouvrement béton). Impacts potentiels à mi-parcours **normalisés**, calculs réalisés avec la méthode ReCiPe, Hierarchist.

3.4.4. Site 3 : traitement d'un sol pollué par du FOD

Les figures 26 et 27 présentent les résultats obtenus pour la comparaison des procédés de traitement biologique d'un sol pollué par du FOD. La comparaison est effectuée sur la base d'une unité fonctionnelle telle qu'elle est définie dans le tableau 10 soit 1 m³ de sol pollué au FOD à traiter pour rendre l'usage du sol compatible au droit du site.

Les différences d'impacts potentiels observées entre les procédés de traitement ne sont pas aussi significatives que dans le cadre du confinement - recouvrement, mais il est possible d'en déduire des enseignements. Le procédé biotertre apparaît comme le moins impactant des trois procédés étudiés (cf. Figure 26).

Une comparaison plus fine des procédés laisse apparaître des différences entre les impacts. Elles sont principalement dues à trois « postes » : la consommation de matériaux des procédés et en particulier les matériaux utilisés pour l'aménagement du site pour réaliser le traitement (cf. Figure 27 et tableau 41) et les intrants utilisés pour réaliser la biodégradation représentent entre 60 % et plus de 80 % de la contribution au total des impacts pour une majorité de catégories d'impacts. Par ailleurs, pour certaines catégories d'impact notamment la déplétion des ressources métalliques, la contribution des infrastructures peut être supérieure à 50 % en particulier pour le Landfarming et le compostage. Cela résulte de l'utilisation de machine (retourneur d'andains) sur une longue période, respectivement 12 et 9 mois (cf. tableau 41).

Tableau 41 : Comparaison des principales caractéristiques des procédés biologiques de dégradation du FOD

	Biotertre	Compostage	Landfarming
Durée du chantier	6 mois	9 mois	12 mois
<i>Surface nécessaire au traitement</i>	1200 m²	6523 m ²	6400 m ²
<i>Quantité d'intrants consommés</i>	7 487,3 kg de (NH ₄) ₂ SO ₄ 4 310,9 kg de (Na ₃ PO ₄ •12H ₂ O)	7 487,3 kg de (NH ₄) ₂ SO ₄ 4 310,9 kg de (Na ₃ PO ₄ •12H ₂ O)	7 487,3 kg de (NH ₄) ₂ SO ₄ 4 310,9 kg de (Na ₃ PO ₄ •12H ₂ O)
<i>Surface de PEHD consommée</i>	1500 m ²	8154 m ²	8000 m ²

Tableau 42 : Impacts totaux à mi-parcours, par unité fonctionnelle, pour les différents procédés de traitement des sols pollués par du FOD, caractérisés avec les méthodes ReCiPe Hierarchist et USEtox.

Echelle	Catégorie d'impact	Unité	Biotertre	Compostage	Landfarming
Globale	Changement climatique	kg CO ₂ éq.	3,80E+01	7,99E+01	9,25E+01
	Déplétion de la couche d'ozone	kg CFC-11 éq.	3,87E-06	6,24E-06	6,25E-06
	Déplétion des ressources en énergie fossile	kg oil éq.	1,54E+01	2,96E+01	3,88E+01
	Déplétion des ressources métalliques	kg Fe éq.	2,99E+00	1,04E+01	1,29E+01
Régionale	Acidification terrestre	kg SO ₂ éq.	2,00E-01	4,34E-01	4,72E-01
	Eutrophisation aquatique	kg P éq.	5,14E-02	5,91E-02	6,12E-02
	Eutrophisation marine	kg N éq.	3,47E-02	9,32E-02	1,03E-01
	Formation d'ozone photochimique	kg NMVOC	1,37E-01	3,30E-01	3,85E-01
Locale	Toxicité humaine, cancérigène	CTUh	2,29E-06	5,91E-06	7,06E-06
	Toxicité humaine, non-cancérigène	CTUh	6,19E-06	1,02E-05	1,05E-05
	Ecotoxicité aquatique	CTUe	4,66E+01	9,79E+01	1,17E+02
	Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DB éq.	6,47E-03	8,28E-03	8,51E-03
	Ecotoxicité marine	kg 1,4-DB éq.	6,97E-02	1,54E-01	1,76E-01
	Particules / effets respiratoires inorganiques	kg PM10 éq.	4,66E-01	1,61E+00	1,64E+00
	Occupation de sol urbain	m ² a	1,51E+00	1,22E+00	1,30E+00
	Occupation de sol agricole	m ² a	1,43E-02	3,72E-02	3,68E-02
	Transformation d'espace naturel	m ²	1,08E+00	4,21E+00	4,20E+00
	Déplétion des ressources en eau	m ³	5,63E+00	1,46E+01	1,46E+01

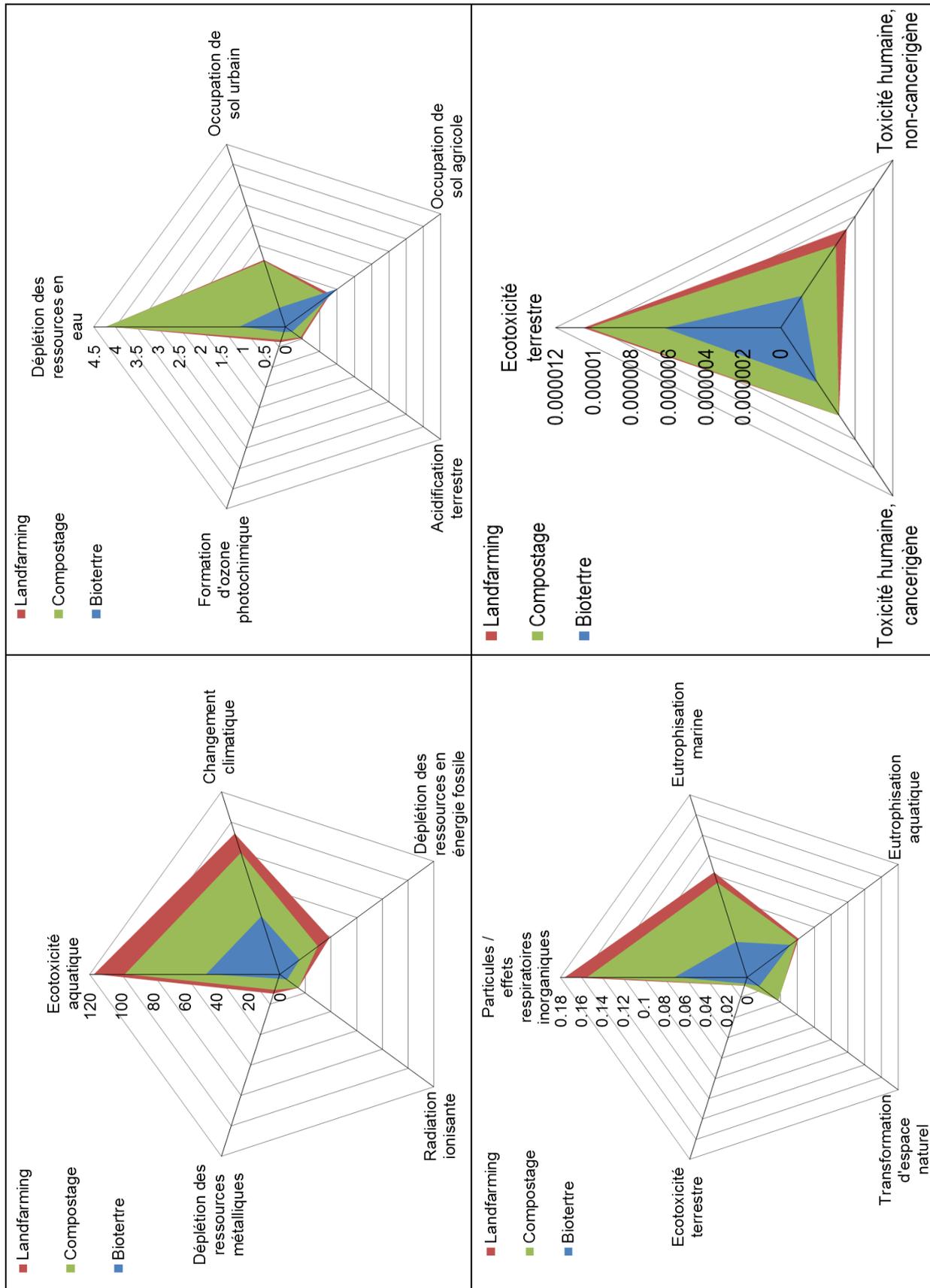


Figure 26 : Comparaison des procédés de traitement pour la dépollution d'un sol pollué au FOD. Impacts potentiels à mi-parcours exprimés en unité caractéristique (cf. tableau 41), calculs réalisés avec la méthode ReCiPe et Usetox, Hierarchist.

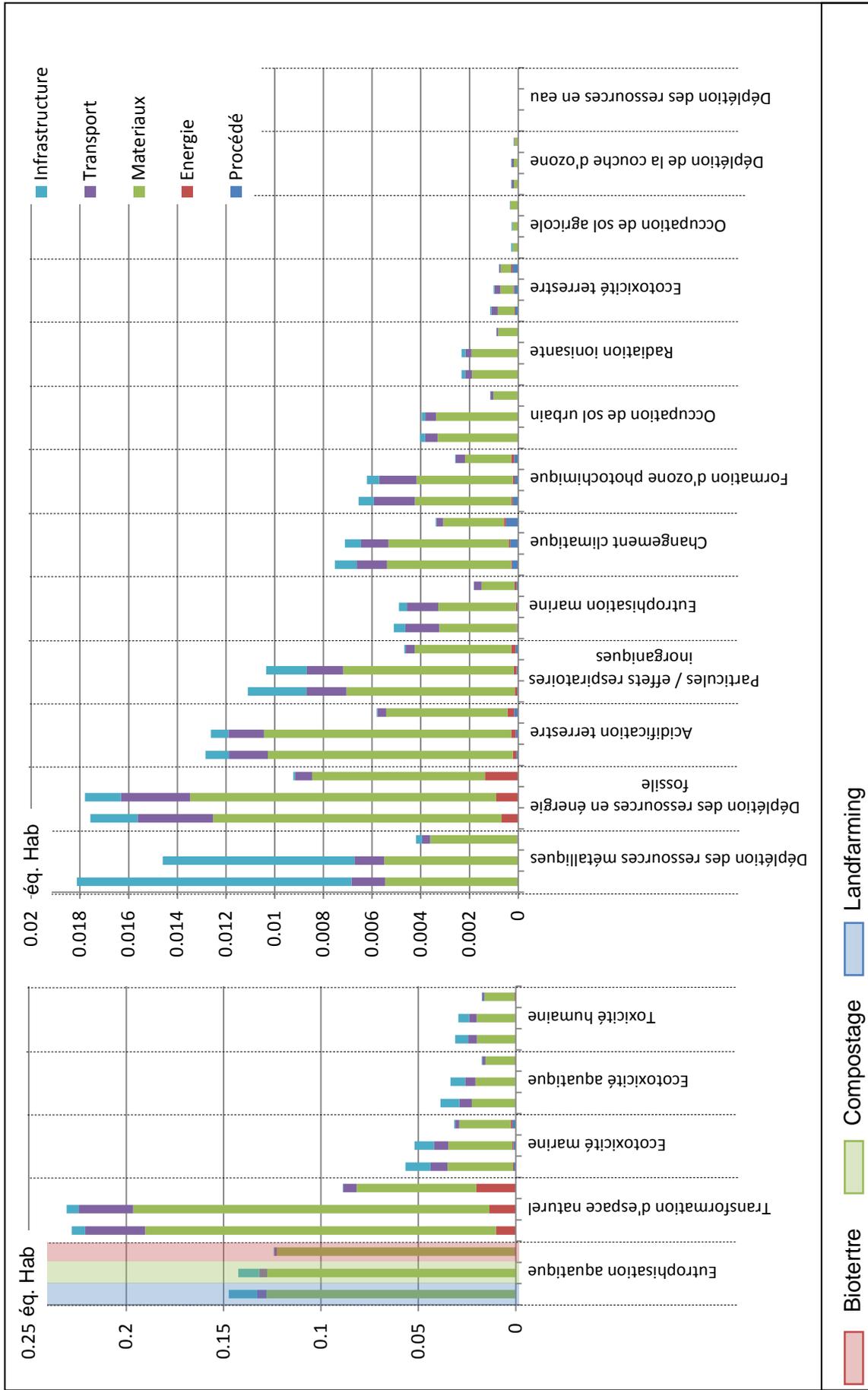


Figure 27 : Comparaison des procédés de traitement pour la dépollution d'un sol pollué au FOD. Impacts potentiels à mi-parcours normalisés, calculs réalisés avec la méthode ReCiPe, Hierarchist.

3.4.5. Site 4 : récupération du plongeant et de la phase dissoute - pollution de la nappe par des COHV

Le tableau 43 et les figures 28 et 29 présentent les résultats obtenus pour la comparaison des procédés de récupération du plongeant et de la phase dissoute d'une nappe polluée par des COHV. La comparaison est effectuée sur la base d'une unité fonctionnelle soit : 1 m³ de sol pollué par les COHV à traiter pour que l'eau de la nappe réponde aux normes de potabilisation dans un puits à 500 m en aval et que l'usage au droit du site soit compatible avec les normes en vigueur (cf. tableau 10).

La comparaison des impacts potentiels (cf. figure 28) montre que les performances environnementales sont les plus défavorables pour la BPR et les plus favorables pour l'ISCO et le Sparging-venting.

La figure 29 fait apparaître des différences de performances entre les procédés selon les catégories d'impacts. L'ISCO a un impact fort sur les catégories d'impacts écotoxiques et toxiques. Plus de 95 % de la contribution à ces impacts est attribuée au procédé. Cela résulte de l'utilisation de permanganate de potassium pour traiter les COHV. Le sparging-venting est défavorable du point de vue des radiations ionisantes, car c'est le procédé faisant le plus appel à l'énergie électrique (plus de 98 % de la contribution à l'impact).

Ensuite, pour les autres catégories d'impacts, le poste « matériaux » contribue fortement aux impacts (dans la plupart des cas supérieur à 80 % de l'impact total). Les procédés les moins performants, sont ceux pour lesquels il a été nécessaire de mettre en œuvre un vide sanitaire (ce qui a nécessité de consommer du béton armé).

L'atténuation naturelle monitorée n'apparaît pas comme le meilleur « procédé », car les performances environnementales sont très dépendantes de l'impact du transport nécessaire pour la surveillance du site. La contribution du transport représente plus de 80 % des impacts totaux, pour cette technique et pour les impacts en lien direct avec le transport (changement climatique, déplétion de ressource en énergie fossile, acidification terrestre...). Les hypothèses sur les distances parcourues et la fréquence de surveillance du site influencent fortement le résultat. De plus, la durée de « traitement » reste fortement pénalisante.

Tableau 43 : Comparaison des principales caractéristiques contribuant aux impacts, des procédés de traitement des COHV

	Sparging-venting	ISCO	Bio anaérobie	Atténuation naturelle monitorée	BPR
Matériaux	-	23 200 kg de KMnO_4	24 200 kg d'acide lactique 40 t de béton armé	40 t de béton armé	918 t de graves 40 t de béton armé
Transport	-	-	$1,47 \cdot 10^3$ t.km	$1,47 \cdot 10^3$ t.km	$7,14 \cdot 10^4$ t.km
Consommation électrique	$2 \cdot 10^5$ kWh	$1,27 \cdot 10^4$ kWh	$1,4 \cdot 10^4$ kWh	$1,94 \cdot 10^4$ kWh	$1,94 \cdot 10^4$ kWh
Durée du traitement	24 mois	12 mois	24 mois	360 mois	3,3 mois

Tableau 44 : Totals des impacts à mi-parcours, par unité fonctionnelle, pour les différents procédés de traitement des COHV, caractérisés avec les méthode ReCiPe Hierarchist et USEtox.

Echelle	Catégorie d'impact	Unité caractéristique	Sparging-venting	ISCO	Bio anaérobie	BPR	Atténuation naturelle monitorée (AR 500 km)	Atténuation naturelle monitorée (AR 50 km)
Globale	Changement climatique	kg CO ₂ éq.	4,75E+00	2,01E+00	1,04E+01	1,99E+01	1,22E+01	2,81E+00
	Déplétion de la couche d'ozone	kg CFC-11 éq.	2,28E-07	1,61E-07	1,39E-06	1,24E-06	1,64E-06	2,36E-07
	Déplétion des ressources en énergie fossile	kg oil éq.	2,48E+00	7,99E-01	5,68E+00	5,63E+00	4,04E+00	8,09E-01
	Déplétion des ressources métalliques	kg Fe éq.	2,13E-01	2,75E+01	1,96E+00	3,55E-01	1,79E+00	3,90E-02
Régionale	Acidification terrestre	kg SO ₂ éq.	1,89E-02	7,65E-03	3,42E-02	6,56E-02	4,29E-02	9,53E-03
	Eutrophisation aquatique	kg P éq.	1,04E-03	9,27E-04	2,94E-03	8,04E-03	1,05E-03	8,22E-04
	Eutrophisation marine	kg N éq.	4,99E-03	2,24E-03	8,31E-03	2,15E-02	2,05E-02	3,53E-03
	Formation d'ozone photochimique	kg NIMVOC	2,16E-02	7,53E-03	3,45E-02	7,50E-02	7,28E-02	1,22E-02
Locale	Toxicité humaine, cancérigène	CTUh	1,21E-05	3,66E-07	1,70E-06	9,48E-06	1,26E-06	9,54E-07
	Toxicité humaine, non-cancérigène	CTUh	2,39E-06	1,66E-07	1,28E-06	1,07E-05	1,03E-06	9,51E-07
	Ecotoxicité aquatique	CTUe	4,98E+01	2,86E+00	1,78E+01	1,15E+02	1,27E+01	1,06E+01
	Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DB éq.	5,29E-04	2,17E-04	1,11E-03	3,12E-03	1,87E-03	3,85E-04
	Ecotoxicité marine	kg 1,4-DB éq.	2,38E-02	1,39E+00	7,22E-02	3,50E-01	4,83E-02	3,40E-02
	Particules / effets respiratoires inorganiques	kg PM10 éq.	7,43E-03	2,88E-03	1,39E-02	5,27E-02	2,22E-02	6,15E-03
	Occupation de sol urbain	m ² a	1,72E-02	2,70E-02	3,96E-02	2,92E-01	3,22E-02	1,70E-02
	Occupation de sol agricole	m ² a	2,73E-01	3,37E-02	1,16E-01	2,01E+01	4,47E-02	1,75E+00
	Transformation d'espace naturel	m ²	6,17E-04	3,82E-04	3,20E-03	-9,39E-04	4,06E-03	6,22E-04
	Déplétion des ressources en eau	m ³	1,24E-01	7,62E-02	1,06E-01	3,11E-01	4,33E-02	3,20E-02
Radiation ionisante	kg U235 éq.	2,30E+01	2,07E+00	3,42E+00	4,98E+00	2,89E+00	2,70E+00	

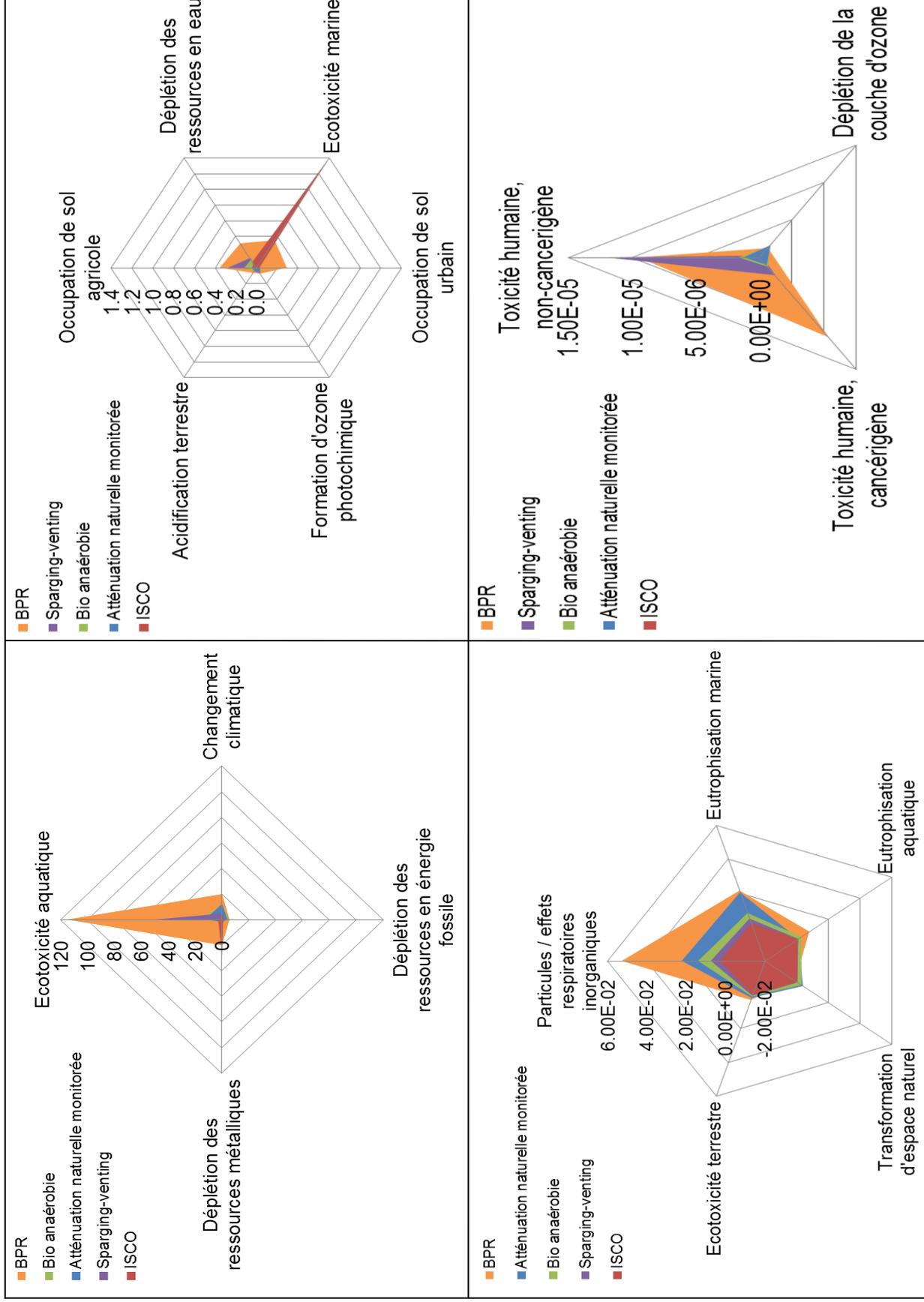
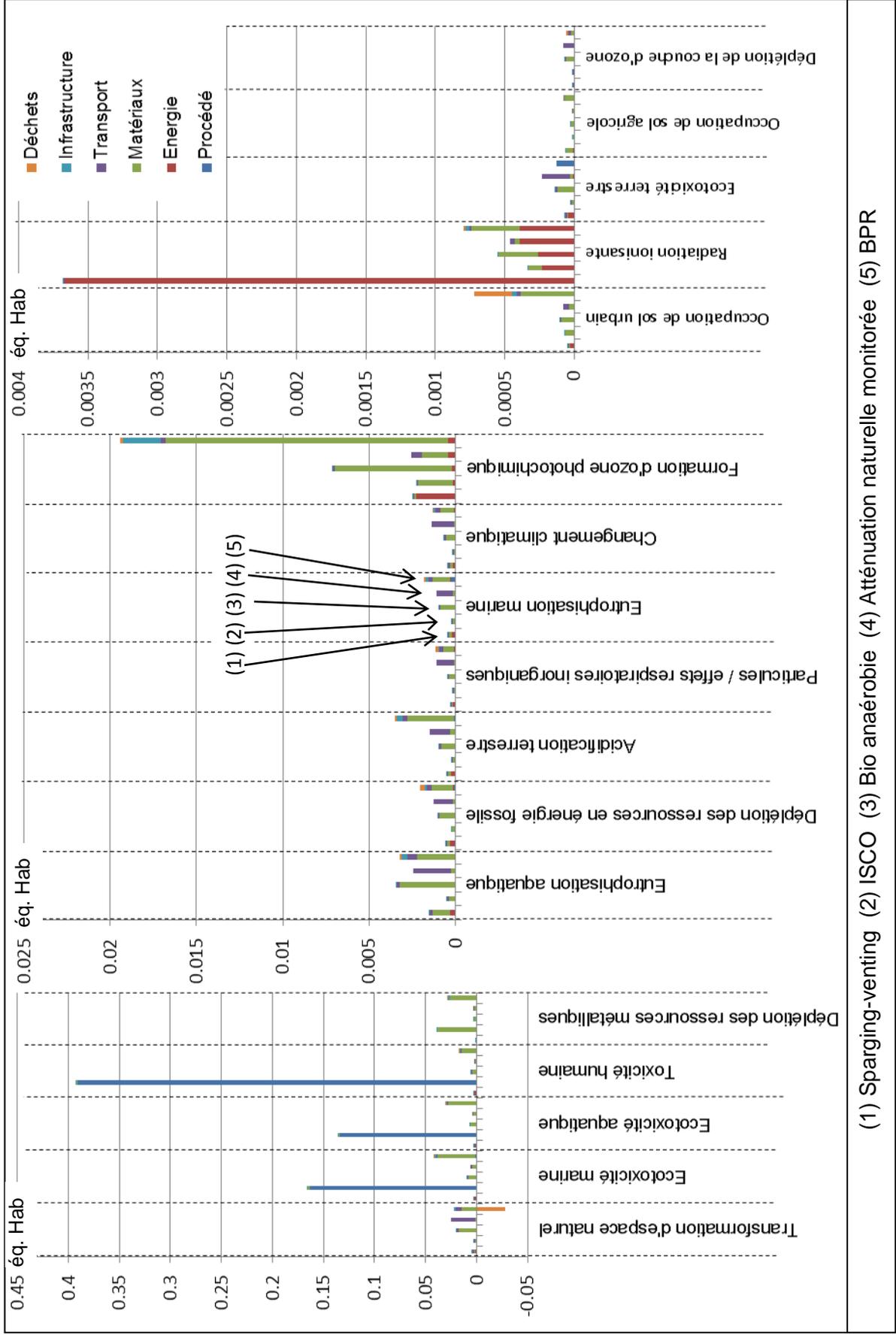


Figure 28 : Comparaison des procédés de traitement pour la récupération du plongeant et de la phase dissoute - pollution de la nappe par des COHV. Impacts potentiels à mi-parcours exprimés en unité caractéristique (cf. tableau 43), calculs réalisés avec la méthode ReCiPe Hierarchist et Usetox.



(1) Sparging-venting (2) ISCO (3) Bio anaérobie (4) Atténuation naturelle (5) BPR

Figure 29 : Comparaison des procédés de traitement pour la récupération du plongeant et de la phase dissoute - pollution de la nappe par des COHV. Impacts potentiels à mi-parcours **normalisés**, calculs réalisés avec la méthode ReCiPe, Hierarchist.

3.4.6. Mise en perspective des impacts pour les différents cas d'étude

Le présent chapitre a pour but de mettre en perspective les impacts précédemment calculés par rapport à d'autres impacts plus facilement perceptibles.

Les tableaux suivants comparent les impacts **totaux** des procédés de dépollution (exprimés en équivalent habitant européen cf. 3.5) aux impacts de la fabrication d'une camionnette de chantier. Selon les cas d'études et les catégories d'impacts le ratio entre l'impact de la fabrication d'une camionnette et la mise en œuvre des techniques varie entre 1 et plus de 50. Cela permet d'apprécier l'ordre de grandeur et le poids relatif de la dépollution des différents sites. La prépondérance de certaines catégories d'impacts résulte des caractéristiques des technologies mises en œuvre qui diffèrent de celles inhérentes à la fabrication d'une camionnette.

a) Site 1

Tableau 45 : Impacts totaux normalisés, exprimés en équivalent habitant européen, pour les différents procédés de récupération de surnageant (FOD) avec valorisation du FOD caractérisés avec la méthode ReCiPe Hierarchist.

Echelle	Catégorie d'impact	Pompage- écrémage	Tranché drainante	Triple phase	Impact de la fabrication d'une camionnette
Globale	Changement climatique	2,00	4,70	0,87	0,502
	Déplétion de la couche d'ozone	-0,0174	0,2427	-0,1056	0,0165
	Déplétion des ressources en énergie fossile	0,43	10,12	-3,50	1,17
	Déplétion des ressources métalliques	4,93	7,83	2,83	8,54
Régionale	Acidification terrestre	2,10	5,21	0,18	0,927
	Eutrophisation aquatique	16,19	20,36	6,42	17,93
	Eutrophisation marine	1,50	3,83	0,69	0,298
	Formation d'ozone photochimique	2,29	4,55	1,14	0,458
Locale	Toxicité humaine	23,26	16,27	10,93	19,85
	Ecotoxicité aquatique	27,01	19,28	14,72	16,47
	Ecotoxicité terrestre	0,36	0,84	0,00	0,125
	Ecotoxicité marine	33,00	28,58	18,42	23,41
	Particules / effets respiratoires inorganiques	2,80	5,74	0,92	1,09
	Occupation de sol urbain	0,47	3,17	0,58	0,151
	Occupation de sol agricole	2,31	0,08	1,40	0,0326
	Transformation d'espace naturel	-23,63	152,54	-68,70	6,37
Radiation ionisante	20,34	5,37	3,18	0,305	

b) Site 2

Tableau 46 : Impacts totaux potentiels à mi-parcours normalisés, pour les différents procédés de confinement d'un sol pollué aux métaux/métalloïdes, comparaison avec les impacts d'une camionnette, calculs réalisés avec les méthodes ReCiPe Hierarchist Europe et USEtox

Echelle	Catégorie d'impact	Métaux : recouvrement par du béton	Métaux : recouvrement par de l'enrobé	Métaux : recouvrement par de la terre végétale	Métaux : encapsulation	Impact de la fabrication d'une camionnette
Globale	Changement climatique	294	29,3	10,4	28,4	0,502
	Déplétion de la couche d'ozone	8,29	5,79	1,18	1,39	0,0165
	Déplétion des ressources en énergie fossile	539	191	36,4	103	1,17
Régionale	Déplétion des ressources métalliques	5 143	21,5	7,73	22,0	8,54
	Acidification terrestre	306	60,3	16,9	40,4	0,93
	Eutrophisation aquatique	3 315	92,6	24,7	64,9	17,9
	Eutrophisation marine	177	42,7	15,8	31,7	0,298
	Formation d'ozone photochimique	217	52,8	18,5	39,9	0,458
	Toxicité humaine	2 975	87,3	21,6	53,3	19,85
Locale	Ecotoxicité aquatique	5 516	114	27,9	72,7	16,47
	Ecotoxicité terrestre	40,27	9,26	2,02	4,28	0,12
	Ecotoxicité marine	7 426	151	38,9	98,7	23,4
	Particules / effets respiratoires inorganiques	584	55,1	17,6	40,3	1,09
	Occupation de sol urbain	124	53,7	21,1	20,1	0,151
	Occupation de sol agricole	14,1	1,23	0,492	0,263	0,0326
Transformation d'espace naturel	-1 197	-2 677	-1 898	644	6,37	
Radiation ionisante	81,4	6,45	1,62	6,70	0,305	

c) Site 3

Tableau 47 : Impacts totaux normalisés, exprimés en équivalent habitant européen, pour les différents procédés de traitement d'un sol pollué par du FOD, caractérisés avec la méthode ReCiPe Hierarchist.

Echelle	Catégorie d'impact	Bioterre	Compostage	Landfarming	Impact de la fabrication d'une camionnette
Globale	Changement climatique	4,58	9,62	11,13	0,502
	Déplétion de la couche d'ozone	0,238	0,384	0,384	0,0165
	Déplétion des ressources en énergie fossile	12,48	24,03	31,52	1,17
	Déplétion des ressources métalliques	5,67	19,72	24,49	8,54
Régionale	Acidification terrestre	7,84	17,04	18,53	0,93
	Eutrophisation aquatique	167,35	192,34	199,35	17,93
	Eutrophisation marine	2,47	6,62	7,35	0,298
	Formation d'ozone photochimique	3,49	8,39	9,78	0,458
Locale	Toxicité humaine	23,46	39,82	42,21	19,85
	Ecotoxicité aquatique	23,69	45,15	52,86	16,47
	Ecotoxicité terrestre	1,06	1,36	1,40	0,12
	Ecotoxicité marine	42,67	70,07	75,76	23,41
	Particules / effets respiratoires inorganiques	6,32	13,98	15,93	1,09
	Occupation de sol urbain	1,55	5,35	5,46	0,151
	Occupation de sol agricole	0,451	0,365	0,389	0,0326
	Transformation d'espace naturel	120,00	311,43	307,83	6,37
Radiation ionisante	1,22	3,14	3,15	0,305	

d) Site 4

Tableau 48 : Totals des impacts à mi-parcours **normalisés**, exprimés en équivalent habitant européen, pour les différents procédés de traitement des COHV, caractérisés avec la méthode ReCiPe Hierarchist.

Echelle	Catégorie d'impact	Sparging-venting	ISCO	Bio anaérobie	BPR	Atténuation naturelle monitorée (AR 500 km)	Atténuation naturelle monitorée (AR 50 km)	Impact de la fabrication d'une camionnette
Globale	Changement climatique	4,13	1,744	9,075	17,3	10,6	2,44	0,502
	Déplétion de la couche d'ozone	0,101	0,072	0,614	0,549	0,729	0,105	0,0165
	Déplétion des ressources en énergie fossile	14,5	4,68	33,3	33,0	23,70	4,74	1,17
	Déplétion des ressources métalliques	2,91	376	26,7	4,86	24,4	23,9	8,54
Régionale	Acidification terrestre	5,36	2,17	9,71	18,6	12,16	2,70	0,93
	Eutrophisation aquatique	24,3	21,8	69,1	189	24,6	19,3	17,9
	Eutrophisation marine	2,56	1,15	4,27	11,1	10,5	1,81	0,298
	Formation d'ozone photochimique	3,97	1,38	6,34	13,8	13,4	2,24	0,458
Locale	Toxicité humaine	25,5	3 822	31,9	162	25,6	18,6	19,85
	Ecotoxicité aquatique	18,9	1 318	35,0	294	35,4	28,4	16,47
	Ecotoxicité terrestre	0,63	0,26	1,32	3,70	2,22	0,46	0,12
	Ecotoxicité marine	27,7	1 615	84,0	407	56,1	39,5	23,4
	Particules / effets respiratoires inorganiques	4,86	1,88	9,07	34,5	14,5	4,02	1,09
	Occupation de sol urbain	0,413	0,647	0,949	6,99	0,771	0,408	0,151
	Occupation de sol agricole	0,588	0,0726	0,250	43,3	0,0964	0,0842	0,0326
	Transformation d'espace naturel	37,3	23,1	193	-56,7	245	37,6	6,37
Radiation ionisante	35,8	3,23	5,33	7,77	4,50	4,21	0,305	

3.5. ESTIMATION D'IMPACT A MI-PAROURS DE MATERIELS/ENGINS DE DEPOLLUTION

L'évaluation environnementale des impacts secondaires pour les différents sites montre une sensibilité importante des résultats de l'évaluation à un certain nombre d'opérations unitaires. Les figures suivantes (30, 31 et 32) présentent les impacts de quelques « procédés » ayant un impact fort sur les résultats d'évaluation environnementale des techniques de traitement de sols. En première approche, les impacts relatifs au fonctionnement d'une pompe, d'une pelleteuse et au transport (via des camions) ont été pris en considération :

- La figure 30 présente les impacts de différentes tailles de pompes en fonction de leur débit nominal. Les impacts ne sont pas proportionnels au débit des pompes. Les pompes dont le débit est compris entre 20 et 33 m³/h ont des impacts équivalents. La contribution aux impacts est majoritairement due à la consommation énergétique associée au fonctionnement de la pompe.
- La figure 31 présente les impacts d'une heure de fonctionnement d'une pelleteuse. Les contributions aux impacts se répartissent de manière comparable entre l'infrastructure (production de la pelleteuse) et son utilisation (consommation énergétique et rejets associé). Des différences sont toutefois observées en fonction des catégories d'impacts. Pour les impacts changement climatique et déplétion des ressources fossiles, la contribution de l'usage de la pelleteuse est plus importante.
- Enfin la figure 32 présente les impacts du transport par camion de 25 t matériaux sur une distance de 100 km parcourus. La contribution de l'utilisation du camion est importante pour les catégories d'impacts en lien direct avec la consommation d'énergie fossile : *changement climatique, déplétion des ressources en énergie fossile, formation d'ozone photochimique, acidification terrestre, et particules / effets respiratoires inorganiques*. Le camion en tant qu'infrastructure contribue principalement aux catégories d'impacts en lien direct avec la production d'acier, c'est-à-dire principalement les catégories d'impacts *toxicité humaine et écotoxicité*.

- Impact d'une pompe en fonction de son débit nominal

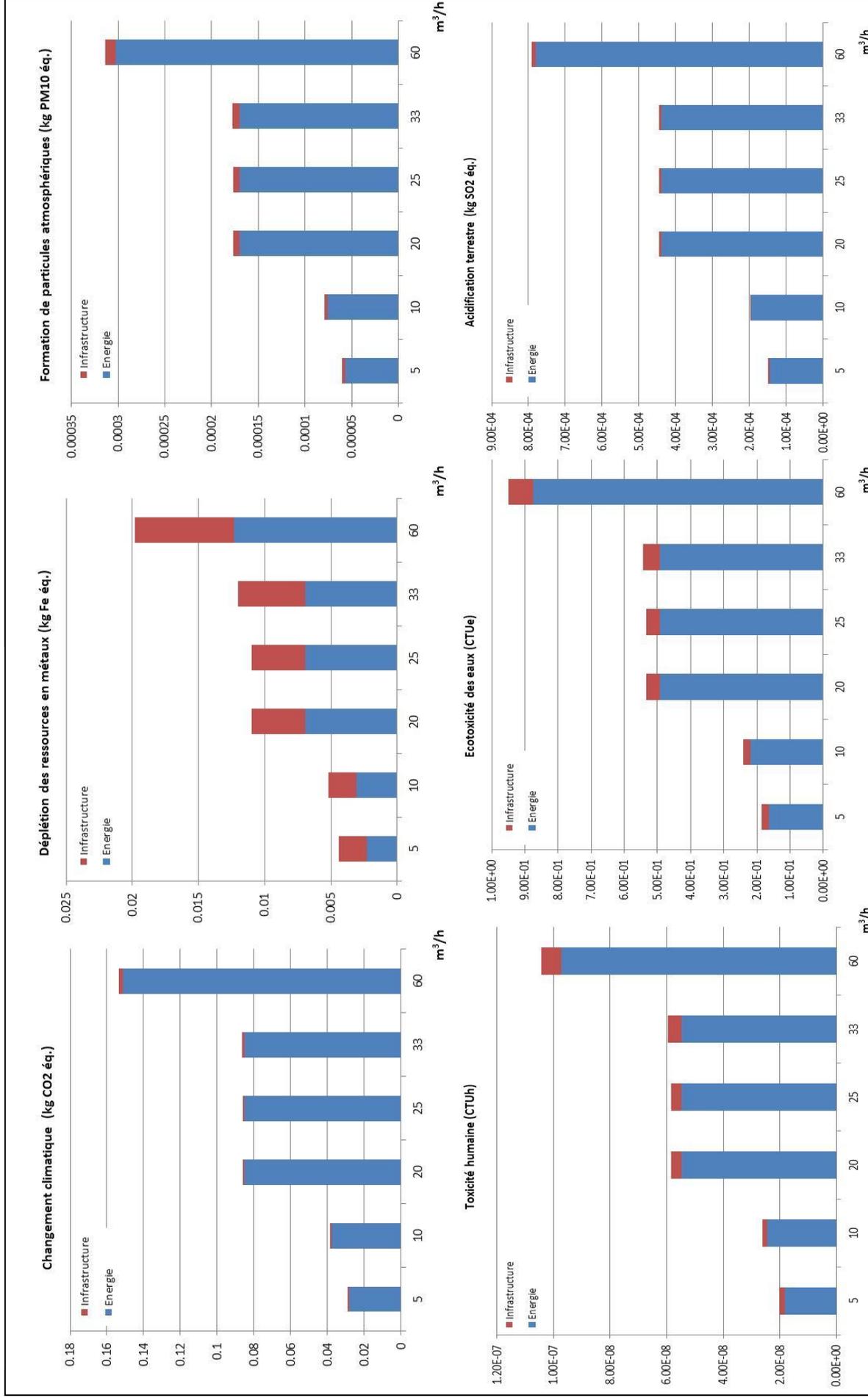


Figure 30 : Evolution des impacts totaux en fonction du débit nominal des pompes, pour différentes catégories d'impacts

• Impact d'une pelleuse pour 1h de fonctionnement

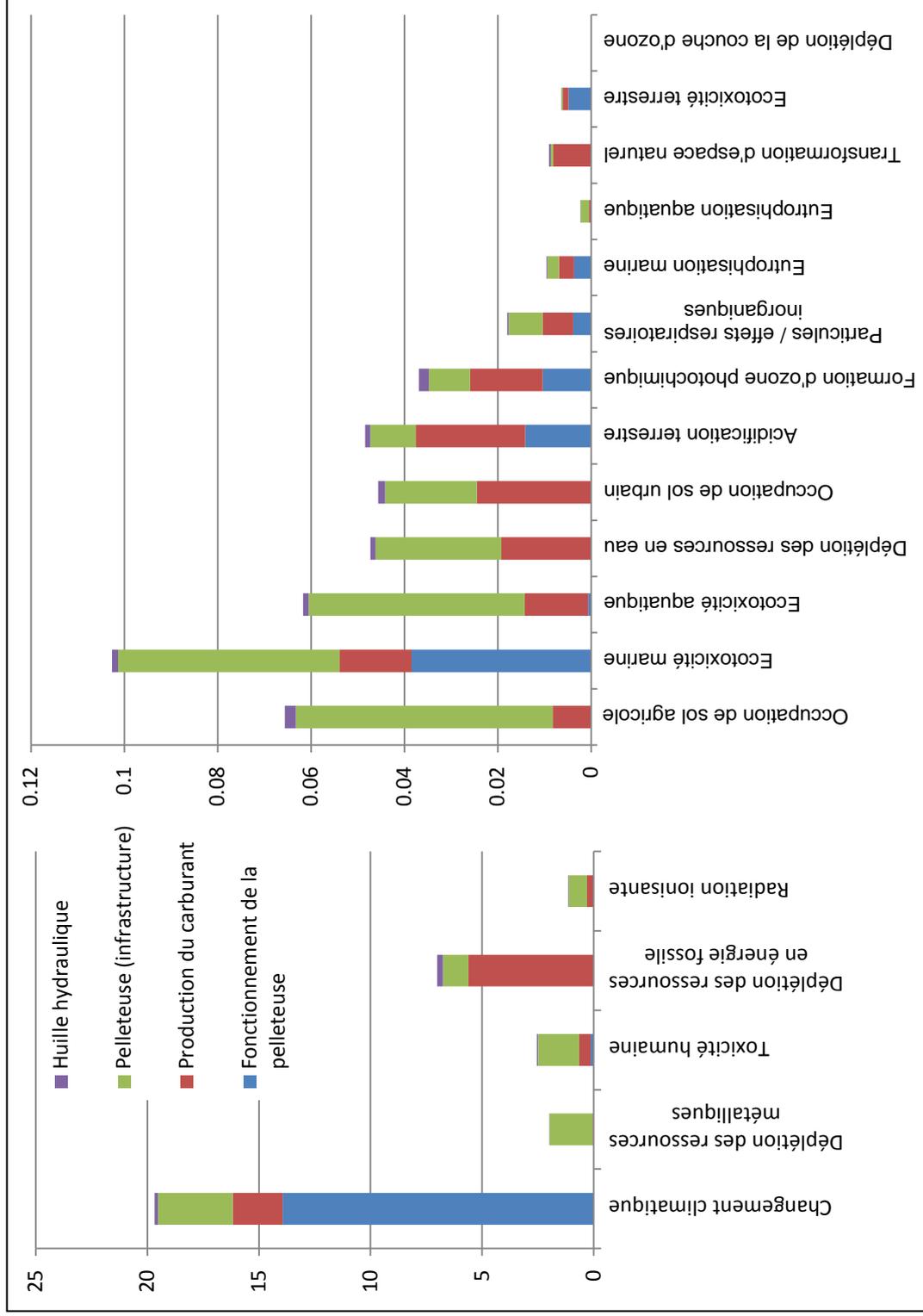


Figure 31 : Impacts totaux pour 1 heure de fonctionnement d'une pelleuse.

• Impact du transport par camion (25 t, 100 km parcourus)

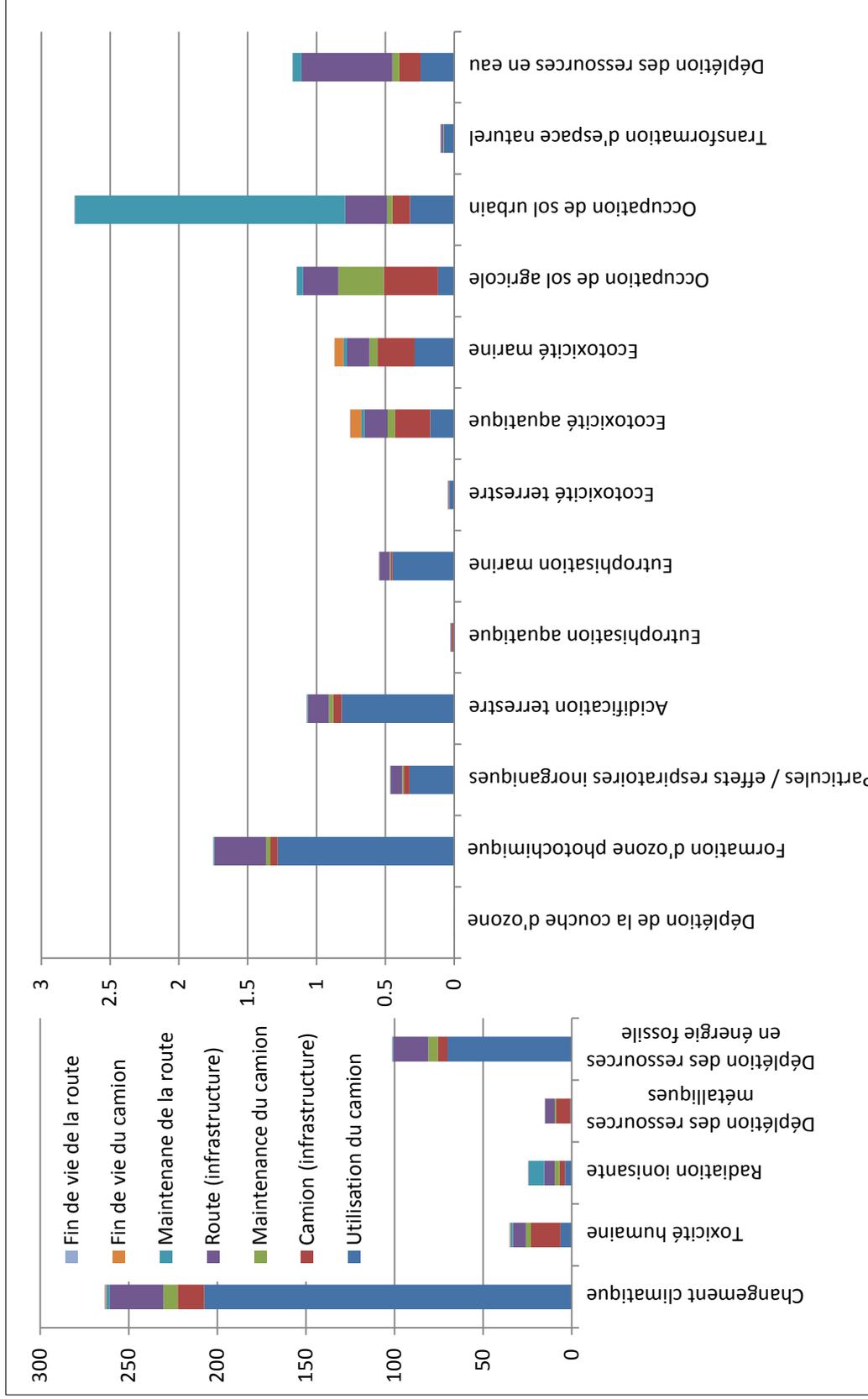


Figure 32 : Impacts totaux du transport de 25 t de matériaux sur une distance de 100 km soit 2 500 t.km.

4. Conclusion

L'évaluation environnementale des impacts secondaires résultant de la mise en œuvre des technologies de traitement de sol permet d'établir une hiérarchie entre les techniques appliquées aux différents cas d'études. Cependant cette hiérarchie est très dépendante du contexte de l'évaluation et des caractéristiques des cas d'études. La comparaison des techniques est réalisée après une 1^{ère} sélection technique en fonction du contexte. Dans un contexte de multipollution, la comparaison se fera sur la base d'une unité fonctionnelle à laquelle plusieurs flux de référence pourront être associés (un pour des hydrocarbures et un pour des COHV par exemple). Les impacts secondaires associées à chacune des techniques pour rendre le service relatif à chacun des flux de référence pourront ainsi être additionnés.

La comparaison des performances environnementales des procédés doit cependant être contrebalancée par :

- l'efficacité des différents procédés de traitement (relevant de l'évaluation des impacts primaires),
- l'impact 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.

L'évaluation environnementale des technologies de traitement de sols met également en lumière différents aspects qui ont une influence prépondérante sur les résultats de l'évaluation. Les paramètres marquants sont les suivants :

- La durée du traitement qui conditionne les consommations d'énergie électrique, le transport nécessaire à la surveillance et la maintenance du site.
- Les quantités de matériaux consommés pour mettre en œuvre la technique de traitement. Elles 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.
- Les consommations de réactifs *in situ* sont également à prendre en compte, car par leur nature, elles peuvent avoir un impact important sur certaines catégories d'impact (toxique, écotoxique, eutrophisation...)
- Les hypothèses sur les distances parcourues et la fréquence des visites pour la maintenance et la surveillance d'un site, ces dernières pouvant fortement pénaliser une technique comme par exemple l'atténuation naturelle monitorée pour le traitement d'une pollution aux COHV (Site 4).

Par ailleurs, cette étude n'a pas permis de mettre en évidence l'influence de l'échelle des cas d'études, il serait nécessaire d'évaluer d'autres cas d'étude à différentes échelles. La contribution des différents postes (matériaux, transport, énergie, infrastructure, déchets et procédé) aux impacts peut évoluer en fonction de la taille des cas d'études. Il est probable que cela entraîne une modification de la hiérarchie des

techniques en fonction de la taille du site. In fine, il serait intéressant de poursuivre l'étude afin :

- d'évaluer d'autres techniques notamment les techniques de traitements thermiques,
- d'étudier les influences d'échelle des sites,
- de mettre au point des Abaques pour certaines catégories d'unités de traitement.

5. Bibliographie

Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), Principes de la récupération des liquides immiscibles dans le sol, Université du Québec, http://www.inrs-ete.quebec.ca/publications/doc/Chap10_2003.pdf

Ademe (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) et Ernst & Young (2009) Taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filières de traitement des sols et des eaux souterraines pollués en France (Les) : Synthèse des données 2006, Janvier 2009, 85p.

American Petroleum Institute (2003) Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL) Parameters Database, Version 2.0, Users Guide For Data Retrieval and *Models for Design of Free-Product Recovery Systems for Petroleum Hydrocarbon Liquids*, Regulatory Analysis & Scientific Affairs Department, Excerpted From Publication Number 4731, December 2003, 23 p.

Battelle (2002) Air sparging design paradigm, Naval Facilities Engineering Service Center, August 2002, 150 p.

Battelle et NFESC (1996) Biopile design and construction manual, Technical Memorandum, TM-2189-ENV, Naval Facilities Engineering Service Center, June 1996, 124 p.

Carey G.R. et Mc Bean E.A. (2010) - A mass balance Approach for estimating DNAPL Source remediation timeframe, Proceedings of the 2010 RPIC Federal Contaminated Sites National Workshop, mai 2010, Montréal, Québec, Canada.

Colombano S., Saada A., Guerin V., Bataillard P., Bellenfant G., Beranger S., Hube D., Blanc C., Zornig C. et Girardeau I. (2010) Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-bénéfices, Rapport final, Rapport public Brgm/RP-58609-FR, 397 p.

Gossett, J. M., and S. H. Zinder. 1996. "Microbiological Aspects Relevant to Natural Attenuation of Chlorinated Ethenes," in Proceedings of the Symposium on Natural Attenuation of Chlorinated Organics in Ground Water. EPA/540/R-96/509.

Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M.A.J., De Schryver, A., Struijs, J., Van Zelm, R. (2009): ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation factors, first edition. <http://www.lcia-recipe.net/>

Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), Principes de la récupération des liquides immiscibles dans le sol, Université du Québec, http://www.inrs-ete.quebec.ca/publications/doc/Chap10_2003.pdf

ITRC (The Interstate Technology & Regulatory Council) (2005) Overview of In Situ Bioremediation of Chlorinated Ethene DNAPL Source Zones, Bioremediation of DNAPLs Team, October 2005, 89 p.

Rosenbaum R., Bachmann T., Gold L. et al. (2008) – USEtox the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13, p. 532-546.

Sinke A. et Hecho I. (1999) Monitored Natural Attenuation: Review of existing guidelines and protocols. TNO-Nicole report TNO-MEP R99/313.

SOeS (2007) : La valorisation des déchets. <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/article/286/1154/valorisation-dechets.html>

US Air Force (2010), Sustainable Remediation Tool, User Guide, May 2010, 147 p.

EEA (2007). Technical report No 17: CLC2006 technical guidelines (Corine Land Cover 2006) http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2007_17

Bibliographie : risques sanitaires (annexe 1)

Ademe, Irsn (2003) Ciblex. Banque de données de paramètres descriptifs de la population française au voisinage d'un site pollué. CD-Rom coédité ADEME / IRSN, référence 4773.

American Society for Testing and Materials-ASTM (2004) Standard guide for Risk Based Corrective Action, version E2081_00, reapproved 2004.

Bonnard R., Hulot C. et Leveque S (2001) Méthode de calcul des valeurs de constat d'impact dans les sols, Rapport INERIS, Novembre 2001.

Calabrese (2003) Dans : Comments of the General Electric Company on the U.S. Environmental Protection Agency's Human Health Risk Assessment for the Housatonic River Side – Rest of river. AMEC Earth and Environmental, Inc. and BBL Sciences, July 28, 2003. Attachment E: Selection of Soil Ingestion Rate.

Dor F., Denys S., Daniau C., Bellenfant G., Zeghnoun K., Dabin C., Nedellec V., Mosqueron L., Floch-Barneaud A., Mathieu A. (2009) Exposition des enfants par ingestion de sol et de poussières contaminés : quels choix pour les évaluations de risque ? Deuxième rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués du 20 et 21 octobre 2009, Paris.

Ineris (2008) Améliorer les méthodes d'estimation prospective de l'exposition aux polluants des populations autour d'une Installation Classée pour la Protection de l'Environnement, Rapport final n° DRC-08-57041-14967A du 01/12/2008.

Ineris (2003, mise à jour 03 janvier 2006) Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs) Évaluation de la relation dose-réponse pour des effets cancérigènes :

Approche substance par substance (facteurs d'équivalence toxique - FET) et approche par mélanges Évaluation de la relation dose-réponse pour des effets non cancérogènes : Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR).

InVS, Afsset (2007) Estimation de l'impact sanitaire d'une pollution environnementale et évaluation quantitative des risques sanitaires.

RBCA (2007) Atlantic RBCA (Risk-Based Corrective Action) Version 2.0 for Petroleum Impacted Sites in Atlantic Canada: User Guidance, Updated March 2007.

TPHCWG (1998) Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series volume 2: Composition of petroleum mixtures. T.L. Potter and K.E. Simmons, may 1998.

TPHCWG (1997) Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series volume 3: Selection of representative TPH fractions based on fate and transport considerations. J.B. Gustafson, J.G. Tell and D. Oren, July 1997.

US EPA (2004) User's guide for evaluating subsurface vapour intrusion into buildings, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C. February 22, 2004.

US EPA (1997) Exposure factors handbook. EPA/600/P-95/002F. Washington DC : US Environmental Protection Agency, August 1997.

US-EPA (1996) Soil Screening Guidance: User's Guide, Second Edition, EPA/540/R-96/018, Office of Emergency and Remedial Response, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC 20460, July 1996.

Bibliographie : impacts ACV (annexe 2)

Ezzati, M., Lopez, A.D., Rodgers, A., Murray, C.J.L. (2004) - Comparative Quantification of Health Risks. Global and regional Burden of Diseases Attributable to Selected Major Risk Factors. World Health Organisation. 2248p.

Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland, (2007) - Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Clim

Goedkoop, M. and Spriensma, R. (2000). The Eco-indicator 99: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment Methodology. Ministry of VROM, The Hague, The Netherlands. (updated version: www.pre.nl/ecoindicator99)

Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M.A.J., De Schryver, A., Struijs, J., Van Zelm, R. (2009): ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation factors, first edition. <http://www.lcia-recipe.net/>

Guinée, J.B. (Ed.), Gorrée, M., Heijungs, R., Huppés, G., Kleijn, R., de Koning, A., Van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A, De Bruijn, J.A., Van Duin R., Huijbregts, M.A.J. (2002). Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards. Series: Eco-efficiency in industry and science. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (Hardbound, ISBN 1-4020-0228-9; Paperback, ISBN 1-4020-0557-1).

Hauschild, M. and Potting, J. (2005). Spatial differentiation in life cycle impact assessment – the EDIP2003 methodology. Environmental News no. 80. The Danish Ministry of the Environment, Environmental Protection Agency, Copenhagen.

Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., Van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A. (2001) - Climate Change 2001: The Scientific Basis is the most comprehensive and up-to-date scientific assessment of past, present and future climate change

Humbert S., Margni M., Jolliet O. (2005) IMPACT 2002+: User Guide Draft for version 2.1 Industrial Ecology & Life Cycle Systems Group, GECOS, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), CH-1015 Lausanne, Switzerland. 40 p

McMichael, A.J., Campbell-Lendrum, D.H., Corvalan, C.F., Ebi, K.L., Githeko, A., Scheraga, J.D., Woodward, A., (2003) . Climate change and human health. Risk and responses. World Health Organization, Geneva. 322 p.

Meinshausen, M. (2005) - Emission & Concentration Implications of long-term Climate Targets, Dissertation 15946 for the Swiss federal Institute of Technology, Zurich. http://www.up.ethz.ch/publications/dissertations/MalteMeinshausen_2005_dissertation.pdf

Payet J. (2004) Assessing toxic impacts on aquatic ecosystems in life cycle assessment (LCA). Thèse EPFL, no 3112 (2004). Dir.: Olivier Jolliet. <http://library.epfl.ch/theses/?nr=3112 DOI : 10.5075/epfl-thesis-3112>

Stranddorf, H., Hoffmann, L. and Schmidt, A. (2005). - Impact categories, normalisation and weighting in LCA. Environmental News no. 78 from the Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen.

Thomas, C.D.; Cameron, A.; Green, R.E.; Bakkenes, M.; Beaumont, L.J.; Collingham, Y.C.; Erasmus, B.F.N.; Ferreira de Siqueira, M.; Grainger, A. (2004) - Extinction risk from climate change. Nature; vol. 427, afl. 6970, pag. 145-147.

WMO (2003), World meteorological organization 2003. - Scientific Assessment of ozone depletion : Global ozone research and monitoring project - Report No 47.

Annexe 1

Propriété intellectuelle des bases de données ECOINVENT

1. Propriété intellectuelle des bases de données ECOINVENT

Les règles de propriété intellectuelle des bases de données Ecoinvent interdisent toute reproduction et diffusion même partielle de données d'inventaires. Par conséquent, il n'est pas possible de publier dans ce rapport, les inventaires d'analyse du cycle de vie (ICV), réalisés pour les différents procédés de traitement de sol évalués dans cette étude.

TERMS OF USE

The ecoinvent terms of use state that “the use of the ecoinvent data by preparing extracts, or for further use for commercial purposes is prohibited. The licensee shall not reproduce, disseminate or publicly display the ecoinvent data as a whole or any substantial part thereof, as determined by their nature and quantity. Reproduction, dissemination or public display with regard to nature and quantity of insignificant portions of the ecoinvent data is prohibited, to the extent this would unreasonably affect the legitimate interests of the Licensor.” It means that ecoinvent LCI raw data and results and LCIA results (either directly downloaded from the ecoinvent database or calculated with ecoinvent LCI results and the factors downloaded from the ecoinvent database) shall not be reproduced in other LCA case studies. Contribution analyses may include graphical representation of the share of ecoinvent processes on the total LCA results (e.g., the contribution of energy supply to the total burdens of manufacturing a mobile phone). Hereby the possibilities to recalculate the exact LCI and LCIA results of an ecoinvent dataset shall be prevented as much as possible. For the full terms of use, please see the ecoinvent website or CD. If you have any questions, please contact the ecoinvent helpdesk. Note that apart from the ecoinvent term of use, the normal SimaPro license conditions apply.

Annexe 2

Présentation des calculs de risques sanitaires établissant des concentrations maximales admissibles pour les différents sites étudiés

2. Objectif de l'Evaluation des risques sanitaires

L'évaluation des impacts secondaires résultant de la mise en œuvre des techniques de traitement des sols se fait sur la base d'une unité fonctionnelle. Cette unité fonctionnelle, base de comparaison des différentes techniques, a été définie en fonction des objectifs à atteindre pour les différents cas d'étude. Compte tenu du cadre méthodologique actuel de gestion des sites et sols pollués, l'acceptabilité des risques sanitaires après dépollution est un prérequis indispensable et commun à l'ensemble des techniques de dépollution susceptibles d'être envisagées dans le cadre d'un bilan coût avantage et mises en œuvre dans le cadre d'un plan de gestion. De ce fait, le flux de référence associé à l'unité fonctionnelle correspond à la masse minimale de polluant à extraire du (des) milieu(x) pollué(s) pour ramener les risques sanitaires à des niveaux inférieurs aux seuils de référence en vigueur en France (1 pour les effets à seuil et 10-5 pour les effets sans seuil), seuils en dessous desquels on estime que le site sera compatible avec son usage futur.

Afin de définir, pour chaque configuration envisagée dans la tâche 2 et pour chaque technique de dépollution, la masse minimale de polluant à extraire du (des) milieu(x) pollué(s) pour ramener les risques sanitaires à des niveaux « acceptables », il convient au préalable de calculer pour chaque milieu concerné des Concentrations Maximales Admissibles (CMA), c'est-à-dire des concentrations en deçà desquelles les niveaux de risques sanitaires sont inférieurs aux seuils de référence et le site est considéré compatible avec son usage. Sur la base de ces CMA, il sera possible de calculer le flux de référence propre à chaque configuration et chaque technique, de manière spécifique au site, par le produit du volume (ou masse) de milieu pollué et de la différence entre la concentration (teneur) initiale dans le milieu et la CMA (ou la teneur maximale admissible). L'objet de la présente annexe est le calcul des concentrations maximales admissibles (CMA).

Ce flux de référence est plus pertinent que l'unité de masse de polluant extraite, laquelle ne permet pas systématiquement une comparaison objective des techniques entre elles. En effet, à titre d'exemple, dans le cas du « site 4 : pollution des sols profonds et des eaux souterraines par des COHV », l'extraction d'une unité de masse de polluant par une technique traitant uniquement la ZS n'a pas la même influence sur les concentrations dans les gaz du sol, milieu du sous-sol qui déterminera les niveaux de risques sanitaires par inhalation de substances volatiles, que l'extraction d'une unité de masse de polluant par une technique traitant à la fois la ZS et la ZNS.

N.B. : Le « site 2 : pollution des sols superficiels par des métaux » n'est pas concerné par ces calculs dans la mesure où les techniques envisagées visent à couper les expositions. Or, en l'absence d'exposition, il ne peut y avoir de risques sanitaires. Ainsi, aucune CMA n'a été calculée pour ce site. Par ailleurs, si un vide sanitaire permet de couper toutes voies d'exposition (y compris via les eaux souterraines), il ne sera pas nécessaire de calculer des CMA. Par contre, l'unité fonctionnelle devra être choisie en conséquence.

3. Hypothèses de l'Evaluation des risques sanitaires

3.1. SCHEMAS CONCEPTUELS D'EXPOSITION PRIS EN COMPTE

5.1.1. SITE 1 : nappe polluée par du FOD

Milieu source	Hydrocarbures de type FOD présents dans la nappe.
Vecteurs de transfert	Adduction d'eau potable. Aucun traitement des hydrocarbures n'est envisagé au niveau de l'AEP.
Milieu d'exposition	Eau du robinet.
Voie d'exposition	Ingestion d'eau contaminée. Les autres voies d'exposition envisageables sont supposées minoritaires devant l'ingestion directe.
Cibles	Riverains alimentés par le captage AEP situé à 200 m en aval du site.

5.1.2. SITE 3 : sols pollués par du FOD

Milieu source	Hydrocarbures de type FOD présents dans le sol entre 0 et 1 m de profondeur, sous des espaces extérieurs (absence de potagers) d'une maison de particuliers.
Vecteurs de transfert	Volatilisation des substances présentes dans les sols et transport via les gaz du sol vers l'air ambiant. Envol de poussières depuis les sols superficiels.
Milieu d'exposition	Sols superficiels. Air ambiant (lequel est considéré s'imposer à l'air intérieur).
Voie d'exposition	Contact direct (ingestion de sol, inhalation de poussières). Inhalation de substances volatiles issues des sols en extérieur.
Cibles	Résidents du site.

5.1.3. SITE 4 : sols et eaux souterraines pollués par des COHV

Milieu source	PCE et TCE présents dans le sol (ZNS) et la nappe (ZS).
Vecteurs de transfert	Volatilisation des substances présentes dans les sols et dans la nappe et transport via les gaz du sol vers l'air ambiant et intérieur.
Milieu d'exposition	Air ambiant et air intérieur.
Voie d'exposition	Inhalation de substances volatiles présentes dans l'air ambiant et intérieur. (issues du sol et de la nappe)
Cibles	Employés du site.

3.2. CONCENTRATIONS/TENEURS DANS LES MILIEUX SOURCES

3.2.1. SITES 1 et 3 : Coupe pétrolière théorique retenue pour le FOD

Les sites 1 et 3 sont concernés par la présence de FOD, respectivement dans les eaux souterraines et dans les sols. Dans le cadre de l'analyse de ces deux sites, il est supposé que la composition du produit présent est cohérente avec la coupe théorique ci-dessous (cf. Tableau 49).

Paramètres	Répartition de chaque composé / famille de composés dans le mélange retenu de FOD	
	% massique	Source
Hydrocarbures Aromatiques Volatiles		
benzène	< 1,25E-01	Fuel oil #2 Données BP 1996 (TPHCWG vol 3, 1997)
toluène	6,20E-02	N°2 Fuel Oil Moyenne (TPHCWG vol 2, 1998)
éthylbenzène	3,40E-02	
xylènes	2,30E-01	
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques		
acénaphène	1,80E-02	N°2 Fuel Oil Moyenne (TPHCWG vol 2, 1998)
acénaphylène	6,00E-03	
anthracène	2,80E-03	
benzo(a)anthracène	4,50E-05	
benzo(a)pyrène	2,10E-05	
benzo(b)fluoranthène	< 2,40E-03	Fuel oil #2 Données BP 1996 (TPHCWG vol 3, 1997)
benzo(g,h,i)pérylène	5,70E-06	N°2 Fuel Oil Moyenne (TPHCWG vol 2, 1998)
benzo(k)fluoranthène	< 6,00E-05	Fuel oil #2 Données BP 1996 (TPHCWG vol 3, 1997)
chrysène	1,40E-04	N°2 Fuel Oil Moyenne (TPHCWG vol 2, 1998)
dibenzo(a,h)anthracène	4,00E-06	Fuel oil #2 Données BP 1996 (TPHCWG vol 3, 1997)
fluoranthène	1,40E-03	N°2 Fuel Oil Moyenne (TPHCWG vol 2, 1998)
fluorène	1,90E-02	
Indéno(1,2,3-c,d)pyrène	< 1,20E-03	Fuel oil #2 Données BP 1996 (TPHCWG vol 3, 1997)
naphtalène	2,20E-01	N°2 Fuel Oil Moyenne (TPHCWG vol 2, 1998)
phénanthrène	7,90E-02	
pyrène	2,90E-03	
Hydrocarbures totaux		
Hydrocarbures aliphatiques 5-6	0,00E+00	Diesel (#2 Fuel oil)

Paramètres	Répartition de chaque composé / famille de composés dans le mélange retenu de FOD	
	% massique	Source
Hydrocarbures aliphatiques 6-8	0,00E+00	(RBCA, 2007)
Hydrocarbures aliphatiques 8-10	4,96E+00	
Hydrocarbures aliphatiques 10-12	1,88E+01	
Hydrocarbures aliphatiques 12-16	2,58E+01	
hydrocarbures aliphatiques 16-21	1,69E+01	
hydrocarbures aliphatiques 21-35	2,98E+00	
Hydrocarbures aromatiques 8-10	9,92E-01	
Hydrocarbures aromatiques 10-12	5,95E+00	
Hydrocarbures aromatiques 12-16	1,19E+01	
Hydrocarbures aromatiques 16-21	8,93E+00	
Hydrocarbures aromatiques 21-35	1,98E+00	

Tableau 49 : Coupe pétrolière théorique retenue pour le FOD

3.2.2. SITE 1 : Concentrations dans les eaux souterraines

Les concentrations initiales, avant mise en œuvre de la dépollution sur site, ne sont pas connues.

Seules des concentrations maximales admissibles (CMA) sont calculées.

Le mélange de composés hydrocarbonés présent dans la nappe après traitement est supposé avoir une composition du type FOD et présenter une répartition cohérente avec la coupe théorique retenue (cf. Tableau 49). Il s'agit d'une hypothèse purement théorique et peu réaliste, qui suppose d'une part des propriétés de transfert, et d'autre part des abattements par les techniques de dépollution mises en œuvre, identiques pour tous les composés (BTEX, TPH, HAP).

3.2.3. SITE 3 : Teneurs dans les sols superficiels et profonds

De la même manière que dans le cas du site 1, des teneurs maximales admissibles sont calculées dans les sols, en considérant que la répartition des composés hydrocarbonés avant, pendant et après dépollution est cohérente avec la coupe théorique de FOD présentée dans le Tableau 49. La même limite pèse sur le réalisme de cette hypothèse.

3.2.4. SITE 4 : concentrations dans les gaz du sol

Les concentrations initiales dans les gaz du sol sont les suivantes (cf. Tableau 50).

Tableau 50 : Concentrations initiales dans les gaz du sol sur le site 4

N°CAS	Paramètres	Concentrations initiales, avant mise en œuvre des techniques de dépollution
		mg/m ³
Composés Organo-Halogénés Volatils		
127184	Tétrachloroéthylène (PCE)	2,6E+01
79016	Trichloroéthylène (TCE)	6,1E+01

Tableau 51 : Concentrations initiales dans les gaz du sol sur le site 4

Il est supposé que la proportion relative de chaque composé dans les gaz du sol n'est pas modifiée par les différents traitements mis en œuvre. Les concentrations maximales admissibles (CMA) dans les gaz du sol ont été établies sur la base de cette hypothèse.

3.3. MODELISATION DES TRANSFERTS DE SUBSTANCES VERS LES MILIEUX D'EXPOSITION

3.3.1. SITES 3 et 4 : Modélisation des transferts de vapeurs vers l'air ambiant

A partir des concentrations mesurées sur site, les transferts des polluants des sols vers l'air extérieur ont été modélisés suivant la méthodologie définie dans la méthode ASTM « Standard guide for Risk Based Corrective Action » version E2081_00 (reapproved 2004). Des facteurs de transfert sol-air extérieur, ou NAF (Natural Attenuation Factor), sont calculés. Ils sont dépendants des caractéristiques du site et des propriétés physico-chimiques des substances étudiées. Pour chaque substance, la concentration dans le sol est divisée par le NAF approprié pour obtenir une concentration dans l'air extérieur.

- **SITE 3 : modélisation des transferts de substances volatiles depuis les sols superficiels vers l'air ambiant**

Pour le site 3, l'équation de modélisation utilisée est l'équation CM1 de la méthode ATSM (2004) : volatilisation des substances présentes dans les sols de surface vers l'air extérieur.

Le Tableau 52 et le Tableau 54 présentent les valeurs retenues pour les différents paramètres propres à la configuration du site, à la nature des terrains, aux cibles et aux différentes substances présentes dans les sols.

Paramètre	Valeur	Source/ Justification
Paramètres spécifiques au site		
Epaisseur de la source	100 cm	Choix arbitraire
Hauteur de mélange	2 m	Valeur par défaut de la norme ASTM E 2081-00, 2004
Vitesse du vent dans la zone de mélange	2,25 m/s	Valeur par défaut de la norme ASTM E 2081-00, 2004
Paramètres spécifiques au sol		
Porosité totale	0,3	Spécifique au site (donnée d'entrée)
Teneur en eau dans la zone non saturée	0,06	Spécifique au site (donnée d'entrée)
Densité volumique du sol	1,86 g-sol/cm ³ -sol	=2,65*(1 - Porosité totale)
Fraction de carbone organique	0,002 g-C/g-sol	Valeur par défaut (US-EPA, 2004)
Longueur de la source parallèle au vent	45 m	Valeur par défaut de la norme ASTM E 2081-00, 2004
Paramètres spécifiques aux cibles		
Temps moyen de relargage des vapeurs	30 ans 6 ans	Egal à la durée d'exposition des cibles (résidants adultes et enfants)

Tableau 52 : Paramètres de modélisation des transferts de vapeur vers l'air ambiant (SITE 3)

- **SITE 4 : modélisation des transferts de substances volatiles depuis les gaz du sol vers l'air ambiant**

L'équation de modélisation utilisée est l'équation CM3 de la méthode ATSM (2004) : volatilisation des substances présentes dans les sols profonds vers l'air extérieur. Cette équation a été modifiée de manière à prendre en compte uniquement l'atténuation liée aux transferts depuis les gaz du sol vers l'air extérieur.

Le Tableau 53 et le Tableau 54 présentent les valeurs retenues pour les différents paramètres propres à la configuration du site, à la nature des terrains, aux cibles et aux différentes substances présentes dans les sols.

Paramètre	Valeur	Source/ Justification
Paramètres spécifiques au site		
Profondeur de la source	200 cm	Donnée d'entrée
Hauteur de mélange	2 m	Valeur par défaut de la norme ASTM E 2081-00, 2004
Vitesse du vent dans la zone de mélange	2,25 m/s	Valeur par défaut de la norme ASTM E 2081-00, 2004
Paramètres spécifiques au sol		
Porosité totale	0,375	Spécifique au site. Les données d'entrée indiquent que les sols sont sableux. Les valeurs retenues sont les valeurs caractéristiques des sables fournies par l'US-EPA, 2004.
Teneur en eau dans la zone non saturée	0,054	
Longueur de la source parallèle au vent	45 m	Valeur par défaut de la norme ASTM E 2081-00, 2004
Paramètres spécifiques aux cibles		
Temps moyen de relargage des vapeurs	40 ans	Egal à la durée d'exposition des cibles (employés)

Tableau 53 : Paramètres de modélisation des transferts de vapeur vers l'air ambiant (SITE 4)

N° CAS	Nom de la substance	Coefficient de diffusion dans l'air	Coefficient de diffusion dans l'eau	Constante de Henry H	Coefficient de partage octanol-carbone K _{oc}
		D _{air} (cm ² /s)	D _{eau} (cm ² /s)	(-)	(-)
Paramètres spécifiques aux substances					
71432	Benzène	8,80E-02	9,80E-06	2,25E-01	6,00E+01
108883	Toluène	8,70E-02	8,60E-06	2,72E-01	1,00E+02
100414	éthylbenzène	7,50E-02	7,80E-06	3,31E-01	2,42E+02
108383	m-Xylène	6,95E-02	7,80E-06	3,06E-01	1,57E+02
95476	o-Xylène	8,40E-02	1,00E-05	2,11E-01	2,34E+02
106423	p-Xylène	7,20E-02	8,44E-06	3,06E-01	3,17E+02
HCTa1	Hydrocarbures aliphatiques 5-6	1,00E-01	1,00E-05	3,30E+01	7,94E+02
HCTa2	Hydrocarbures aliphatiques 6-8	1,00E-01	1,00E-05	5,00E+01	3,98E+03
HCTa3	Hydrocarbures aliphatiques 8-10	1,00E-01	1,00E-05	8,00E+01	3,16E+04
HCTa4	Hydrocarbures aliphatiques 10-12	1,00E-01	1,00E-05	1,20E+02	2,51E+05
HCTa5	Hydrocarbures aliphatiques 12-16	1,00E-01	1,00E-05	5,20E+02	5,01E+06
HCTar3	Hydrocarbures aromatiques 8-10	1,00E-01	1,00E-05	4,80E-01	1,58E+03
HCTar4	Hydrocarbures aromatiques 10-12	1,00E-01	1,00E-05	1,40E-01	2,51E+03
HCTar5	Hydrocarbures aromatiques 12-16	1,00E-01	1,00E-05	5,30E-02	5,01E+03
83329	Acénaphène	4,21E-02	7,69E-06	5,94E-03	4,58E+03
208968	Acénaphylène	4,38E-02	7,53E-06	5,11E-03	6,12E+03
120127	Anthracène	4,28E-02	6,72E-06	2,04E-03	2,57E+04
56553	Benzo(a)anthracène	5,10E-02	9,00E-06	1,37E-04	3,98E+05
50328	Benzo(a)pyrène	4,50E-02	6,90E-06	1,62E-05	1,02E+06
205992	Benzo(b)fluoranthène	3,33E-02	5,13E-06	4,55E-03	1,23E+06
191242	benzo(g,h,i)pérylène	4,90E-02	5,56E-06	5,65E-06	2,68E+06
207089	Benzo(k)fluoranthène	3,33E-02	5,13E-06	2,79E-05	7,90E+05
218019	Chrysène	2,48E-02	6,21E-06	3,84E-03	3,98E+05
53703	Dibenzo(a,h)anthracène	3,10E-02	4,80E-06	1,94E-06	1,40E+06
206440	Fluoranthène	3,90E-02	5,80E-06	6,06E-04	7,20E+04
86737	Fluorène	4,56E-02	6,79E-06	3,72E-03	7,71E+03
193395	Indéno(1,2,3-c,d)pyrène	3,10E-02	5,10E-06	1,17E-05	6,30E+06
91203	Naphtalène	5,40E-02	7,20E-06	1,97E-02	1,25E+03
85018	Phénanthrène	5,40E-02	5,70E-06	1,61E-03	2,08E+04
129000	Pyrène	2,72E-02	7,24E-06	4,44E-07	6,80E+04
127184	Trichloroéthylène	7,90E-02	9,10E-06	4,22E-01	-
79016	Tétrachloroéthylène	7,20E-02	8,20E-06	7,45E-01	-

Tableau 54 : Paramètres physicochimiques retenus pour modéliser les transferts de vapeur vers l'air ambiant (SITES 3 et 4)

3.3.2. SITE 4 : Modélisation des transferts de vapeurs vers l'air intérieur

A partir des concentrations mesurées sur site dans les gaz du sol, la modélisation des transferts des substances vers l'air intérieur a été réalisée au moyen du modèle Johnson et Ettinger (US-EPA, 2004).

Dans ce cadre, le point d'exposition correspond à l'air intérieur d'un bâtiment. Le transport des substances, par diffusion et par convection, depuis les gaz du sol vers l'air intérieur du bâtiment, est considéré. Le transfert par diffusion est décrit par la loi de Fick. Le transfert par convection est lié à la différence de pression qui existe entre le sol et l'intérieur du bâtiment, entraînant un mouvement d'air depuis le sol vers le bâtiment.

L'ensemble des paramètres d'entrée du modèle, relatifs au milieu souterrain, à la construction et aux différentes substances présentes dans les sols, sont présentés dans les tableaux suivants.

PARAMETRES	VALEURS	COMMENTAIRES
Caractéristiques du milieu souterrain		
Profondeur d'échantillonnage des gaz du sol	200 cm	Données d'entrée (profondeur de la source)
Température moyenne du sol	10°C	Valeur par défaut
Type de sol	Sand	Spécifique au site. Les données d'entrée indiquent que les sols sont sableux.
Densité du sol	1,66 g/cm ³	Calculée = 2,65 * (1 - porosité)
Porosité totale du sol	0,375	Les valeurs retenues sont les valeurs caractéristiques des sables fournies par l'US-EPA, 2004.
Teneur en eau du sol	0,054	
Caractéristiques du bâtiment		
Longueur du bâtiment	30 m	Spécifique au bâtiment à usage industriel pris en compte au droit du site.
Largeur du bâtiment	10 m	
Hauteur du bâtiment	5 m	
Profondeur du bas de la dalle	10 cm	= épaisseur de la dalle (valeur typique ou moyenne pour un bâtiment de plain-pied – US-EPA, 2004)
Hauteur des fissures	10 cm	Valeur typique ou moyenne pour la largeur des fissures entre les murs et la dalle du sol et entre les différentes dalles unitaires
Largeur des fissures	0,1 cm	
ΔP (sol-intérieur)	40 g/cm.s ² (ou 4 Pa)	Valeur par défaut (US-EPA, 2004)
Taux de renouvellement d'air	0,8 volume/h	Valeur par défaut caractéristique d'un bâtiment à usage industriel (ASTM, 2004)
Taux de fissuration	Valeur calculée supposant que la dalle de fondation est constituée d'une juxtaposition de dalles de 10m x 10 m (=3,3.10 ⁻⁴)	

Tableau 55 : Paramètres de modélisation des transferts de vapeur vers l'air intérieur (SITE 4)

N° CAS	Substance	Diffusivité dans l'air	Diffusivité dans l'eau	Solubilité dans l'eau	Constante de Henry H à 25°C	Point d'ébullition	Température critique	Enthalpie de vaporisation au point d'ébullition	Masse molaire
		(cm ² /s)	(cm ² /s)	(mg/L)	(atm·m ³ /mol)	(°K)	(°K)	(cal/mol)	(g/mol)
127184	Tétrachloroéthylène (PCE)	7,20E-02	8,20E-06	1,50E+02	1,82E-02	394,15	620,20	8 288	165,83
79016	Trichloroéthylène (TCE)	7,90E-02	9,10E-06	1,07E+03	1,03E-02	359,85	544,20	7 505	131,39

Tableau 56 : Paramètres physicochimiques retenus pour modéliser les transferts de vapeur vers l'air intérieur (SITE 4)

3.3.3. SITE 3 : Emission de poussières

Les concentrations en ETM particulaires dans l'air ont été estimées au moyen d'un facteur d'émission particulaire (PEF) (cf. Tableau 57).

Paramètre	Valeur	Source/ Justification
Facteur d'émission de particules (PEF)	Riverains adultes et enfants : 1,32 10 ⁺⁹ m ³ /kg	

Tableau 57 : Facteur d'émission particulaire

La teneur d'une substance dans le sol, divisée par le PEF, permet d'estimer la concentration de la substance issue du sol dans l'air à l'état particulaire.

3.4. EVALUATION DES EXPOSITIONS

3.4.1. SITES 1, 3 et 4 : Budget espace-temps et caractéristiques physiologiques des cibles

Les paramètres généraux caractérisant l'exposition des différentes cibles ou récepteurs sont renseignés dans le tableau suivant.

Paramètres	Valeurs retenues	Source/Justifications
SITE 1 (riverains et résidants)		
Durée d'exposition	Adultes : 70 ans Enfants : 6 ans	Vie entière Bonnard et al. (2001)
Fréquence d'exposition	365 jours/an	Bonnard et al (2001)
Temps d'exposition	Adultes : Temps passé dans le jardin (3h) et dans la maison (20h) : 23 h / jour Enfants : Temps passé dans le jardin (3h) et dans la maison (19h) : 22 h / jour	ADEME, IRSN (2003)
Poids corporel	Adultes : 62,5 kg	ADEME, IRSN (2003)
	Enfants : 13 kg	INERIS (2008)
SITE 3 et SITE 4 (employés)		
Durée d'exposition	40 ans	Bonnard et al. (2001)
Fréquence d'exposition	220 jours/an	Bonnard et al (2001)
Temps d'exposition	SITE 3 : 8 h / j SITE 4 : 8 h/j à l'intérieur et 1 h/j à l'extérieur	Avis d'expert
Poids corporel	62,5 kg	ADEME, IRSN (2003)

Tableau 58 : Budget espace-temps des cibles

Les budgets espace-temps des riverains et résidants ont été établis sur la base des données nationales extraites de CIBLEX (ADEME et IRSN, 2003) selon une approche conservatoire :

- Hypothèse que la qualité de l'air extérieur s'impose dans l'air intérieur de la maison voisine.
- Sélection des données relatives aux classes d'âge et aux catégories socio-professionnelles, qui maximisent les durées d'exposition ;
- Estimation du temps passé dans le jardin par le temps dédié aux activités suivantes renseigné dans CIBLEX et Roy et al. (1993) :
 - o Pour les adultes : promenade dans le jardin et jardinage ;
 - o Pour les enfants : jeux, temps libre au niveau de l'habitation ;
- Estimation du temps passé dans l'habitation par le temps dédié aux activités suivantes renseigné dans CIBLEX : loisirs, tâches ménagères, repas, salle de bain, sommeil.

3.4.2. SITE 1 : Consommation d'eau

Les quantités d'eau consommées quotidiennement par les cibles (riverains du site 1) sont présentées dans le Tableau 59.

Cibles	Consommation journalière d'eau (L/j)	Source
Riverains adultes	1,5	Avis d'expert InVS, Afsset (2007)
Riverains enfants	0,55	INERIS (2008) : = $\frac{1}{2} * (4,7^e - 2 * 10,3 + 3,9^e - 2 * 15,6)$

Tableau 59 : Quantités journalières d'eau consommée par les cibles

3.4.3. SITE 3 : Ingestion de terre

Les quantités de sol ingérées par les résidents du site 3 sont présentées dans le Tableau 60.

Paramètre	Valeur retenues	Source/Justifications
Quantité de terre ingérée quotidiennement	résidents adultes : 50 mg/j	US-EPA (1997) ; Calabrese (2003) 75 ^{ème} percentile
	résidents enfants : 91 mg/j	Dor et al. (2009) 95 ^{ème} percentile

Tableau 60 : Quantités de terre ingérée par les cibles

Compte tenu des modalités de détermination de ces valeurs, il s'agit de valeurs moyennées sur une journée ne nécessitant pas l'application d'un ratio de fréquence journalière d'exposition.

3.5. EVALUATION DE LA TOXICITE

Les principes de sélection des VTR suivants ont été retenus :

- (1) Recensement des VTR disponibles parmi les valeurs produites par les organismes suivants : US-EPA, OMS, ATSDR, RIVM, Sante Canada, OEHHA ;
- (2) Analyse succincte de la pertinence des valeurs disponibles et exclusion des valeurs reconnues de manière évidente comme étant de qualité médiocre ;
- (3) Sélection des VTR les plus protectrices parmi l'ensemble des valeurs pertinentes disponibles.

Le Tableau 61 présente de manière synthétique les VTR retenues dans la présente étude. La revue toxicologique a été effectuée en mars 2011.

N°CAS	Substance	Voie d'exposition : inhalation						Voie d'exposition : ingestion					
		Effets à seuil (mg/m3)	Référence	Justification	Effets sans seuil (mg/m3)-1	Référence	Justification	Effets à seuil (mg/kg/j)	Référence	Justification	Effets sans seuil (mg/kg/j)-1	Référence	Justification
Hydrocarbures Aromatiques Volatils													
71432	benzène	9,70E-03	ATSDR, 2007	Valeur la plus protectrice.	2,90E-02	OEHHA, 2002	Valeur la plus protectrice.	5,00E-04	ATSDR, 2007	Valeur la plus protectrice.	1,00E-01	OEHHA, 2002	Valeur la plus protectrice.
108883	toluène	2,60E-01	OMS, 2000	Valeur la plus protectrice.	-	-	non concerné	8,00E-02	US-EPA, 2005	Valeur la plus protectrice, après élimination de la VTR de l'ATSDR (durée non chronique).	-	-	non concerné
100414	éthylbenzène	7,70E-01	RIVM, 2001	Valeur la plus protectrice.	2,50E-03	OEHHA, 2007	Seule valeur disponible.	9,70E-02	OMS, 2004	Valeur la plus protectrice, après élimination de la VTR de l'OEHHA (issue d'une dérivation voie à voie).	1,10E-02	OEHHA, 2007	Seule valeur disponible.
1330207	xylènes	1,00E-01	US-EPA, 2003	Valeur la plus protectrice.	-	-	non concerné	1,79E-01	OMS, 2003	Valeur la plus protectrice, après élimination de la VTR du RIVM (qui ne s'appuie pas sur des données épidémiologiques).	-	-	non concerné
Hydrocarbures totaux													
HCTa1	Hydrocarbures aliphatiques 5-6	1,84E+01	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	-	-	non concerné	5,00E+00	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	-	-	non concerné
HCTa2	Hydrocarbures aliphatiques 6-8	1,84E+01	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	-	-	non concerné	5,00E+00	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	-	-	non concerné
HCTa3	Hydrocarbures aliphatiques 8-10	1,00E+00	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	-	-	non concerné	1,00E-01	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	-	-	non concerné
HCTa4	Hydrocarbures aliphatiques 10-12	1,00E+00	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	-	-	non concerné	1,00E-01	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	-	-	non concerné
HCTa5	Hydrocarbures aliphatiques 12-16	1,00E+00	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	-	-	non concerné	1,00E-01	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	-	-	non concerné
HCTa6	hydrocarbures aliphatiques 16-21							2,00E+00	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.			
HCTa7	hydrocarbures aliphatiques 21-35							2,00E+00	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.			
HCTar1	Hydrocarbures aromatiques 5-7			Cf. Benzène			Cf. Benzène			Cf. Benzène			Cf. Benzène
HCTar2	Hydrocarbures aromatiques 7-8			Cf. Toluène			Cf. Toluène			Cf. Toluène			Cf. Toluène
HCTar3	Hydrocarbures aromatiques 8-10	2,00E-01	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	-	-	non concerné	4,00E-02	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	-	-	non concerné
HCTar4	Hydrocarbures aromatiques 10-12	2,00E-01	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	-	-	non concerné	4,00E-02	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	-	-	non concerné

N°CAS	Substance	Voie d'exposition : inhalation						Voie d'exposition : ingestion					
		Effets à seuil (mg/m3)	Référence	Justification	Effets sans seuil (mg/m3)-1	Référence	Justification	Effets à seuil (mg/kg/j)	Référence	Justification	Effets sans seuil (mg/kg/j)-1	Référence	Justification
HCTar5	Hydrocarbures aromatiques 12-16	2,00E-01	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	-	-	non concerné	4,00E-02	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	-	-	non concerné
HCTar6	Hydrocarbures aromatiques 16-21							3,00E-02	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.			
HCTar7	Hydrocarbures aromatiques 21-35							3,00E-02	TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.			
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques													
83329	acénaphène	6,51E-02	Dérivation de la VTR orale de l'US-EPA (1994)	Effets sanitaires communs entre les voies orale et inhalation : sang, appareil cardiovasculaire, système immunitaire...	1,10E-03	FET * OEHHA, 2002	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)	6,00E-02	US-EPA, 1994	Seule valeur disponible.	2,00E-04	FET * RIVM, 2001	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)
208968	acénaphylène	-	-	non concerné	1,10E-03	FET * OEHHA, 2002	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)	-	-	non concerné	2,00E-04	FET * RIVM, 2001	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)
120127	anthracène	1,05E+00	Dérivation de la VTR orale de l'US-EPA (1993)	Effets sanitaires communs entre les voies orale et inhalation : sang, appareil cardiovasculaire, système immunitaire...	1,10E-02	FET * OEHHA, 2002	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)	3,00E-01	US-EPA, 1993	Seule valeur disponible, après élimination de la VTR non spécifique du RIVM (reprise du TPHCWG, 1999) et de la VTR de l'ATSDR non chronique.	2,00E-03	FET * RIVM, 2001	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)
56553	benzo(a)anthracène	-	-	non concerné	1,10E-01	FET * OEHHA, 2002	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)	-	-	non concerné	2,00E-02	FET * RIVM, 2001	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)
50328	benzo(a)pyrène	-	-	non concerné	1,10E+00	OEHHA, 2002	Seule valeur disponible.	-	-	non concerné	2,00E-01	RIVM, 2001	Seule valeur disponible.
205992	benzo(b)fluoranthène	-	-	non concerné	1,10E-01	FET * OEHHA, 2002	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)	-	-	non concerné	2,00E-02	FET * RIVM, 2001	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)
191242	benzo(g,h,i)pérylène	-	-	non concerné	1,10E-02	FET * OEHHA, 2002	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)	3,00E-02	RIVM, 2001 / TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	2,00E-03	FET * RIVM, 2001	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)
207089	benzo(k)fluoranthène	-	-	non concerné	1,10E-01	FET * OEHHA, 2002	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)	-	-	non concerné	2,00E-02	FET * RIVM, 2001	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)
218019	chrysène	-	-	non concerné	1,10E-02	FET * OEHHA, 2002	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)	-	-	non concerné	2,00E-03	FET * RIVM, 2001	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)
53703	dibenzo(a,h)anthracène	-	-	non concerné	1,10E+00	FET * OEHHA, 2002	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)	-	-	non concerné	2,00E-01	FET * RIVM, 2001	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)

N°CAS	Substance	Voie d'exposition : inhalation						Voie d'exposition : ingestion					
		Effets à seuil (mg/m3)	Référence	Justification	Effets sans seuil (mg/m3)-1	Référence	Justification	Effets à seuil (mg/kg/j)	Référence	Justification	Effets sans seuil (mg/kg/j)-1	Référence	Justification
206440	fluoranthène	4,34E-02	Dérivation de la VTR orale de l'US-EPA (1993)	Effets sanitaires communs entre les voies orale et inhalation : sang, appareil cardiovasculaire, système immunitaire...	1,10E-03	FET * OEHHA, 2002	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)	4,00E-02	US-EPA, 1993	Seule valeur disponible, après élimination de la VTR non spécifique du RIVM (reprise du TPHCWG, 1999) et de la VTR de l'ATSDR non chronique.	2,00E-04	FET * RIVM, 2001	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)
86737	fluorène	7,00E-02	Dérivation de la VTR orale de l'US-EPA (1990)	Effets sanitaires communs entre les voies orale et inhalation : sang, appareil cardiovasculaire, système immunitaire...	1,10E-03	FET * OEHHA, 2002	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)	4,00E-02	US-EPA, 1990	Seule valeur disponible, après élimination de la VTR non spécifique du RIVM (reprise du TPHCWG, 1999) et de la VTR de l'ATSDR non chronique.	2,00E-04	FET * RIVM, 2001	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)
193395	Indéno(1,2,3-c,d)pyrène	-	-	non concerné	1,10E-01	FET * OEHHA, 2002	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)	-	-	non concerné	2,00E-02	FET * RIVM, 2001	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)
91203	naphtalène	3,00E-03	US-EPA, 1998	Seule valeur disponible.	3,40E-02	OEHHA, 2004	Seule valeur disponible.	2,00E-02	US-EPA, 1998	Valeur la plus protectrice.	2,00E-04	FET * RIVM, 2001	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)
85018	phénanthrène	-	-	non concerné	1,10E-03	FET * OEHHA, 2002	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)	4,00E-02	RIVM, 2001 / TPHCWG, 1999	Seule valeur disponible.	2,00E-04	FET * RIVM, 2001	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)
129000	pyrène	3,26E-02	Dérivation de la VTR orale de l'US-EPA (1993)	Effets sanitaires communs entre les voies orale et inhalation : sang, appareil cardiovasculaire, système immunitaire...	1,10E-03	FET * OEHHA, 2002	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)	3,00E-02	US-EPA, 1993	Seule valeur disponible.	2,00E-04	FET * RIVM, 2001	Selon rapport INERIS, 2003 (maj 2006)
Composés Organo-Halogénés Volatils													
127184	tétrachloroéthylène	2,50E-01	OMS, 2000 ; RIVM, 2001	Valeur la plus protectrice.	5,90E-03	OEHHA, 2005	Seule valeur disponible.	Non concerné par le scénario d'exposition retenu					
79016	trichloroéthylène	2,00E-01	RIVM, 2001	Valeur la plus protectrice.	2,00E-03	OEHHA, 2003	Valeur la plus protectrice.						

Tableau 61 : Coupe pétrolière théorique retenue pour le FOD

Abréviations :

RIVM : Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (Institut néerlandais de la santé publique et de l'environnement) ; US EPA (IRIS) : United-States environmental protection agency (agence américaine de protection de l'environnement) - integrated risk information system ; OEHHA : Office of Environmental Health Hazard Assessment (bureau de l'état de Californie pour l'évaluation des risques sanitaires liés à l'environnement) ; ATSDR : Agency for toxic substances and disease registry (Agence pour le registre des substances toxiques et maladies aux Etats-Unis) ; TPHCWG : Total petroleum hydrocarbon criteria working group ; OMS : Organisation Mondiale de la Santé ; FET : Facteur d'Equivalence Toxique

3.6. ADDITIVITE DES RISQUES

Les risques sont d'abord calculés substance par substance. L'exposition à un mélange de plusieurs substances peut induire l'additivité, la synergie (amplification des effets) ou l'antagonisme (annulation des effets). En l'absence de connaissances sur les phénomènes de synergie et d'antagonisme entre les substances, l'additivité des risques liés à l'exposition à plusieurs substances a été retenue :

- **Pour les effets à seuil**, l'additivité des quotients de danger entre voies d'exposition et substances est retenue comme hypothèse de départ, quel que soit les effets sanitaires associés à chacune des substances considérées.

Une approche plus fine aurait consisté à ne sommer que les risques associés à des substances ou des voies d'exposition pour lesquelles des effets critiques communs existent. Une telle approche n'a pas été mise en œuvre car :

- o Sur le SITE 4 : les deux substances prises en compte, le tétrachloroéthylène et le trichloroéthylène, ont des effets sanitaires communs par inhalation, notamment sur le système nerveux, le foie et le rein ;
 - o Sur les SITE 1 et 3 : les traceurs de risque sont les TPH (voire le naphthalène), donc des mélanges complexes de substances pour lesquels on ne peut exclure l'existence d'organes cibles communs.
- **Pour les effets sans seuil** (cancérigènes génotoxiques), le cumul des excès de risques individuels correspond à l'hypothèse d'une indépendance des effets cancérogènes des différentes substances.

4. Résultats de l'Evaluation des risques sanitaires

4.1. SITE 1 : CALCUL DES CONCENTRATIONS MAXIMALES ADMISSIBLES (CMA)

Des concentrations maximales admissibles (CMA) dans les eaux souterraines à 200 m en aval du site 1 ont été déterminées par un calcul de risque à rebours, considérant que :

- (1) il existe un usage d'alimentation en eau potable au niveau de ce point, sans traitement de potabilisation vis-à-vis des composés présents dans les eaux souterraines,
- (2) les niveaux des risques globaux doivent être inférieurs aux seuils de référence de 10^{-5} et 1, pour les effets sans seuil et à seuil respectivement, et
- (3) la répartition des composés et familles de composés dans la nappe suit la coupe pétrolière théorique du FOD retenue en section 3.2.1.

Ces CMA sont présentées dans le tableau suivant (colonne 2).

Cependant, le respect des valeurs réglementaires est un prérequis indispensable. Il s'avère que l'atteinte du critère de potabilité sur le benzène (limites de qualité = $1\mu\text{g/L}$ - CSP R1321-2) est plus contraignante que l'assurance de niveaux de risques acceptables par le calcul de risque à rebours. Ainsi, un second jeu de CMA a été établi sur la base de la valeur limite en benzène (colonne 3), toujours en supposant que la répartition des composés et familles de composés dans la nappe suit la coupe pétrolière théorique du FOD retenue en section 3.2.1

Composés ou familles de composés	CMA dans la nappe au droit de l'usage AEP. Déterminées sur la base du calcul de risques à rebours.	CMA dans la nappe au droit de l'usage AEP. Déterminées par la valeur limite de potabilité sur le benzène.
	mg/L	mg/L
Hydrocarbures C10-C40	1,3E+00	7,5E-01
Somme des 16 HAP (US-EPA)	4,9E-03	2,8E-03
Benzène	1,7E-03	1,0E-03
Toluène	8,6E-04	5,0E-04
Ethylbenzène	4,7E-04	2,7E-04
Xylènes	3,2E-03	1,8E-03

Tableau 62 : Concentrations maximales admissibles (CMA) dans les eaux souterraines à 500 m en aval hydraulique du site 1 pour un usage d'alimentation en eau potable

Les risques résiduels associés à ces CMA sont présentés dans le Tableau 63.

SITE 1 - SITUATION FINALE (CMA)		Niveaux de risques résiduels associés aux CMA			
		CMA déterminées sur la base du calcul de risques à rebours.		CMA déterminées par la valeur limite de potabilité sur le benzène.	
		Effets sans seuil	Effets à seuil	Effets sans seuil	Effets à seuil
		Excès de Risque Individuel	Quotient de Danger	Excès de Risque Individuel	Quotient de Danger
Riverains adultes	Ingestion d'eau	4,4E-06	5,4E-01	2,5E-06	3,1E-01
	Total	4,4E-06	5,4E-01	2,5E-06	3,1E-01
Riverains enfants	Ingestion d'eau	6,6E-07	9,5E-01	3,8E-07	5,4E-01
	Total	6,6E-07	9,5E-01	3,8E-07	5,4E-01
Riverains enfants grandissants *	Ingestion d'eau	4,6E-06	9,5E-01	2,7E-06	5,4E-01
	Total	4,6E-06	9,5E-01	2,7E-06	5,4E-01

* : 6 ans enfants et 24 ans adultes

Tableau 63 : Niveaux de risques résiduels pour les riverains du site 1

Les substances qui contribuent majoritairement aux risques sont le benzène pour les effets sans seuil et les TPH pour les effets à seuil.

4.2. SITE 3 : CALCUL DES CONCENTRATIONS MAXIMALES ADMISSIBLES (CMA)

Des concentrations maximales admissibles (CMA) sont déterminées au moyen d'un calcul de risques sanitaires de la même manière que pour le site 1 (cf. Tableau 64), en considérant que

- (1) les niveaux des risques globaux doivent être inférieurs aux seuils de référence de 10^{-5} et 1, pour les effets sans seuil et à seuil respectivement, et
- (2) la répartition des composés et familles de composés dans les sols suit la coupe pétrolière théorique du FOD retenue en section 3.2.1.

Composés ou familles de composés	Teneur maximale admissible (mg/kg)
Hydrocarbures C10-C40	4000
Somme des 16 HAP (US-EPA)	15
Benzène	5
Toluène	3
Ethylbenzène	1
Xylènes	10

Tableau 64 : Concentrations maximales admissibles (CMA) dans les sols du site 3 pour un usage résidentiel

Les risques résiduels associés à ces CMA sont présentés dans le Tableau 65.

SITE 3 - SITUATION FINALE (CMA)		Niveaux de risques résiduels associés aux CMA	
		Effets sans seuil	Effets à seuil
		Excès de Risque Individuel	Quotient de Danger
Résidants adultes	Ingestion de sol	1,9E-07	5,5E-02
	Inhalation de poussières	1,6E-10	7,3E-06
	Inhalation de substances volatiles en extérieur	3,9E-06	1,2E-01
	Total	4,1E-06	1,7E-01
Résidants enfants	Ingestion de sol	3,4E-07	4,8E-01
	Inhalation de poussières	3,0E-11	7,0E-06
	Inhalation de substances volatiles en extérieur	3,0E-06	4,4E-01
	Total	3,4E-06	9,2E-01
Résidants enfants grandissants *	Ingestion de sol	4,9E-07	4,8E-01
	Inhalation de poussières	1,6E-10	7,0E-06
	Inhalation de substances volatiles en extérieur	6,1E-06	4,4E-01
	Total	6,6E-06	9,2E-01

* : 6 ans enfants et 24 ans adultes

Tableau 65 : Niveaux de risques résiduels pour les résidants du site 3

Les substances qui contribuent majoritairement aux risques sont :

- le naphtalène et le benzène par inhalation de vapeur pour les effets sans seuil ;
- le naphtalène par inhalation de vapeur et les TPH par inhalation de vapeur et ingestion de sol pour les effets à seuil.

4.3. SITE 4 : CALCUL DES CONCENTRATIONS MAXIMALES ADMISSIBLES (CMA)

Des concentrations maximales admissibles (CMA) dans les gaz du sol à 2 m de profondeur au droit du site 4 ont été déterminées par un calcul de risque à rebours, considérant que :

- (1) les niveaux des risques globaux doivent être inférieurs aux seuils de référence de 10^{-5} et 1, pour les effets sans seuil et à seuil respectivement, et
- (2) la proportion initiale des composés (PCE et TCE) dans les gaz du sol (présentée en section 3.2.4) n'est pas modifiée par la mise en œuvre des techniques de dépollution.

Ces CMA dans les gaz du sol sont présentées dans le tableau suivant (colonne 2).

Substances	CMA dans les gaz du sol à 2 m de profondeur ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CMA pour des techniques de dépollution de la ZS et de la ZNS		CMA pour des techniques de dépollution de la ZS uniquement
		CMA dans les sols (mg/kg)	CMA dans la nappe (mg/L)	CMA dans la nappe (mg/L)
Tétrachloroéthylène (PCE)	2,4E+04	3,9E+02	4,1E+01	1,9E+01
Trichloroéthylène (TCE)	5,6E+04	8,6E+01	2,2E+01	1,2E+01

Tableau 66 : Concentrations maximales admissibles (CMA) dans les différents milieux du site 4 pour un usage industriel

Sur la base des CMA dans les gaz du sol, des CMA ont été calculées :

- D'une part, dans la nappe et dans les sols (colonnes 3 et 4) pour les techniques traitant simultanément la ZS et la ZNS (venting/sparging, ISCO). Pour ce faire, il a été considéré que le pourcentage d'abattement des concentrations de chaque substance était identique dans les différents milieux. Il s'avère que l'atteinte des CMA dans les gaz du sol nécessite un rendement épuratoire dans la ZS et dans la ZNS de 8 % minimum.
- D'autre part, dans la nappe (colonne 5) pour les techniques de traitement de la ZS uniquement (atténuation naturelle monitorée, traitement biologique aérobie). Pour ce faire, la contribution des sols et de la nappe aux concentrations dans les gaz du sol a été calculée pour chaque substance (à l'équilibre selon les hypothèses relatives au milieu souterrain présentées dans le Tableau 55 et considérant une fraction de carbone organique foc = 0,006). En effet, la part attribuable aux sols ne sera pas modifiée par la mise en œuvre de la technique de dépollution. Cette estimation fournit les résultats suivants :

- les sols contribuent à 86 % des concentrations en PCE et 84 % des concentrations en TCE dans les gaz du sol (part constante pour les techniques de dépollution de la ZS seule) ;
- la nappe contribue à 14 % des concentrations en PCE et 16 % des concentrations en TCE dans les gaz du sol (part sur laquelle les techniques de dépollution de la ZS pourront influencer).

Sur la base de ces éléments, pour chaque composé, la CMA dans la nappe est déterminée en considérant que (1) la contribution des sols aux concentrations dans les gaz du sol est inchangée et (2) la concentration dans les gaz du sol, résultant des contributions des sols et des eaux souterraines, est égale à la CMA spécifique au milieu gaz du sol. Il s'avère que l'atteinte des CMA dans les gaz du sol nécessite un rendement épuratoire de la ZS (milieu eaux souterraines) de 57 % pour le PCE et de 50 % pour le TCE minimum.

Les risques résiduels associés à ces CMA sont présentés dans le Tableau 67.

SITE 4 - SITUATION FINALE (CMA)		Niveaux de risques résiduels associés aux CMA	
		Effets sans seuil	Effets à seuil
		Excès de Risque Individuel	Quotient de Danger
Employés	Inhalation de substances volatiles dans le bâtiment	9,7E-06	2,6E-02
	Inhalation de substances volatiles en extérieur	2,2E-08	5,9E-05
	Total	9,7E-06	2,6E-02

Tableau 67 : Niveaux de risques résiduels pour les employés du site 4

Annexe 3

Description des catégories d'impacts évaluées pour la comparaison des technologies de traitement de sols

1. Différentes catégories d'impacts évaluées dans l'étude

Echelle	Catégorie d'impact	Unité caractéristique	Facteur de normalisation	Calcul de facteurs de caractérisations locaux
Globale	<i>Changement climatique</i>	kg CO ₂ éq.	0,000089	Non pertinent
	<i>Déplétion de la couche d'ozone</i>	kg CFC-11 éq.	45,4	Non pertinent
	<i>Déplétion des ressources en énergie fossile</i>	kg oil éq.	0,000526	Non pertinent
	<i>Déplétion des ressources en métaux</i>	kg Fe éq.	0,0014	Non pertinent
Régionale	<i>Acidification terrestre</i>	kg SO ₂ éq.	0,029	-
	<i>Eutrophisation des eaux de surface</i>	kg P éq.	3,97	-
	<i>Eutrophisation marine</i>	kg N éq.	0,0806	-
	<i>Formation d'oxydant photochimique (ozone)</i>	kg NMVOC	0,0177	-
Locale	<i>Toxicité humaine non cancérigène</i>	CTUh	-	Oui
	<i>Toxicité humaine cancérigène</i>	CTUh	-	Oui
	<i>Ecotoxicité des eaux de surface</i>	CTUe	-	Oui
	<i>Ecotoxicité terrestre</i>	kg 1,4-DB éq.	0,122	-
	<i>Ecotoxicité marine</i>	kg 1,4-DB éq.	0,242	-
	<i>Formation de particule aérosol</i>	kg PM10 éq.	0,067	-
	<i>Occupation d'espace urbain</i>	m ²	0,00245	-
	<i>Occupation d'espace agricole</i>	m ²	0,000221	-
	<i>Transformation d'espace naturel</i>	m ² a	6,18	-
	<i>Déplétion de la ressource en eaux</i>	m ³	-	-
<i>Radiations ionisantes</i>	kg U235 éq.	0,00016	-	

Tableau 68 : Différentes catégories d'impacts potentiels prises en compte pour l'évaluation environnementale des technologies de traitement de sols et des eaux souterraines polluées.

2. Changement climatique

Description de l'impact :

Le changement climatique est défini comme l'impact sur le "forçage radiatif" des émissions humaines dans l'atmosphère. Le forçage radiatif est le changement d'équilibre entre les radiations pénétrant l'atmosphère et celles qui s'en échappent. Un forçage radiatif positif tend à réchauffer la surface de la Terre, et un forçage négatif tend en moyenne à en refroidir la surface.

Les gaz dits « à effet de serre » permettent, grâce à leur structure moléculaire dissymétrique, d'absorber le rayonnement solaire et de réémettre ce rayonnement en infrarouge. Il s'agit d'un phénomène naturel qui permet de garder une température moyenne d'une quinzaine de degré Celsius à la surface de la Terre, il s'agit du phénomène d'« effet de serre ». Lorsque la concentration de ces gaz à effet de serre augmente dans l'atmosphère du fait des rejets anthropiques, le phénomène d'effet de serre est amplifié et est appelé « augmentation de l'effet de serre ». Ce phénomène peut conduire à terme à une augmentation de la température moyenne de la Terre, un dérèglement climatique et entraîner de nombreux effets néfastes sur la qualité des écosystèmes et la santé humaine [IPCC, 2007].

Principales substances contributrices à l'impact :

CO₂ (Pouvoir de réchauffement Global ou PRG à 100 ans =1), CH₄ (PRG à 100 ans =25), et N₂O (PRG à 100 ans = 296)

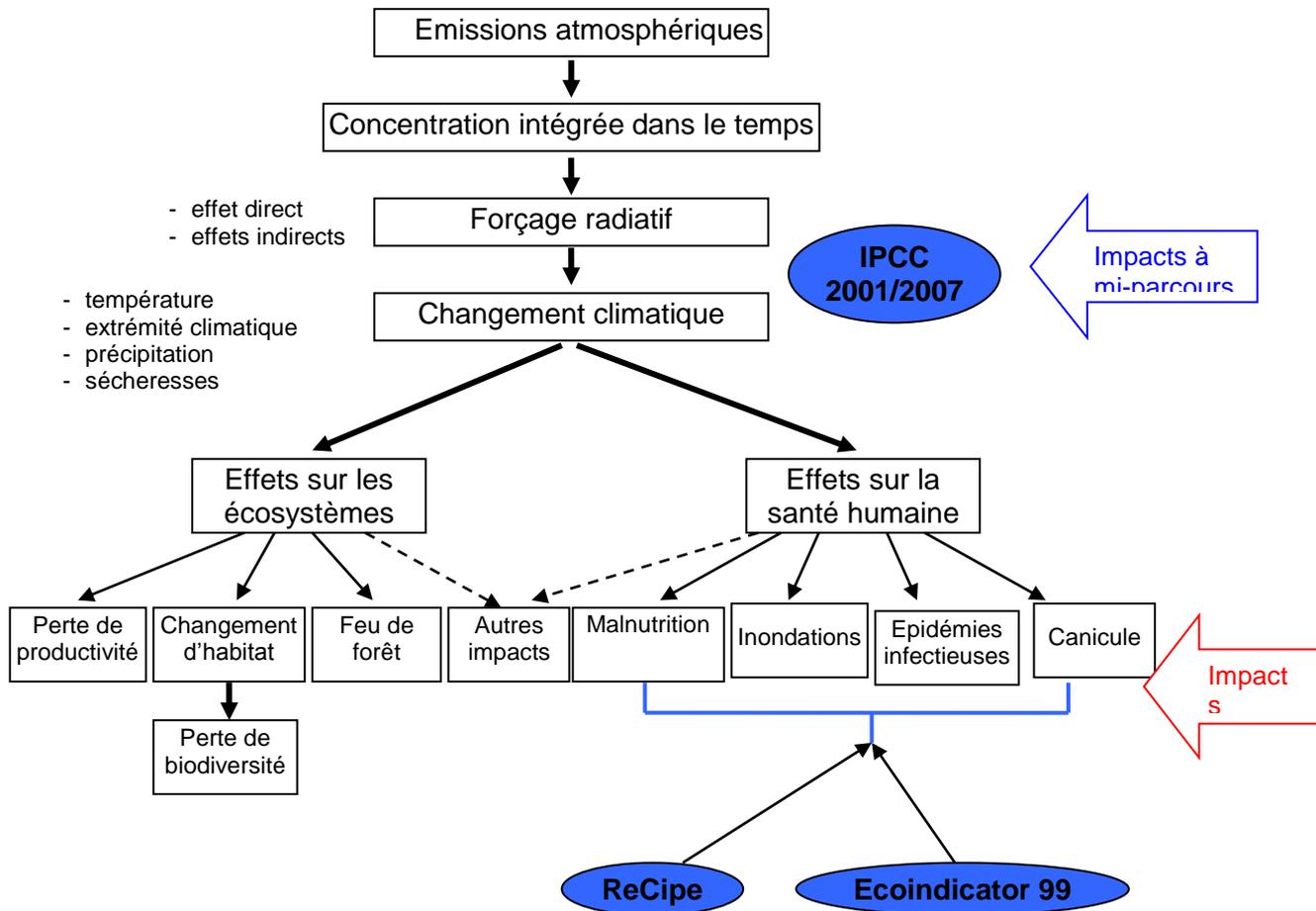
Chaîne de cause à effet :

Figure 1 : Chaîne de cause à effet décrivant l'impact des émissions de gaz à effet de serre sur l'environnement (ILCD 2010)

Caractérisation de l'impact :

A mi-parcours, la caractérisation de cet impact est généralement décrite par le « potentiel de réchauffement global » issu des travaux du GIEC (IPCC 2001 ou 2007 selon les méthodes). Le potentiel de réchauffement global est une expression purement physique basée sur une intégration temporelle du forçage radiatif global moyen de l'émission instantanée de 1 kg d'une substance (x) rapporté à 1 kg du gaz de référence, le CO₂.

$$PRG_x \equiv \frac{\int_0^{TH} RF_x(t) dt}{\int_0^{TH} RF_{CO_2}(t) dt} = \frac{\int_0^{TH} a_x \cdot [C_x(t)] dt}{\int_0^{TH} a_{CO_2} \cdot [C_{CO_2}(t)] dt}$$

(1)

TH : horizon temporelle
RF : forçage radiatif

La caractérisation des impacts finaux (dommages) est quant-à elle beaucoup plus complexe. Il existe des impacts directs (canicules, ouragans...) et indirects (apparition de maladies, malnutrition, sécheresse...) du changement climatique à prendre en compte.

Le calcul des facteurs de caractérisation est réalisé par calcul des changements marginaux des dommages (Δ DALY ou Δ PDF) sur les aires de protections, lié à un changement marginal de la température (ΔT). Selon les méthodes, le nombre d'impacts pris en compte est variable (cf. Figure 1). L'incertitude associée aux méthodes *endpoint* est importante.

3. Déplétion de la couche d'ozone

Description de l'impact :

La déplétion de la couche d'ozone se réfère à l'amincissement de la couche d'ozone stratosphérique, au niveau de l'Antarctique, résultant des émissions anthropiques. Par conséquence, une plus grande fraction du rayonnement UV-B solaire atteint la surface de la terre pouvant donc entraîner des effets potentiellement nocifs sur la santé humaine, la santé animale, les écosystèmes terrestres et aquatiques, les cycles biochimiques et les matériaux [Guinée et al., 2001].

Principales substances contributrices à l'impact :

CFC, HFC, SF₆

Chaîne de cause à effet :

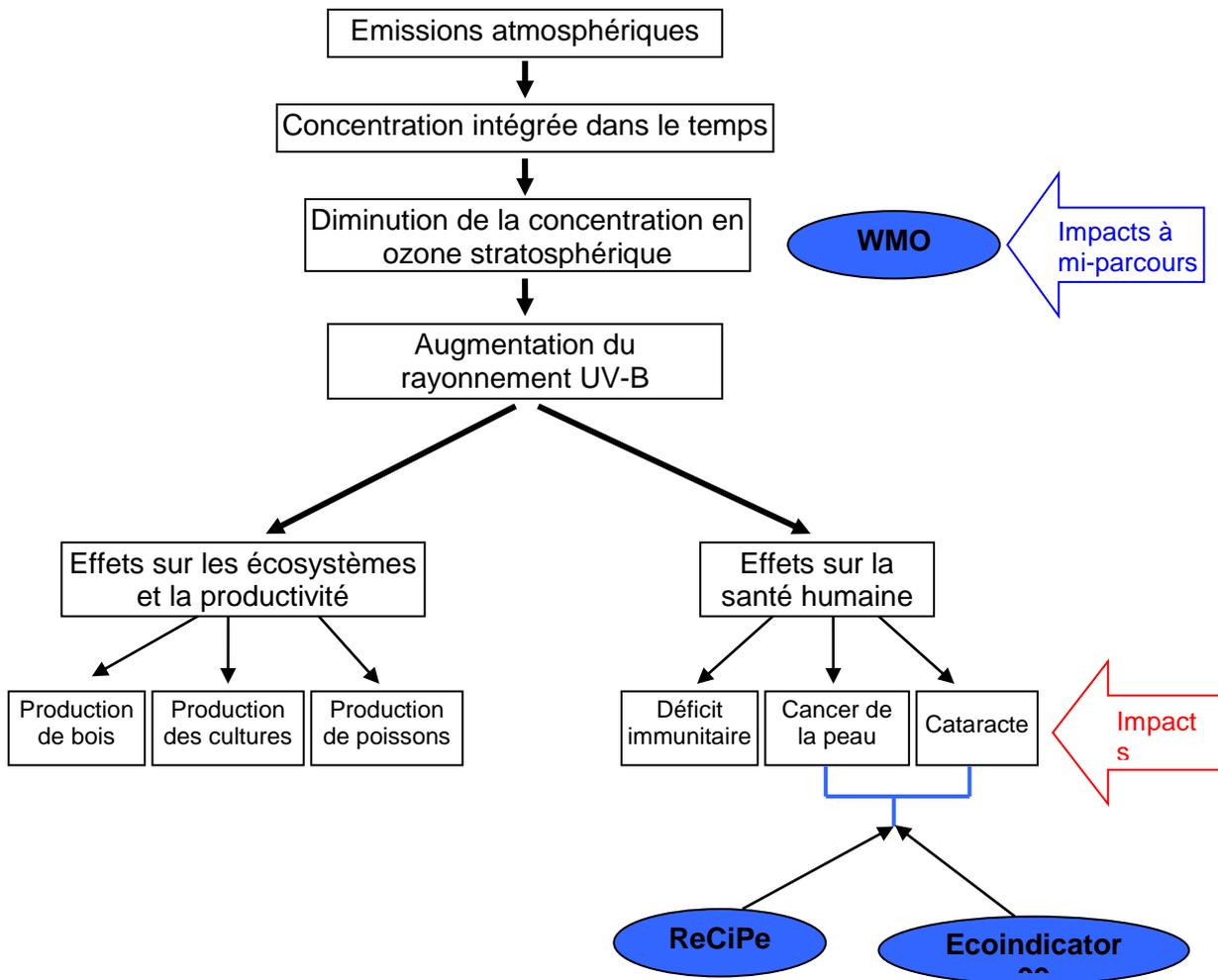


Figure 2 : Chaîne de cause à effet décrivant l'impact des émissions de gaz destructeurs d'ozone sur l'environnement (ILCD 2010)

Caractérisation de l'impact :

A mi-parcours la caractérisation de cet impact est généralement décrite par le « potentiel de déplétion d'ozone en régime permanent » issu des travaux du WMO³.

$$ODP(x) = (\text{fractional release factor}) \cdot \alpha \cdot \frac{\tau_x}{\tau_{CFC-11}} \cdot \frac{M_{CFC-11}}{M_x} \cdot \frac{n_x}{3}$$

(2)

α : efficacité relative des halogènes par rapport au chlore pour la destruction d'ozone

τ_x : durée de vie globale de la molécule

M_x : masse molaire

n_x : nombre d'atomes halogénés de la molécules

Dans la méthode ReCiPe, les impacts finaux sur la santé humaine sont évalués à partir du nombre de DALYs "économisés" grâce à la réduction de la quantité de destructeurs d'ozone basée sur les prédictions du WMO (2003). La planète est divisée en 8 régions, les différences de couleur de peau sont prises en compte et l'altitude à laquelle vivent les populations également.

$$CF_j = \sum_{S=1}^8 \frac{\int_{2007}^{2100} \Delta DALY_{j,S} dt}{\int_{2003}^{2040} \Delta OD_j dt}$$

(3)

Pour le calcul des facteurs de caractérisation (équation 3), les périodes d'intégrations sont différentes car il s'agit de prendre en compte les cas de cancer qui vont survenir après l'exposition d'où l'intégration des DALYs sur la période 2007-2100 contre 2003-2040 pour les destructeurs d'ozones.

4. Déplétion des ressources abiotiques

Description de l'impact :

Les ressources abiotiques sont les ressources naturelles considérées comme non-vivantes telles que le pétrole, le charbon, l'uranium, les minerais. La consommation de ces ressources entraîne leur épuisement car leur vitesse de renouvellement est très largement inférieure à leur vitesse de consommation, ce qui en fait des ressources considérées comme non-renouvelables. Il existe d'importantes différences dans la

³ WMO : World meteorological organization

caractérisation de cet impact résultant de définitions variées / non-identiques du problème. Selon les définitions, la catégorie d'impact peut influencer uniquement sur l'aire de protection ressources naturelles ou sur les aires de protections ressources naturelles, santé humaine et environnement naturel [Guinée et al., 2001].

Principales substances contributrices à l'impact :

Pour cette catégorie d'impact, il s'agit d'entrants dans le système étudié tels que les énergies fossiles et les ressources minérales. Il est d'ailleurs fréquent que ces ressources soient différenciées en deux catégories d'impacts.

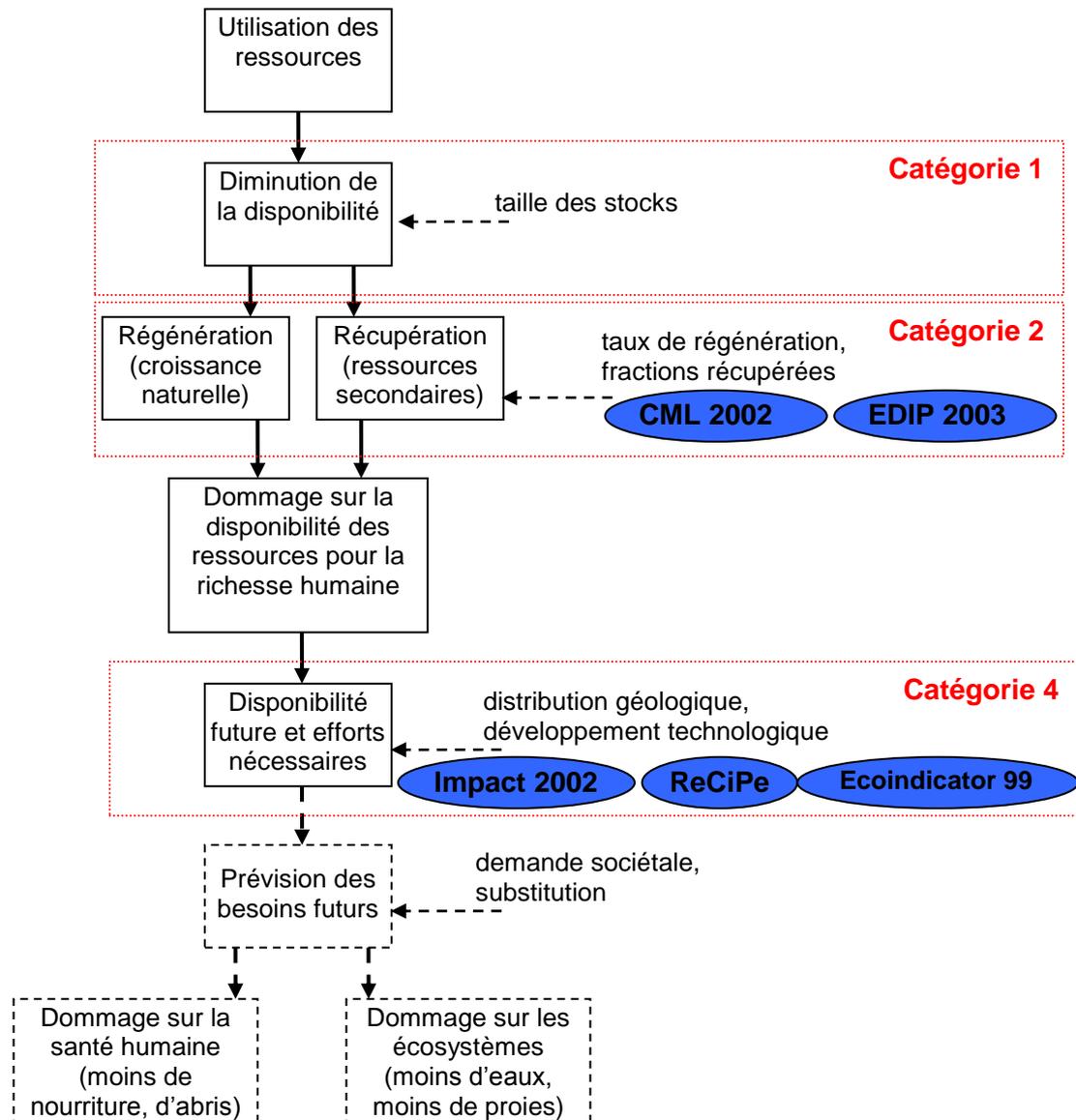
Chaîne de cause à effet :

Figure 4 : Chaîne de cause à effet décrivant l'impact des consommations de ressources sur l'environnement (ILCD 2010)

Caractérisation de l'impact :

L'ILCD (2010) recommande de distinguer les indicateurs en fonction de la finalité de la catégorie d'impact. Ces différences reflètent l'absence de consensus actuel et les

débats autour de l'aire de protection "ressource naturelle". Les différentes méthodes ont été classées en 4 catégories :

Catégorie 1 : l'analyse s'arrête à la première étape de la chaîne de cause à effet. Une propriété physique des matériaux est utilisée comme facteur de caractérisation. Par exemple, on caractérise l'impact par le contenu énergétique des énergies fossiles (le PCI). Cette méthode n'inclut pas la raréfaction des ressources.

Catégorie 2 : les méthodes décrivent l'impact par la raréfaction des ressources, les facteurs de caractérisation de l'impact sont déterminés par un ratio entre les quantités consommées et les réserves restantes. La pertinence environnementale est meilleure que pour la catégorie 1 mais l'incertitude est potentiellement accrue.

Catégories 3 : les méthodes qui se concentrent sur la ressource en eau, celle-ci étant traitée comme une catégorie séparée à cause de sa dépendance régionale que les modèles de caractérisation doivent prendre en compte.

Catégories 4 : ce sont les méthodes qui calculent des impacts finaux. Celles-ci visent à décrire l'ensemble du mécanisme environnemental.

5. Acidification terrestre

Description de l'impact :

L'acidification des milieux naturels est essentiellement due à l'émission de polluants atmosphériques acides en atmosphère sèche ou engendrant des acides en l'atmosphère humide. Les polluants acidifiants contribuent à l'appauvrissement du sol en nutriments et à la solubilisation des métaux lourds dans les eaux entre autres. Les exemples d'impacts de l'acidification sont, la mortalité des poissons dans les lacs scandinaves, le dépérissement des forêts ou encore l'effritement des matériaux de construction. Les aires de protections touchées sont : l'environnement naturel, l'environnement artificiel, la santé humaine et les ressources naturelles [Guinée et al., 2001].

Principales substances contributrices à l'impact :

NO_x, NH₃ et SO₂

Chaîne de cause à effet :

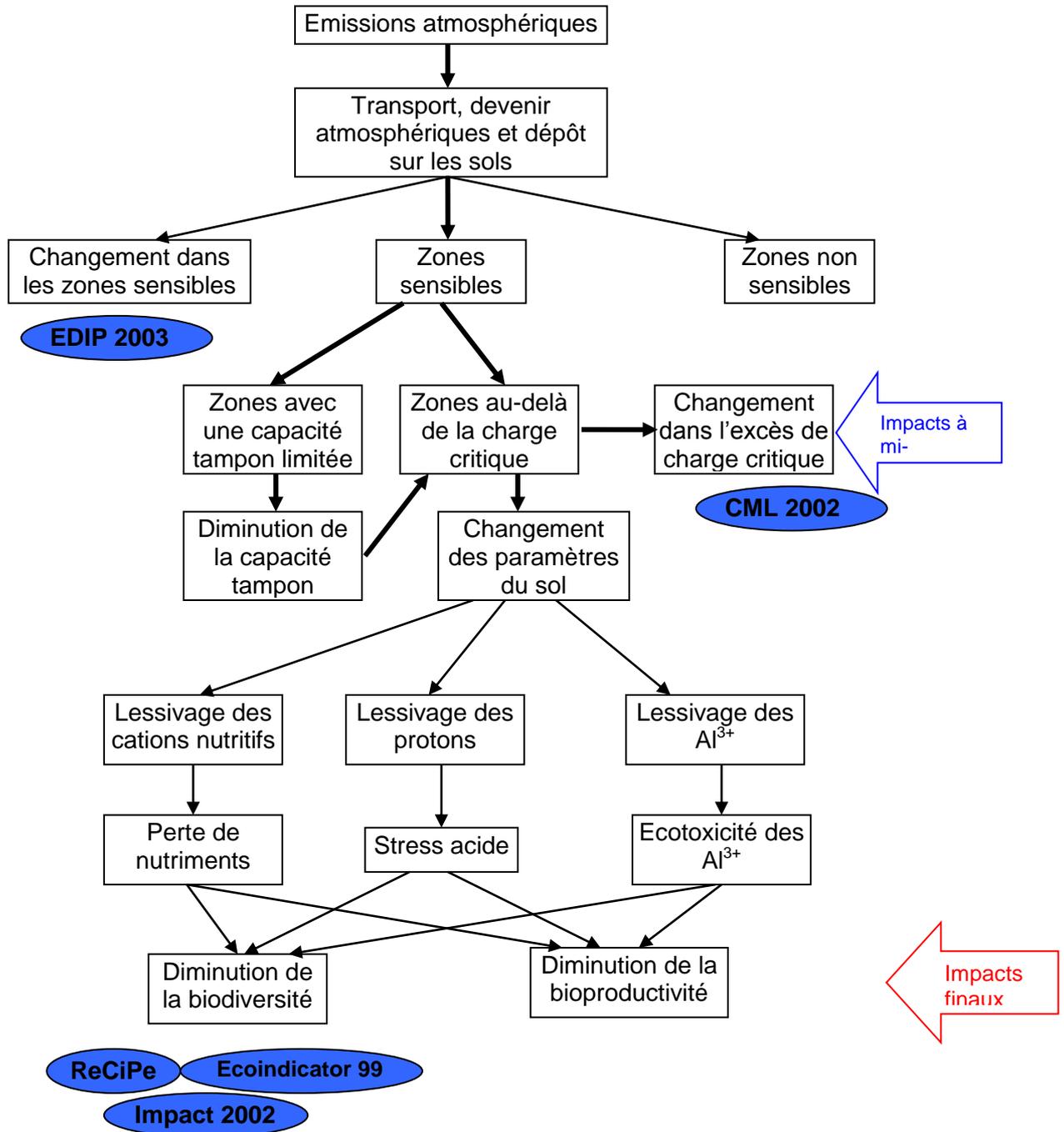


Figure 4 : Chaîne de cause à effet décrivant l'impact des émissions de gaz acidifiants sur l'environnement (ILCD 2010)

Caractérisation de l'impact :

L'impact à mi-parcours est généralement caractérisé par un potentiel d'acidification. Ce dernier est généralement exprimé en kg SO₂ équivalent. Cet impact peut être divisé en plusieurs sous-catégories en fonction du milieu récepteur (aquatique ou terrestre).

Selon les méthodes d'analyse des impacts, le potentiel d'acidification est uniquement basé sur une relation stœchiométrique. Un facteur d'équivalence avec le SO₂ peut alors être déterminé :

$$EF_x = \frac{n_x}{2 \cdot M_x} \cdot 64,06 = \frac{n_x}{M_x} \cdot 32,03 \quad (4)$$

où M_x est la masse molaire de la substance (x) émise, n le nombre de protons libérés dans le milieu et 64,06 la masse molaire du SO₂

D'autres méthodes vont plus loin dans la description de la chaîne de cause à effet, elles prennent en compte le transport depuis les zones d'émissions vers les zones de dépôt, la déposition sur une zone géographique donnée et la capacité tampon du sol. Afin de calculer un impact à mi-parcours en équivalent SO₂ par exemple, le devenir de la substance (FF_x) est alors rapporté à celui de la substance de référence (FF_{SO_2}) (voir équation 5), ce qui permet d'obtenir un potentiel d'acidification en équivalent SO₂.

$$AP = \frac{FF_x}{FF_{SO_2}} \quad (5)$$

Enfin, les méthodes dites *endpoint* modélisent toute la chaîne de cause à effet et prennent en compte les effets (EF), la réponse de l'écosystème par une relation entre le nombre d'espèces potentiellement disparues et la saturation du sol.

$$CF_{x,ar} = FF \cdot EF = \underbrace{f_{x,ar} \cdot \theta_{x,r \text{ sensitivity}}}_{FF} \cdot \underbrace{\beta_{dose-response}}_{EF} \quad (6)$$

$f_{x,a,r}$: représente le parcours de la substance x dans l'air (a) et transfert vers le milieu récepteur (r)

$\theta_{x,r \text{ sensitivity}}$: facteur de sensibilité du milieu récepteur

$\beta_{dose-reponse}$: facteur « d'effet » décrivant la réponse de l'écosystème à l'acidification du sol.

6. Eutrophisation aquatique et terrestre

Description de l'impact :

L'eutrophisation résulte d'un apport trop important de nutriments (notamment azote et phosphore) dans les eaux de surface entraînant une prolifération des algues, une stratification des eaux avec un appauvrissement en oxygène (quantifiée par la Demande Biologique en Oxygène ou DBO) et une activité microbienne en condition anaérobie croissante. L'enrichissement en nutriment peut provoquer une modification indésirable de la composition des espèces et une production de biomasse (trop) importante dans les écosystèmes aquatiques et terrestres perturbant la photosynthèse. De plus, des concentrations élevées en nutriments peuvent rendre les eaux de surface impropres à la consommation [Guinée et al., 2001].

Principales substances contributrices à l'impact :

Composés azotés et phosphorés + matière organique biodégradable.

Chaîne de cause à effet :

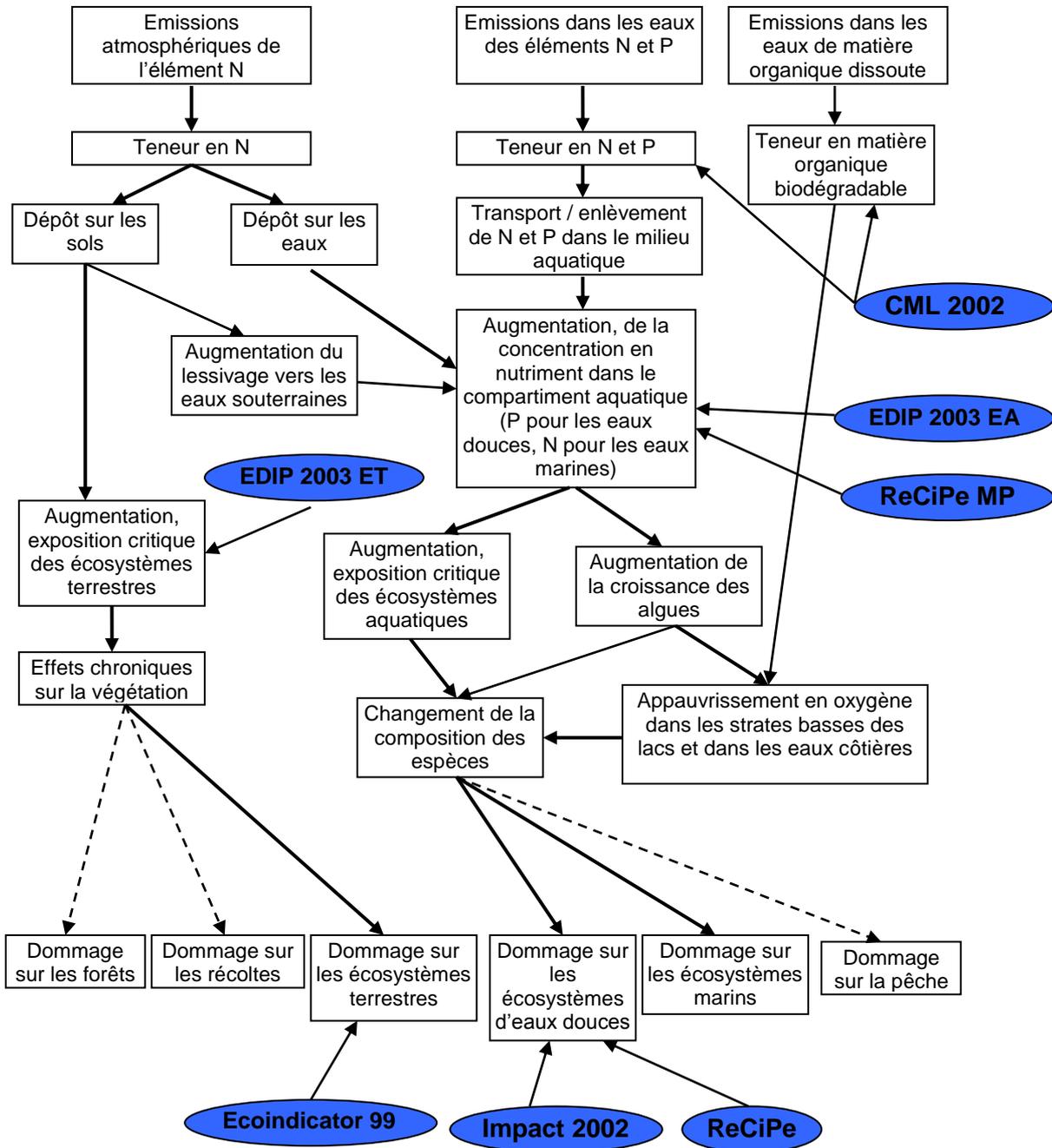


Figure 5 : Chaîne de cause à effet décrivant l'impact des rejets d'éléments nutritifs sur l'environnement (ILCD 2010)

Caractérisation de l'impact :

A mi-parcours, l'impact est généralement caractérisé par un potentiel d'eutrophisation. Ce dernier est généralement exprimé en kg PO₄³⁻ équivalent. Cet impact peut être divisé en plusieurs sous-catégories en fonction du milieu récepteur.

Le principe général des modèles de caractérisation de l'impact est similaire à celui de l'acidification avec deux phases. Une première phase décrit le devenir des substances émises dans l'environnement, en fonction du milieu (m) où elles sont émises et du milieu récepteur (r).

$$CF_{x,m,r} = FF \cdot EF = f_{x,m,r} \cdot \beta_{dose-response} \quad (7)$$

Afin d'évaluer les dommages sur les aires de protections, les effets dose-réponse (EF) sont évalués.

Par exemple, il est possible d'établir une courbe de "non-occurrence" des espèces en fonction de la concentration en phosphore dans les eaux douces (cf. Figure 6).

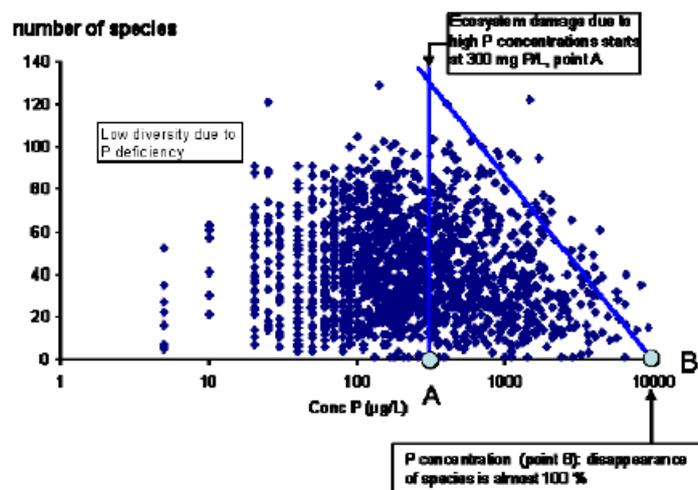


Figure 6 : Nombre d'espèces de la macrofaune présentes dans les eaux douces hollandaises, en été, en fonction de la concentration en phosphore (ReCiPe)

De cette courbe, il est ensuite possible de déduire des "PDF" en fonction de la concentration en P du milieu (cf. Figure 7) et donc de calculer un facteur de dommage.

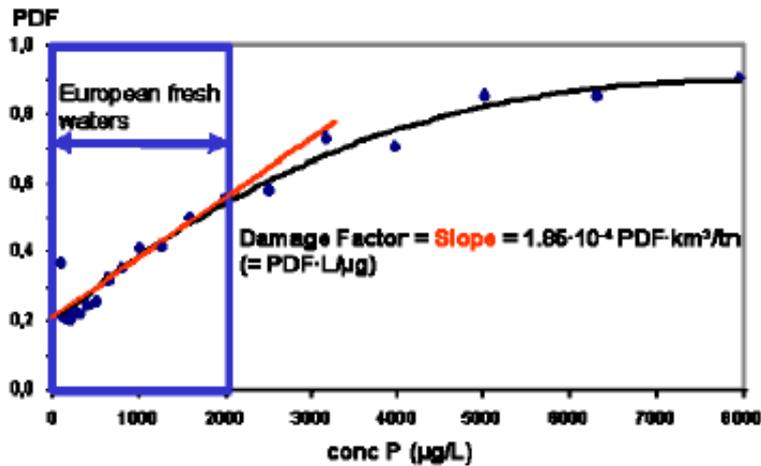


Figure 7 : PDF vs concentration en P dans les eaux de surface (issu de ReCiPe)

7. Formation de photo-oxydant (ozone photochimique)

Description de l'impact :

La formation de photo-oxydants se caractérise par la génération de composés chimiques réactifs tels que l'ozone, en basse atmosphère (la troposphère) par l'action du rayonnement solaire (les photons) sur certains polluants atmosphériques primaires appelés précurseurs (COV, CO,...). Cet ozone en basse altitude peut être préjudiciable pour la santé humaine, pour les écosystèmes et peut également endommager les cultures [Guinée et al., 2001].

Principales substances contributrices à l'impact :

COV, NO_x

Chaîne de cause à effet :

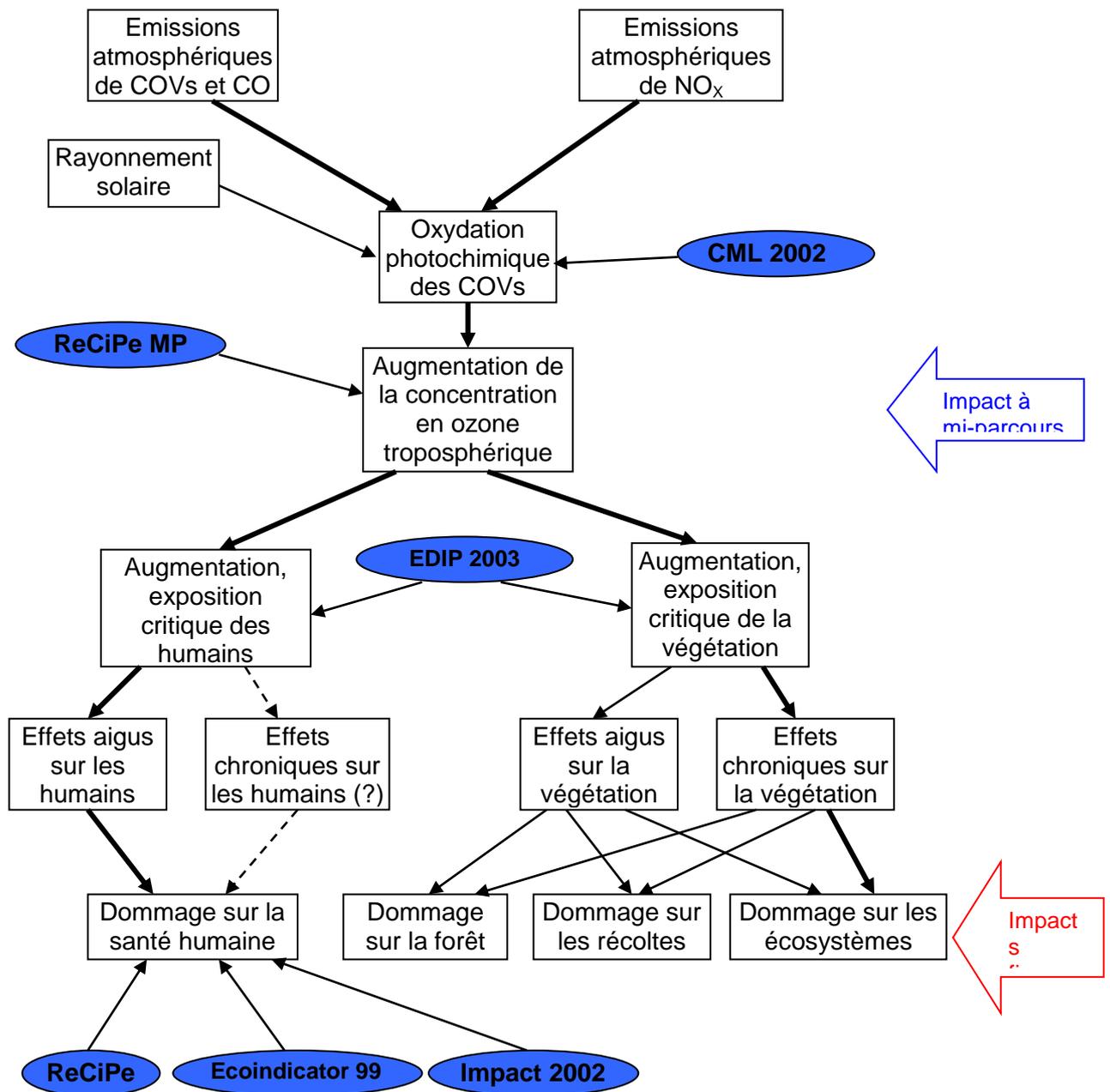


Figure 8 : Chaîne de cause à effet décrivant l'impact des émissions de précurseurs d'ozone sur l'environnement (ILCD 2010)

Caractérisation de l'impact :

A mi-parcours, l'impact est généralement caractérisé par le potentiel de création d'ozone photochimique. Ce dernier est généralement exprimé en kg éthylène équivalent. La caractérisation de cet impact est rendue particulièrement complexe par le nombre de facteurs qui vont influencer la formation d'ozone : météo (rayonnement solaire), présence combinée de différentes substances appelées précurseurs (COVs et NO_x). Il existe également des sources naturelles de précurseurs telles que les forêts, pouvant contribuer à cet impact.

Cet impact peut être divisé en deux catégories en fonction de l'aire de protection exposée : ozone photochimique sur la végétation (Environnement naturel) et effets respiratoires provoqués par les composés organiques (Santé humaine). Ce sont alors les facteurs d'effets (EF) qui sont différents.

8. Utilisation de l'espace naturel

Description de l'impact :

La catégorie d'impact "utilisation du sol" caractérise une gamme importante d'effets sur l'environnement de l'usage des sols par l'homme. Une distinction a été faite en fonction du compartiment impacté : les ressources, la biodiversité, les fonctions supports de la vie, etc [Guinée et al., 2001]. Différentes sous catégories d'impacts sont explicitées :

- Compétition des usages du sol ;
- Perte de biodiversité ;
- Perte de fonctions supports de la vie ;
- Dessiccation.

Parmi ces catégories, seule la perte de biodiversité est généralement caractérisée dans les méthodes de caractérisation des impacts.

Chaîne de cause à effet :

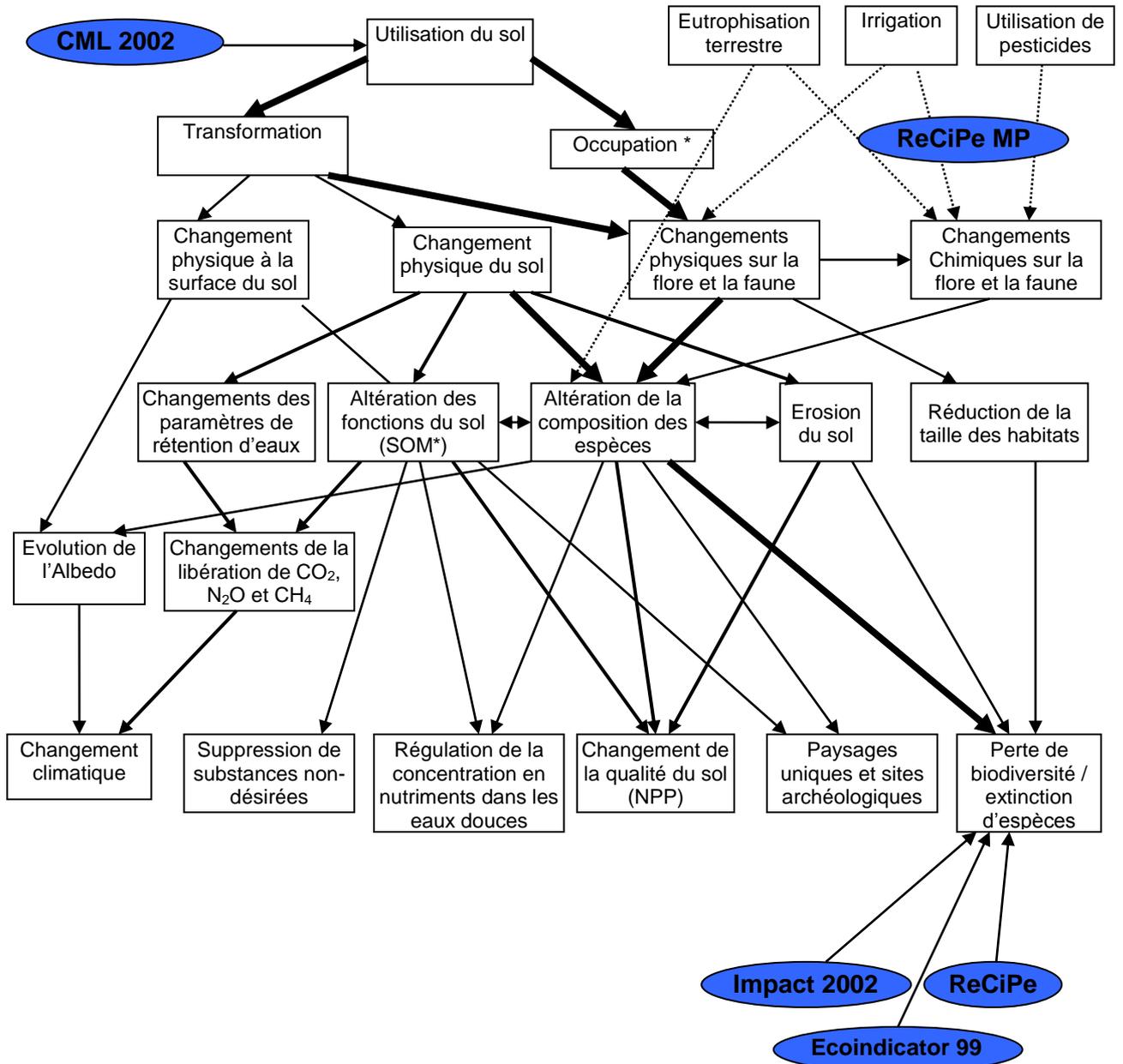


Figure 9 : Chaîne de cause à effet décrivant l'impact de l'utilisation de l'espace naturel sur l'environnement (ILCD 2010)

Caractérisation de l'impact :

La caractérisation de l'impact est généralement basée sur les travaux issus d'Ecoinvent et de la nomenclature de Corine Land Cover (2006), les facteurs de caractérisation étant déterminés en fonction des usages du sol et de leur changement d'affectation. Les méthodes les moins élaborées considèrent uniquement les surfaces consommées alors que les plus élaborées tiennent compte des changements d'affectation de l'usage du sol.

9. Toxicité humaine cancérigène et non cancérigène

Description de l'impact :

Cette catégorie d'impact couvre l'effet toxique de certaines substances sur la santé humaine que cela soit des effets cancérigènes ou non-cancérigènes avec pour cette méthode une distinction entre les deux types d'effets. Cette catégorie d'impact suscite encore beaucoup de débat et fait l'objet de nombreuses recherches en raison de la mauvaise connaissance des phénomènes en jeu et du caractère sensible de cette catégorie notamment dans les processus décisionnels [Guinée et al., 2001]. Conventionnellement, les risques sur la santé encourus par les travailleurs, du fait de l'exposition sur leur lieu de travail à des substances toxiques, ne sont pas inclus dans la caractérisation des impacts en ACV. Cependant, les praticiens visent de plus en plus à inclure ces risques professionnels à l'ACV en considérant également les accidents du travail. Cette catégorie d'impact est généralement dissociée de l'impact toxicité humaine et évaluée de manière plus marginale en faisant appel plutôt aux cyndiniques.

Principales substances contributrices à l'impact :

Dioxine, les métaux lourds,...

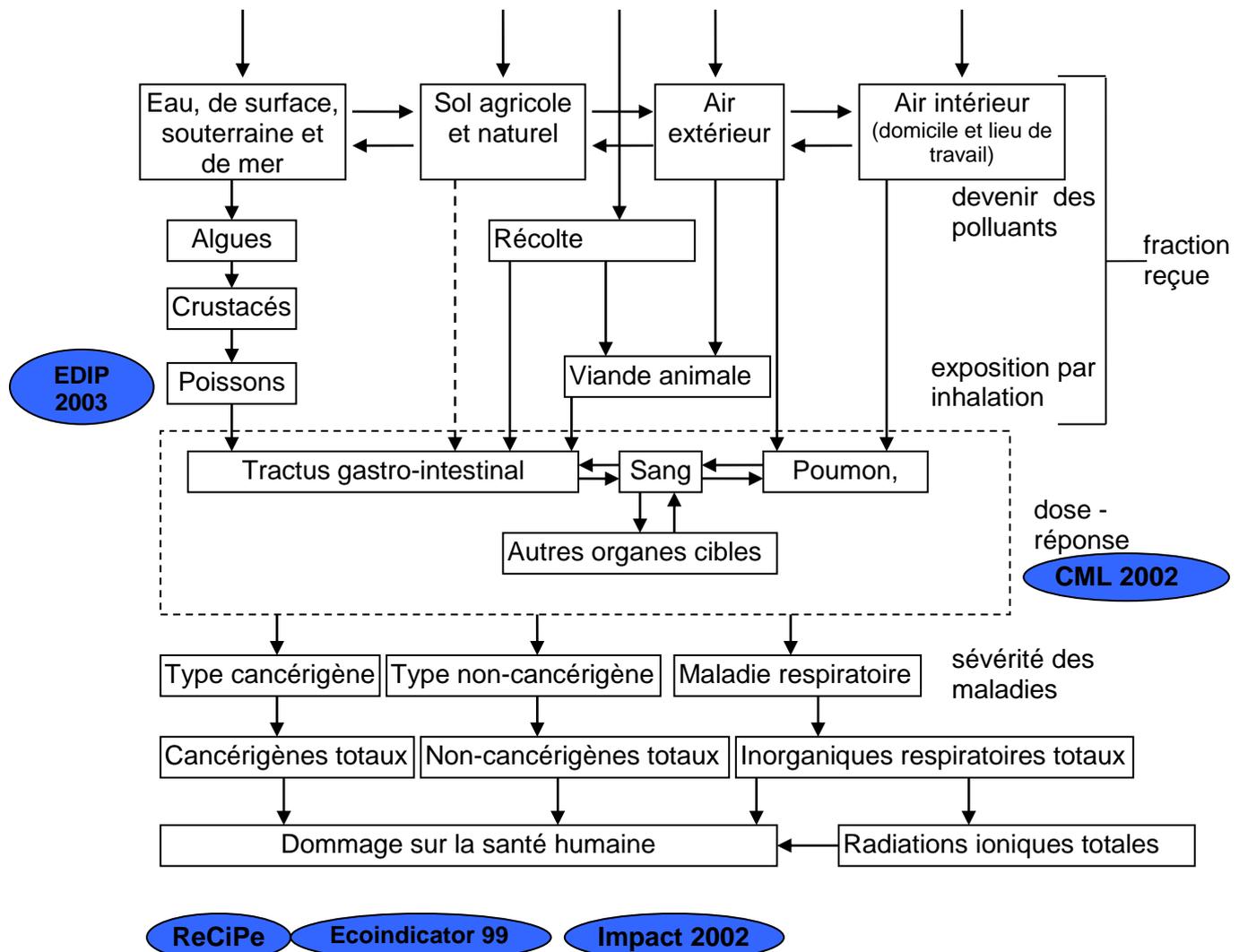
Chaîne de cause à effet :

Figure 10 : Chaîne de cause à effet décrivant l'impact des rejets de substances toxiques sur l'environnement (ILCD 2010)

Caractérisation de l'impact :

Les modèles de caractérisation de l'impact toxicité humaine doivent tenir compte du devenir environnemental (F), de l'exposition (X) et des effets dose-réponse (R) d'une substance pour le calcul de l'impact à mi-parcours auxquels s'ajoute un facteur de sévérité pour caractériser les impacts finaux. Le devenir du polluant et l'exposition sont généralement regroupés sous le terme "iF" pour "intake fraction". La sévérité et les effets dose-réponse sont regroupés sous le terme facteur d'effet (EF).

$$CF = S \cdot R \cdot X \cdot F = S \cdot R \cdot iF$$

(8)

Afin de déterminer les effets dose-réponse (R) d'une substance chimique, les facteurs sont généralement basés sur les doses d'effet à 10 % (ED10) et à 50 % (ED50) quand ces dernières sont disponibles. Dans le cas contraire, des extrapolations sont faites à partir des NOAEL⁴ ou LOAEL⁵.

Enfin les facteurs de sévérité peuvent être quantifiés à partir des YLL (years of life lost) et YLD (year of life disabled).

⁴ NOAEL : No Observable Adverse Effect Levels

⁵ LOAEL : Lowest Observable Adverse Effect Levels

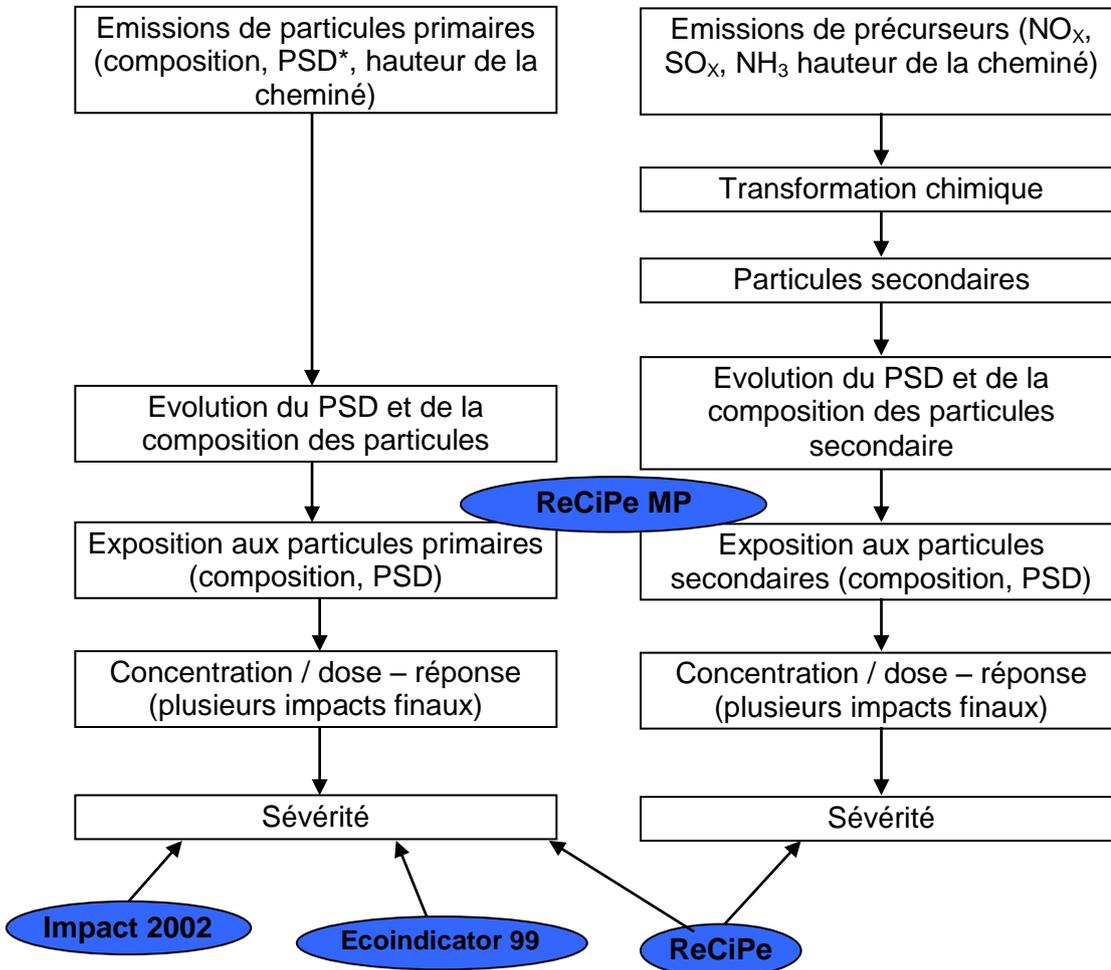
10. Effets respiratoires inorganiques

Description de l'impact :

Cet impact représente les effets respiratoires et leurs conséquences (accroissement de la mortalité, de la morbidité et des hospitalisations) sur l'Homme des polluants atmosphériques inorganiques. L'évaluation de l'impact est basée sur les données épidémiologiques des effets respiratoires de la pollution. Cette catégorie d'impact affecte l'aire de protection santé humaine ; dans certaines méthodes d'analyse des impacts elle peut être englobée dans la catégorie toxicité humaine. Cette catégorie est redondante à la catégorie « formation d'ozone troposphérique » car elle implique le plus souvent les mêmes substances engendrant les mêmes effets.

Principales substances contributrices à l'impact :

SO_x, NO_x, CO, O₃, NH₃ ...

Chaîne de cause à effet :

*PSD :

Figure 11 : Chaîne de cause à effet décrivant l'impact des sur l'environnement (ILCD 2010)

Caractérisation de l'impact :

A mi-parcours, l'impact "effets respiratoires provoqués par les composés inorganiques" est généralement caractérisé par des kg équivalent PM_{2,5} (particules de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm). Ce sont les particules qui vont directement affecter les voies respiratoires car elles ne sont pas arrêtées par les filtres naturels (voies nasales) de l'organisme humain.

$$CF = S \cdot R \cdot X \cdot F = EF \cdot iF$$

(9)

La démarche de caractérisation de l'impact est similaire à celle de l'impact toxicité humaine : devenir du polluant dans l'environnement (F), exposition (X), dose-réponse (R), et enfin sévérité (S) pour déterminer un impact final.

11. Ecotoxicité aquatique et Ecotoxicité terrestre

Description de l'impact :

Cette catégorie d'impact caractérise les impacts des substances toxiques sur les écosystèmes aquatiques, terrestres et les écosystèmes des sédiments. L'aire de protection concernée par cette catégorie d'impact est l'environnement naturel (et également les ressources naturelles). De même que pour la toxicité humaine, le calcul de l'écotoxicité fait encore le débat [Guinée et al., 2001].

Principales substances contributrices à l'impact :

Pb, Cd, Hg, PCB, HAP...

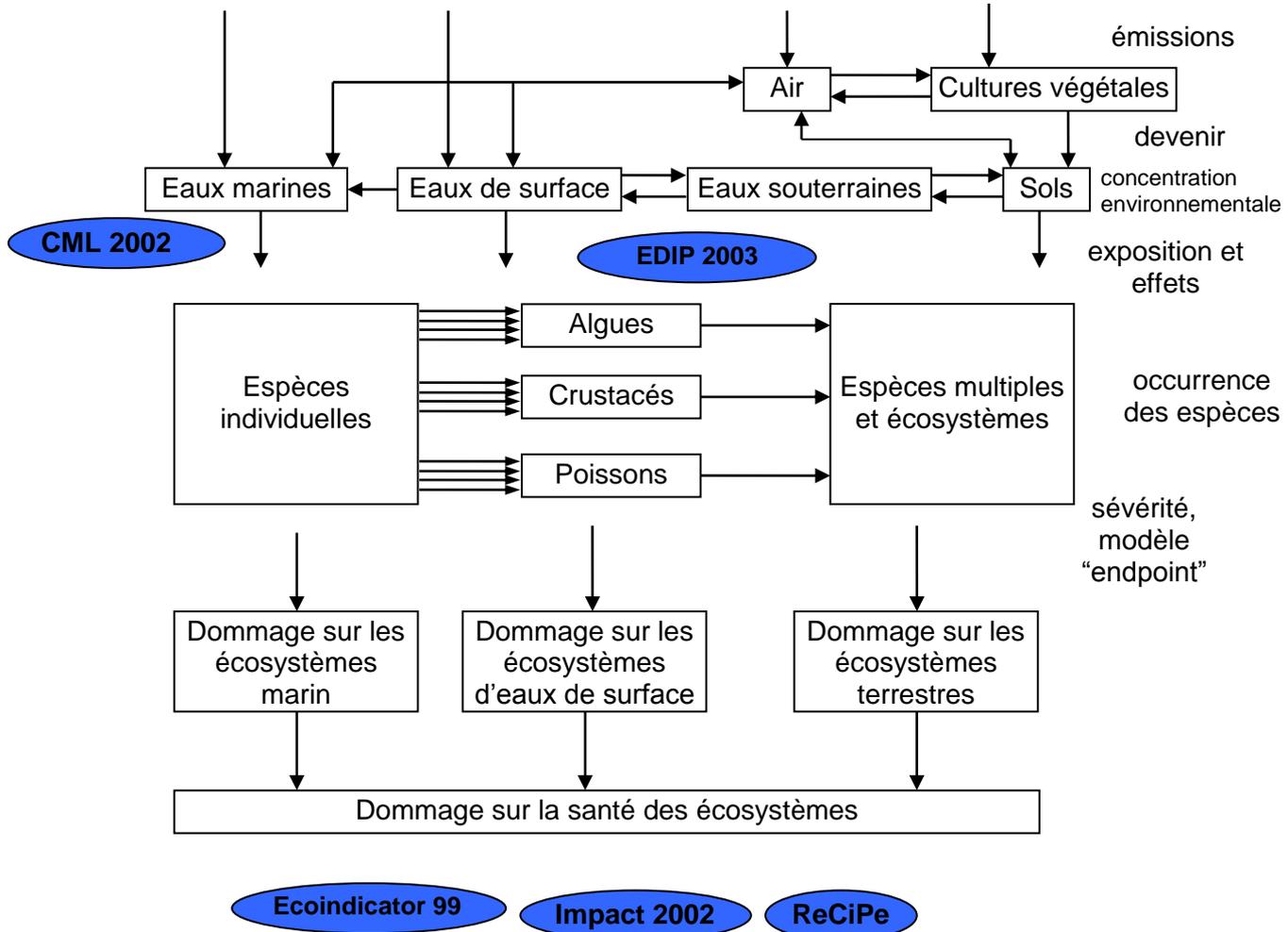
Chaîne de cause à effet :

Figure 12 : Chaîne de cause à effet décrivant l'impact des rejets de substances écotoxiques sur l'environnement (ILCD 2010)

Caractérisation de l'impact :

Les modèles de caractérisation cherchent à décrire, le devenir des substances toxiques dans l'environnement, l'exposition à ces substances et leurs effets.

A titre d'exemple, les effets dans la méthode Impact 2002 + sont basés sur la HC_{50} (pour "hazardous concentration") (Payet J., 2004). La HC_{50} est calculée à partir de la moyenne géométrique des EC_{50} et l'intervalle de confiance est basé sur une distribution de Student. Un minimum de 3 EC_{50} pour une substance toxique, doivent être disponibles pour calculer l' HC_{50} .

$$EF = \frac{\Delta PAF}{\Delta C} = \frac{0.5}{HC_{50}} (PAF \cdot m^3 \cdot kg^{-1})$$

(10)

EF : facteur d'effet

ΔPAF : variation de la fraction potentiellement affectée

ΔC : augmentation de la concentration

Les facteurs de caractérisation peuvent alors recalculé en équivalent d'une substance de référence :

$$CF_x = \frac{EF_x}{EF_{TEG}} (kg \text{ équivalent } TEG)$$

(11)

La figure13 présente les calculs de toxicité moyenne (avec les barres d'erreur) et l'espèce la plus sensible pour trois types de fongicide avec et sans prise en compte de l'espèce *Ictalurus punctatus*. Si la moyenne géométrique varie peu, en revanche le niveau de toxicité déterminé par l'espèce la plus sensible varie fortement, d'où l'intérêt de caractériser l'impact à partir d'une moyenne sur plusieurs espèces, cela fiabilise les facteurs.

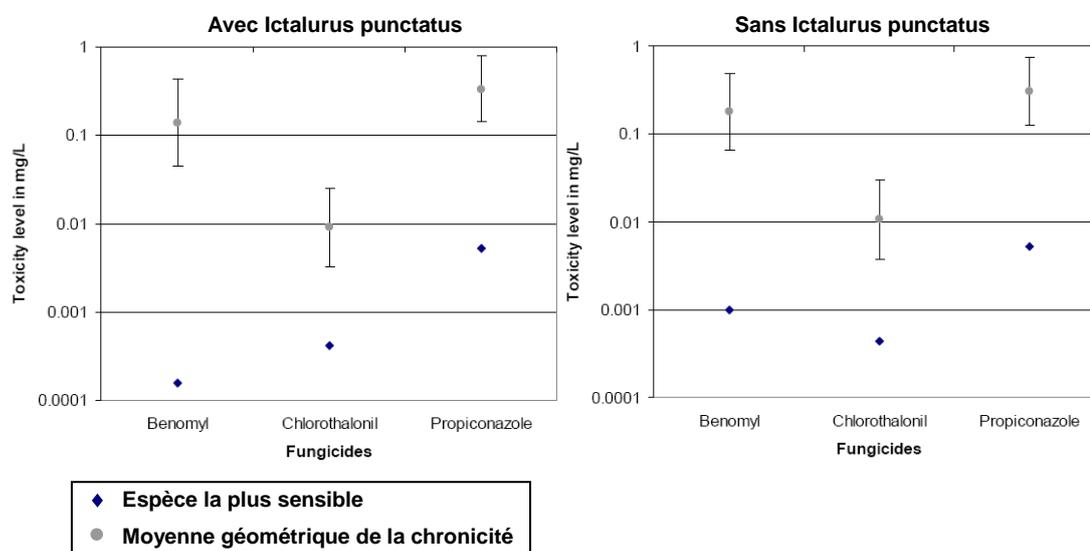


Figure 13 : Evaluation du niveau de toxicités de fongicides



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