



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Guide de bonnes pratiques pour l'arrêt des traitements en place (in situ)

Rapport final

BRGM/RP-71923-FR

Version 2 du 10 novembre 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

S. Colombano, D. Hubé, H. Léprond, avec la collaboration de C. Bazile

Vérificateur :

Nom : F. Lion

Fonction : Chef de projet

Date : 18/11/2022

Signature :

Approbateur :

Nom : C. Zornig

Fonction : Responsable de l'unité Sites,
Sols et Sédiments Pollués

Date : 12/12/2022

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Nota : ce document a été établi avec l'aide de représentants de bureaux d'étude et d'entreprises de travaux du domaine des Sites et Sols Pollués (SSP) et membres de l'UPDS (Union Professionnelle de la Dépollution des Sols) consultés dans le cadre de cette présente étude.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés : pollution, dépollution, traitement, in situ, rebond, retro-diffusion.

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

S. Colombano, D. Hubé, H. Léprond, avec la collaboration de C. Bazile (2022) – Guide de bonnes pratiques pour l'arrêt des traitements en place (in situ). Rapport final V2. BRGM/RP-71923-FR, 53 p.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-20/01/2022

Synthèse

Les opérations de traitement *in situ* représentent entre 40 et 50 % des opérations de dépollution actuellement menées dans le domaine des sites et sols pollués. Si ces techniques sont bien maîtrisées par les acteurs du domaine, l'arrêt de ce type de traitement est rendu délicat par différents phénomènes : effets rebonds, saturation résiduelle qui, s'ils ne sont pas bien gérés, peuvent induire un relargage diffus et rémanent de polluants après l'arrêt des traitements.

Afin de mieux gérer ces phénomènes, le BRGM a été à l'initiative d'un travail effectué pour le compte du Ministère en charge de l'Environnement visant à mieux cadrer les conditions de l'arrêt des traitements *in situ*. Cette étude a également été effectuée de façon collégiale avec la collaboration de différentes entreprises du domaine des sites et sols pollués qui ont contribué notamment à préciser les attentes des acteurs mais aussi à partager leur propre retour d'expérience sur ce sujet. Une DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) a également été consultée. Ce travail se base sur un retour d'expérience des entreprises opératrices consultées et des textes en vigueur au niveau français et des positions des pays confrontés, au niveau européen (Allemagne, Pays-Bas, Royaume-Uni) et états-unien, aux enjeux des opérations de dépollution *in situ* et de leurs conditions d'arrêt, au regard de la documentation disponible. Le présent rapport a donc, sur ces bases, pour enjeux et objectifs de proposer pour la France des lignes directrices pour décider de l'arrêt de ce type d'installations.

L'étude a montré :

1. qu'à l'heure actuelle, **aucun document n'existe au niveau français concernant les modalités d'arrêt des opérations de traitement *in situ*, ce qui se traduit par des pratiques hétérogènes et/ou un manque de visibilité sur les protocoles appliqués.** L'intérêt de l'étude est confirmé pour l'ensemble des acteurs quels qu'ils soient (administration, bureaux d'études, donneurs d'ordres ou entreprises de travaux) ;
2. **que si des bonnes pratiques générales pour faciliter l'arrêt de ce type de traitement peuvent être mises en avant, le principe de spécificité des sites prend toute sa pertinence dans ces contextes** (cf. méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués au sens des textes d'avril 2017) ;
3. **que l'arrêt d'un traitement *in situ* est d'autant plus simple que certains éléments fondamentaux sont connus et correctement réalisés :**
 - a. Caractérisation préalable fiable et la plus représentative possible de la pollution et de son étendue ;
 - b. Réalisation d'essais préalables en vue d'appréhender autant que possible certains phénomènes et de préciser le dimensionnement des installations. La mise en œuvre d'essais en laboratoire et surtout d'essais de terrain, préalablement aux opérations de dépollution, est recommandée (et se formaliser dans le cadre d'un Plan de Conception des Travaux (PCT)). Cette phase d'essais est particulièrement prégnante pour les traitements *in situ* ;

- c. Définition d'objectifs pertinents techniquement et en adéquation avec le traitement retenu et le contexte. Sur ce point, l'objectif d'acceptabilité des expositions résiduelles doit être privilégié plutôt que l'atteinte d'une CMA (Concentration Maximale Admissible) brute déconnectée d'une faisabilité technique ;
4. **que la durée du traitement doit être en adéquation avec les caractéristiques du site, les concentrations mesurées et le rendement épuratoire de la technique retenue.** Il convient de considérer un vaste ensemble de retours d'expérience et les variabilités dans le temps pour définir une durée de traitement, plutôt que d'avoir recours à un unique avis d'expert ;
5. **que la méthodologie de réception du traitement, donc de l'arrêt des installations doit être anticipée et discutée – autant que faire se peut – le plus en amont possible des travaux afin que chaque acteur puisse bien connaître et appréhender ces modalités du point de vue technique, financier et en terme de durée.** A ce titre, le marché doit intégrer toutes les sujétions nécessaires aux coûts liés à l'immobilisation éventuelle des installations mais aussi au déclenchement et à la réalisation des contrôles destinés à valider l'arrêt du traitement.

L'Arrêté Préfectoral qui encadre les travaux de dépollution in situ peut prévoir une clause spécifique concernant la durée de la surveillance en période de vigilance, qui s'appuiera sur des données techniques pertinentes. Le Préfet se réserve la possibilité de prescrire une durée de la période de vigilance lorsque les éléments techniques le permettent.

Trois critères sont plus particulièrement prépondérants pour assurer le succès d'une réception de travaux de dépollution *in situ* :

- **La durée.** La réception de traitements de ce type demande généralement du temps et valider un arrêt sur une seule campagne de contrôle n'est pas recommandé. De plus, pour les sites à enjeux, selon la technique utilisée et le ou les polluants visés, la mise en place d'une période de vigilance d'une durée généralement de plusieurs mois, à adapter au cas par cas selon les spécificités du site (un cycle hydrogéologique par exemple), est une bonne pratique même si celle-ci induit un coût supplémentaire aux travaux et/ou peut s'avérer en inadéquation avec certaines contraintes fortes de délais ;
- **La réalisation de plusieurs campagnes de prélèvements et d'analyses de contrôle avec un nombre de points suffisants et bien positionnés.** La réalisation de plusieurs campagnes synchrones effectuées à l'aide du même protocole de prélèvements et les mêmes méthodes analytiques est recommandée. De la même manière, il convient d'être particulièrement vigilant sur les méthodologies de mesure (échantillonnage, analyse...) et d'interprétation des résultats qui doivent être cohérentes avec celles utilisées en amont du chantier (notamment au niveau du Plan de Gestion). Cette approche permet de fiabiliser la comparaison entre l'état initial pré-travaux à l'état final post-travaux. Enfin, il s'agit aussi d'intégrer les incertitudes inhérentes à l'hétérogénéité du sol, aux méthodes analytiques ou à la sensibilité des équipements utilisés ;
- **La démonstration d'une diminution nette des concentrations initiales avec une stabilisation avec le temps des concentrations résiduelles.** L'atteinte d'une asymptote des concentrations, stable, sans effets rebonds, se maintenant sous les objectifs de réhabilitation doit être recherchée. Cette notion est indépendante de l'approche retenue (réduction de la masse de polluant et/ou atteinte d'une concentration résiduelle). Il s'agit de démontrer que le traitement a été efficace (sur tout ou partie de la zone traitée voire en aval) et surtout que la situation est durablement maîtrisée.

Sommaire

1. Objectifs et méthodologie.....	9
1.1. Enjeux et objectifs de l'étude	9
1.2. Recherches bibliographiques.....	10
1.3. Collecte des données et analyse des pratiques	11
1.4. Limites de l'étude	11
2. Enjeux associés et typologies d'approches rencontrées.....	13
2.1. Préambule.....	13
2.2. Caractérisation préalable de la pollution.....	13
2.3. Conception et réalisation des travaux.....	14
2.4. Définition des objectifs de dépollution.....	15
2.4.1. <i>La réduction de la masse ou d'un flux de polluants</i>	16
2.4.2. <i>L'atteinte d'une concentration résiduelle</i>	18
2.5. Les principaux phénomènes à prendre en considération	18
2.5.1. <i>Les effets rebonds</i>	18
2.5.2. <i>La diffusion</i>	21
2.5.3. <i>La saturation</i>	22
3. Recherche bibliographique et retour d'expérience étrangers.....	23
3.1. Position de la France	23
3.1.1. <i>Cadre et contexte</i>	23
3.1.2. <i>Bilan et conclusions</i>	25
3.2. Pays européens	25
3.2.1. <i>Royaume-Uni</i>	25
3.2.2. <i>Allemagne</i>	25
3.2.3. <i>Pays-Bas</i>	25
3.3. Le cas des Etats-Unis	26
4. Principes guidant l'arrêt d'un traitement <i>in situ</i>	29
4.1. Introduction	29
4.2. Méthodologies de vérification de l'atteinte des objectifs de dépollution.....	29
4.2.1. <i>Cas des modalités de réception de traitements par extraction</i>	30
4.2.2. <i>Cas des opérations de réception sur les traitements par destruction des polluants</i> 33	
4.2.3. <i>Modalités de prise en compte de l'hétérogénéité du sol</i>	34
4.3. Processus d'arrêt d'un traitement <i>in situ</i>	36
4.3.1. <i>Période d'observation</i>	37
4.3.2. <i>Période de vigilance</i>	38
4.3.3. <i>Surveillance post-travaux</i>	40
4.4. Recommandations relatives aux opérations de réception des travaux.....	40
4.5. Points clés dans l'arrêt d'un traitement <i>in situ</i>	41
5. Conclusion.....	45

Liste des figures

Figure 1 : Les trois grandes familles de stratégies de dépollution.	9
Figure 2 : Représentation d'un abattement global de masse (masse extraite) en fonction du temps. Exemple d'un traitement de sol pollué par les COHV par venting (SVE « Soil Vapour Extraction »).....	16
Figure 3 : Schéma de principe de l'atteinte d'une concentration résiduelle lors d'une opération de pompage traitement (P&T « Pump and Treat »).....	16
Figure 4 : Exemple de représentation d'un abattement de masse sur différentes aiguilles de traitement lors d'une opération de venting.....	17
Figure 5 : Schéma de principe de l'atteinte d'une concentration résiduelle lors d'une opération de pompage & traitement (P&T).	19
Figure 6 : Représentation d'équilibres entre certaines phases.....	20
Figure 7 : DNAPL à la saturation résiduelle dans un cône de dépression lors d'un pompage (source : S. COLOMBANO, 2020).....	22
Figure 8 : Exemple d'évolution des concentrations en TCE dans les eaux d'un piézomètre situé en aval immédiat d'une zone traitée par venting.	30
Figure 9 : Exemple d'évolution des flux massiques extraits (g/jour, en ordonnée) en fonction du temps pour un venting conduit selon un protocole en marche / arrêt (source : d'après LfU BADEN-WÜRTTEMBERG).....	32
Figure 10 : Logigramme représentant les principales étapes du processus d'arrêt d'une technique de traitement par extraction.	33
Figure 11 : Processus classique d'enchaînement des phases de travaux / traitement et de surveillance dans le cas d'un traitement in situ en contexte peu sensible.....	36
Figure 12 : Processus d'enchaînement des phases de travaux / traitement et de surveillance dans le cas d'un traitement in situ en contexte sensible.....	37

Liste des tableaux

Tableau 1 : Phénomènes susceptibles d'induire l'apparition d'effets rebonds.	21
---	----

Liste des annexes

Annexe 1 Recherches bibliographiques : cas des Etats-Unis	47
---	----

Liste des sigles et abréviations

ARR	Analyse des Risques Résiduels
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CERCLA	<i>Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act</i>
CMA	Concentration Maximale Admissible
COHV	Composés OrganoHalogénés Volatils
COT	Carbone Organique Total
DCE	Dossier de Consultation des Entreprises
DNAPL	<i>Dense Non Aqueous Phase Liquid</i>
EMP	Extraction MultiPhasique
EPA	<i>Environment Protection Agency (USA)</i>
ERI	Excès de Risque Individuel
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
IEM	Interprétation de l'Etat des Milieux
ISCO	<i>In Situ chemical oxidation</i>
ISCR	<i>In Situ Chemical Reduction</i>
ISTD	<i>In Situ Thermal Desorption</i>
ITRC	<i>Interstate Technology & Regulatory Council</i>
LNAPL	<i>Light Non Aqueous Phase Liquid</i>
MTBE	Methyl Tert-Butyl Ether
MTES	Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (actuel Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires)
NAPL	<i>Non Aqueous Phase Liquid</i>
NF	Norme Française
NICOLE	<i>Network for Industrially Co-ordinated Sustainable Land Management in Europe</i>
NJAC	<i>New Jersey Administrative Code</i>
PCT	Plan de Conception des Travaux
PG	Plan de Gestion
QD	Quotient de Danger
SSP	Sites et Sols Pollués
TCE	Trichloroéthylène
PCE	Perchloroéthylène (tétrachloroéthylène)
UPDS	Union des Professionnels de la Dépollution des Sites
VGAI	Valeur de Gestion de l'Air Intérieur
ZNS	Zone Non Saturée

1. Objectifs et méthodologie

1.1. ENJEUX ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Les méthodes de dépollution en place (*in situ*) sont fréquemment utilisées dans le domaine des Sites et Sols Pollués (SSP) pour assurer le traitement des sols, des eaux souterraines et/ou des gaz des sols. Selon les informations disponibles, elles représentent environ 40 à 50 % des techniques de dépollution employées dans le domaine (l'autre partie étant constituée par des techniques dites ex situ, s'appliquant après excavation ou pompage (extraction) des matrices polluées suivi d'un traitement sur site (on site) ou hors site en filière agréée (off site)).

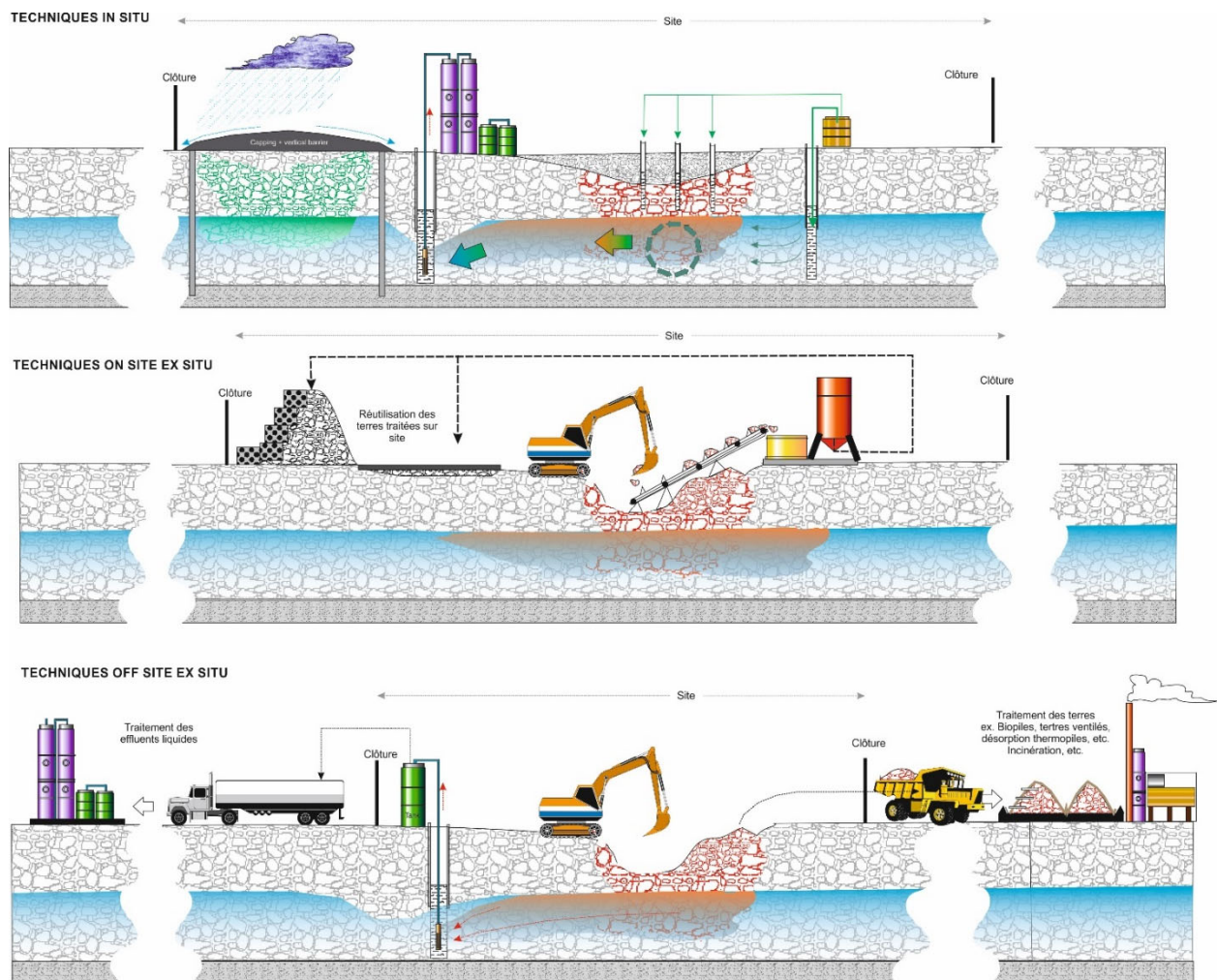


Figure 1 : Les trois grandes familles de stratégies de dépollution.

La question de l'arrêt des opérations de traitement *in situ* se pose et la réponse s'avère souvent complexe pour différentes raisons :

1. Difficulté d'atteinte des objectifs du fait d'une caractérisation préalable de la pollution insuffisante, inadaptée ou non pertinente (défaut de diagnostic) ;
2. Conception et/ou réalisation non adaptée des travaux et opérations de réhabilitation ;

3. Objectifs de réhabilitation mal définis (en décalage par rapport à la performance du traitement, durée prévisionnelle des travaux insuffisante, ...) ;
4. Modalités de réception mal définies ou moyens alloués insuffisants ;
5. Le cas échéant, mauvaise anticipation d'une possible survenue de différents phénomènes (effets rebonds, remobilisation, ...).

À l'heure actuelle, aucun document n'existe au niveau français concernant les modalités d'arrêt des installations de traitement *in situ*, ce qui se traduit par des pratiques hétérogènes ou un manque de visibilité sur les protocoles réellement appliqués. Les informations détaillées dans ce document ont ainsi vocation à être utiles aux différentes parties prenantes d'une opération de dépollution, parmi lesquelles :

- Les acteurs régaliens lors d'examen des documents qui lui sont soumis (notamment les Plans de Gestion (PG), Plans de Conception des Travaux (PCT), cahiers des charges, ...) ou pour l'encadrement de ce type de traitement ;
- Les donneurs d'ordre susceptibles de mettre en place ce type de traitement pour répondre à leurs problématiques ;
- Les prestataires et opérateurs (bureaux d'études et entreprises de travaux) pour mieux expliciter leur démarche auprès de leur client ainsi que pour conforter leurs études et travaux par un document servant de référence ;
- Les autres acteurs (associations, société civile, etc.) pour mieux comprendre les enjeux associés à ces techniques de traitement.

Le présent rapport a donc pour enjeux et objectifs d'étudier, sur la base notamment de retours d'expériences des pratiques sur une sélection de pays, les dispositions mises en place en terme d'encadrement et de bonnes pratiques pour une opération de traitement à l'aide de techniques *in situ* et de proposer, si possible, pour la France des lignes directrices pour décider de l'arrêt de ce type de traitement / d'installations.

Néanmoins, il convient dès à présent, de rappeler le **principe de spécificité** qui s'applique dans le domaine des SSP (§ 1.1 et §3.1.3 de la méthodologie de gestion des SSP du Ministère en charge de l'environnement au sens des textes d'avril 2017) et qu'il convient de prendre en compte dans ce type de situations car des ajustements ou adaptations sont rendus nécessaires par différents paramètres (matrices présentes, substances mises en jeu, types de traitement réalisés, ...). Il serait ainsi illusoire de vouloir fixer un protocole rigide et générique applicable à tous les contextes et toutes les techniques mises en œuvre (qui répondent à des problématiques spécifiques au cas par cas).

1.2. RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

Le BRGM a effectué des recherches sur les conditions d'arrêt des opérations de traitement *in situ* dans les pays suivants :

- La France ;
- L'Allemagne ;
- Les Pays-Bas ;
- Le Royaume-Uni ;
- Les États-Unis.

Il s'agit de pays industrialisés qui possèdent un passif environnemental, pour lesquels de la documentation est accessible sur le plan linguistique (en français ou en anglais). Ces pays sont confrontés à des problématiques de gestion des SSP et sont ainsi susceptibles de mettre en œuvre des traitements *in situ*.

1.3. COLLECTE DES DONNEES ET ANALYSE DES PRATIQUES

Cette revue bibliographique s'est focalisée sur les techniques in-situ uniquement (cf. § 1.4). Elle a permis de collecter un certain nombre d'informations portant sur :

- Les dispositions législatives, réglementaires, et normatives en vigueur dans ces pays ;
- Les éventuels documents de cadrage ;
- Une première approche de la littérature scientifique.

Pour compléter cette approche bibliographique, des personnes ressources des entités concernées (par exemple via le COMMON FORUM¹) ont été sollicitées au travers d'un questionnaire permettant d'appréhender leurs pratiques respectives.

1.4. LIMITES DE L'ETUDE

Le présent document s'attache spécifiquement aux opérations de traitement en place (*in situ*), s'agissant de la catégorie de traitements pour laquelle les conditions d'arrêt apparaissent les plus complexes, hétérogènes dans les pratiques des opérateurs et peu documentées. Les phénomènes en jeu induisant cette complexité pour les opérations *in situ* restent à la marge lors des traitements des matrices polluées on site, qui ne font pas l'objet d'un développement spécifique dans le cadre du présent document.

La présente étude a été menée sur un petit échantillon de pays, confrontés aux problématiques des SSP et jugés comme représentatifs de l'ensemble des dispositions et pratiques mises en place à travers le monde. L'idée principale n'est pas de faire un état des lieux le plus exhaustif possible des pratiques à l'international, mais bien d'en analyser et d'en expertiser un certain nombre afin de s'inspirer des éventuelles bonnes pratiques existantes.

L'accès aux informations étant différents d'un pays à l'autre, la comparaison des réponses n'a pu être effectuée sur tous les critères d'évaluation considérés dans la présente étude. Cette étude a donc été menée avec les informations mises à disposition du BRGM (site internet des pays/régions concernés, accès à des rapports d'études...) au moment des recherches.

L'un des principaux résultats de cette recherche est de constater que la majorité des pays retenus pour l'étude ne disposent pas de documents de cadrage, de guides ou de dispositions réglementaires relatifs à l'arrêt et au retrait des installations de traitement *in situ* en fin de travaux.

¹ <https://www.commonforum.eu/>

2. Enjeux associés et typologies d'approches rencontrées

2.1. PREAMBULE

Les principaux avantages à l'emploi des techniques de traitement en place (*in situ*) sont de deux ordres :

- D'une part, d'éviter ou tout du moins limiter l'envoi des terres et eaux polluées vers des installations dédiées au traitement et au stockage de ces terres et localisées à l'extérieur du site et,
- D'autre part limiter l'impact carbone résultant du transport des matériaux.

Le recours aux techniques *in situ* s'impose dès lors que les sols sont inaccessibles pour une éventuelle excavation / extraction des milieux à traiter (en présence d'installations ou superstructures devant être conservées, situation fréquemment rencontrée sur des sites industriels encore en activité) ou qu'une telle opération s'avère techniquement et/ou économiquement trop complexe ou risquée à mener.

En revanche, le recours à ces techniques suppose de bien appréhender différents aspects qui seront détaillés dans les paragraphes suivants :

1. Une caractérisation qualitative et quantitative préalable fiable, souvent précise de la pollution dans son environnement géologique et hydrogéologique ;
2. La conception et la réalisation des travaux de réhabilitation ;
3. La définition des objectifs de réhabilitation ;
4. Les modalités de réception (cet aspect est traité spécifiquement au § 4.4) ;
5. L'anticipation de différents phénomènes susceptibles de modifier l'évolution spatiale et temporelle des pollutions visées par les opérations de traitement (effets rebonds, remobilisation, ...).

2.2. CARACTERISATION PREALABLE DE LA POLLUTION

Conformément au § 3.2 de la méthodologie nationale de gestion des SSP du MTES d'avril 2017, le site comme la pollution doivent avoir été correctement caractérisés par le biais de diagnostics avant d'envisager la mise en œuvre des traitements. La phase d'étude doit ainsi être suffisamment détaillée pour permettre non pas seulement d'identifier une zone polluée mais de la caractériser spatialement (la zone à traiter doit être circonscrite le plus possible) ainsi qu'en termes de matrices impliquées et des caractéristiques des substances présentes. La prise en compte d'effets collatéraux liés à la présence de différents types de polluants et/ou à la nature du sol et/ou à la présence de chemins préférentiels est nécessaire (exemples : présence simultanée d'hydrocarbures et de solvants chlorés, présence de couches argileuses susceptibles de relarguer des composés à l'issue du traitement, présence de puits perdus, ...).

Sans préjudice du contenu du diagnostic mis en œuvre, les paramètres qui suivent s'avèrent souvent pertinents dans la caractérisation du site et de sa pollution :

- **Caractéristiques des polluants** : natures, cortèges en présence, teneurs, pressions de vapeur saturante, mobilités (solubilités, volatilités, viscosités, densités...), âge...
- **Caractérisation du sol** : granulométrie, texture et structure du sol, teneur en eau, en matière organique et en argile, pH, salinité, perméabilité, homogénéité, caractérisation des communautés bactériennes, ...
- **Caractérisation de la nappe** : piézométrie et fluctuations spatiales et temporelles des niveaux d'eau, bilan ionique, polluant ou cortège de polluants en présence, paramètres physico-chimiques (pH, O₂, température, conductivité, potentiel redox), caractérisation des communautés bactériennes, ...

La présence potentielle de phase libre organique non miscible (LNAPL ou DNAPL²) doit également avoir été vérifiée (observation visuelle, détection par des sondes à interface, suspicion de présence du fait des concentrations / teneurs en polluants adsorbés/dissous mesurées, calculs d'équilibre de phase, ...).

Conformément à la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués (cf. §.3.2.1), l'évaluation du bilan massique est fortement recommandée dans le cas de la mise en œuvre de traitement *in situ* car la définition des objectifs de réhabilitation s'appuie souvent et en grande partie sur les résultats de ce bilan (notamment préalablement à la mise en œuvre de techniques d'extraction).

2.3. CONCEPTION ET REALISATION DES TRAVAUX

Au-delà du Plan de Gestion, le recours à des essais en laboratoire (prestation B111 dans la norme NF X 31-620-3) et/ou sur le terrain (prestation B112) est recommandé pour les techniques *in situ* (cf. §.3.3.2 du guide relatif au Plan de Conception des Travaux (PCT) d'octobre 2019). Les essais pilotes in-situ (communément réalisés sur quelques jours à quelques semaines et sur une faible emprise) permettent d'approcher par extrapolation temporelle et à petite échelle spatiale les abattements attendus pour le traitement à l'échelle 1 (au bémol près des hétérogénéités en place). Si ces essais à petite échelle peuvent être poursuivis sur des durées plus longues (plusieurs semaines à plusieurs mois en fonction des mécanismes mis en œuvre par la technique de traitement), il est envisageable de déterminer les performances du traitement telles que la durée et les teneurs résiduelles.

Une bonne vision de l'extension spatiale de la pollution et des caractéristiques du site vont permettre de pouvoir prévoir les caractéristiques et le dimensionnement des procédés³ mais aussi de mieux appréhender le risque d'apparition d'effet rebond⁴ lorsque celui-ci est prégnant.

² Acronymes anglo-saxons : LNAPL « Light Non Aqueous Phase Liquid » ou phase non miscible flottante, DNAPL « Dense Non Aqueous Phase Liquid » ou phase non miscible plongeante.

³ Pour tenir compte des techniques de traitement où le dimensionnement est en partie basé sur une quantité de réactif à mettre en œuvre.

⁴ Il s'agit du phénomène qui peut être défini comme suit : effet observé suite à l'arrêt d'un traitement qui, par le rétablissement des équilibres de phase en conditions statiques, conduit à une ré-augmentation des concentrations dans les phases fluides au-delà des concentrations mesurées en conditions dynamiques (période de traitement actif).

La phase de conception a vocation à 1) valider ou invalider les choix théoriques avancés au terme du Plan de Gestion 2) fournir des éléments de dimensionnement pour les travaux ultérieurs et 3) identifier les meilleures voies et perspectives d'optimisation des technologies retenues. Les travaux ont alors pour objectif de traduire et compléter les résultats de la phase de conception afin d'assurer une mise en œuvre concrète sur le terrain. Il convient, dès lors que la technique sélectionnée soit adaptée au contexte, que la densité de points de traitement soit suffisante au regard de la zone à traiter et que le délai de traitement soit suffisant (par exemple, en fonction du rendement espéré de la technique mise en œuvre, en fonction de cinétiques de dégradation, ...).

2.4. DEFINITION DES OBJECTIFS DE DEPOLLUTION

Trois principales approches sont identifiées pour définir un objectif de réhabilitation :

- La réduction de la masse (ou du flux) de polluants ;
- L'atteinte d'une concentration / teneur résiduelle issue d'un objectif de qualité des milieux ou validée par des calculs de risques ;

Ces approches globales peuvent ensuite comporter des points communs dans les indicateurs utilisés (par exemple, l'observation d'une asymptote de concentrations). Les asymptotes sont par exemple des courbes de décroissance des concentrations ou de croissance des masses extraites en fonction du temps qui se rapprochent d'une limite sans la rencontrer (cf. Figure 2 et Figure 3). Au-delà de cette observation d'une stabilisation d'une situation, il s'agit d'en comprendre les causes et de décider des suites à donner (arrêt du traitement versus poursuite sous quelles conditions ?).

L'observation d'une asymptote peut résulter de différents cas de figure, parmi lesquels :

- L'atteinte de la limite technique du traitement mis en place, dans l'absolu, ou liée à d'autres facteurs comme les caractéristiques de la zone à traiter ou des polluants en eux-mêmes ;
- La maîtrise dans la durée d'une situation.

En revanche, dans tous les cas, quelle que soit l'approche retenue pour définir un objectif de réhabilitation, la réalisation d'une ARR (Analyse des Risques Résiduels) de fin de travaux menée sur la base des concentrations / teneurs en substances polluantes mesurées sur le site à la fin du traitement est indispensable pour apprécier l'acceptabilité sanitaire des expositions aux pollutions résiduelles (cf. §3.6.2 de la méthodologie nationale du MTES au sens des textes d'avril 2017). Ces évolutions asymptotiques sont illustrées par les graphiques de la Figure 2 et de la Figure 3 ci-après.

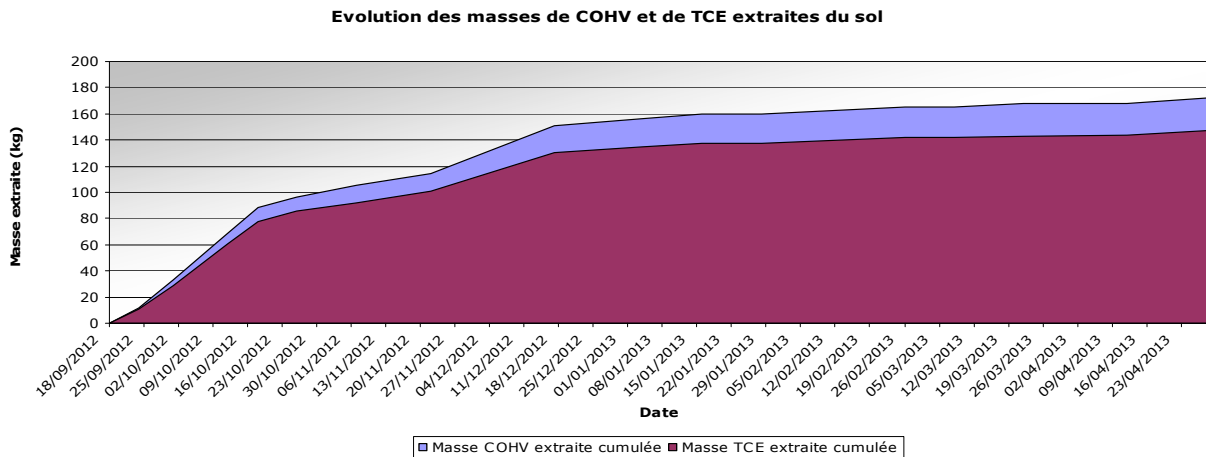


Figure 2 : Représentation d'un abattement global de masse (masse extraite) en fonction du temps. Exemple d'un traitement de sol pollué par les COHV par venting (SVE « Soil Vapour Extraction »).

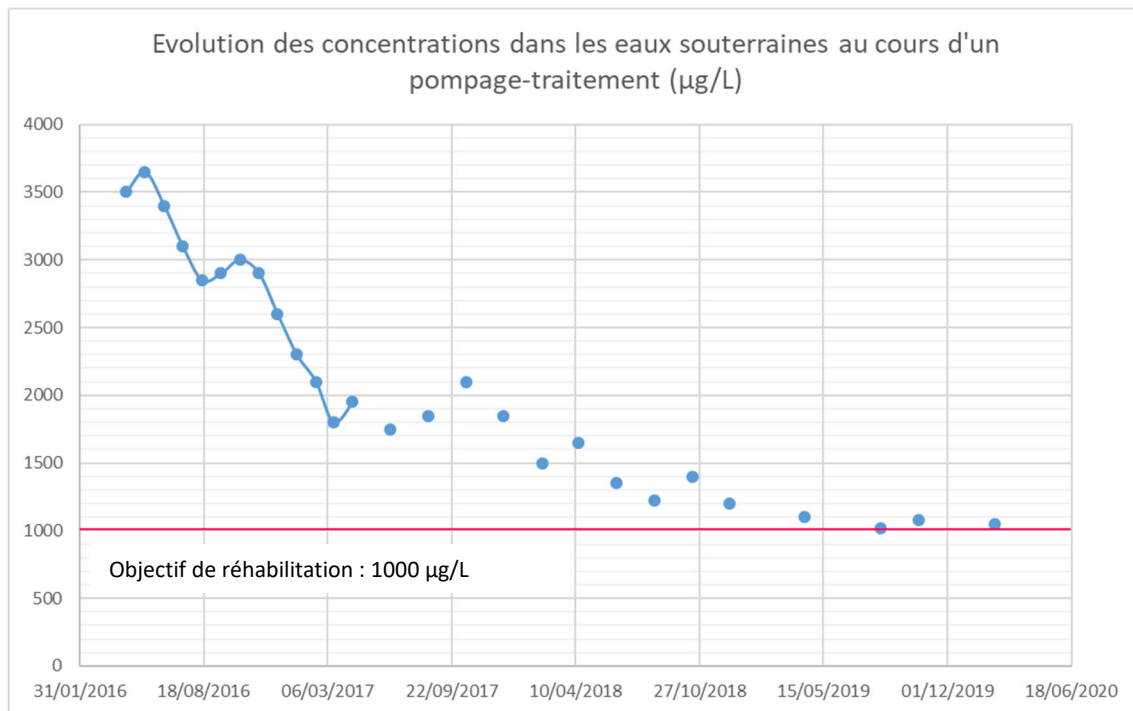


Figure 3 : Schéma de principe de l'atteinte d'une concentration résiduelle lors d'une opération de pompage traitement (P&T « Pump and Treat »).

2.4.1. La réduction de la masse ou d'un flux de polluants

Cette méthode est, en général, déconnectée des enjeux sanitaires. Elle est, entre autre, utilisée dans le cas des traitements visant à réduire la masse de polluants (exemples : diminution des teneurs en hydrocarbures lors d'une opération de traitement des terres par bioterre où l'objectif est de traiter la fraction disponible / bioaccessible de la pollution, ou technique de venting qui vise à extraire de la zone non saturée et traiter les polluants volatils susceptibles d'induire des risques sanitaires liés aux remontées de vapeurs) ou alors à diminuer sensiblement un flux de pollution susceptible de migrer (exemple dans le cas de la mise en sécurité par des techniques de confinement, de stabilisation, de lessivage, ...).

L'objectif principal de cette approche est de diminuer la masse présente de polluant dans l'environnement afin de réduire ses effets. Les ratios classiquement constatés et attendus dans le domaine de la dépollution sont généralement de 60 à 80 % de la masse totale de polluants. Dans certains contextes, ce ratio est plus élevé, pouvant atteindre plus de 95 %. Il est à noter que le pourcentage d'abattement (masse retirée versus masse totale initiale) est dépendant de l'état initial considéré. Ainsi, si les concentrations initiales sont faibles, il est alors plus difficile d'avoir un pourcentage d'abattement important. L'atteinte de la limite de la technique employée est plus proche et donc l'efficacité du traitement diminue. Les essais de faisabilité réalisés en amont du traitement ont la vocation de préciser ces limites.

De la même manière, il faut rappeler que généralement un bilan massique est plus facile à réaliser au droit d'une zone de pollution concentrée (fortes teneurs sur une surface géographique restreinte). Lorsque le traitement vise un panache de polluant ou une pollution diffuse, la mise en œuvre d'un bilan massique peut alors s'avérer plus difficile, complexe, chronophage et coûteuse (très bonne maîtrise de la dynamique des écoulements souterrains, impliquant un grand nombre d'ouvrages de suivis et un suivi temporel, ...).

Le respect des objectifs peut consister en l'atteinte d'une asymptote de concentrations résiduelles ou d'un bilan de masse de la pollution récupérée. Dans les deux cas, l'atteinte de l'asymptote est très dépendante du dimensionnement du traitement et correspond davantage à sa limite technique compte-tenu de ses conditions de mise en œuvre. Ainsi, la courbe peut être modifiée soit en modifiant différents paramètres de l'installation, soit en appliquant un traitement complémentaire, soit en changeant de techniques / stratégies de dépollution. Le principal inconvénient est que l'observation d'une asymptote peut s'avérer chronophage selon le contexte et nécessite de multiplier les campagnes de contrôle pour construire la courbe.

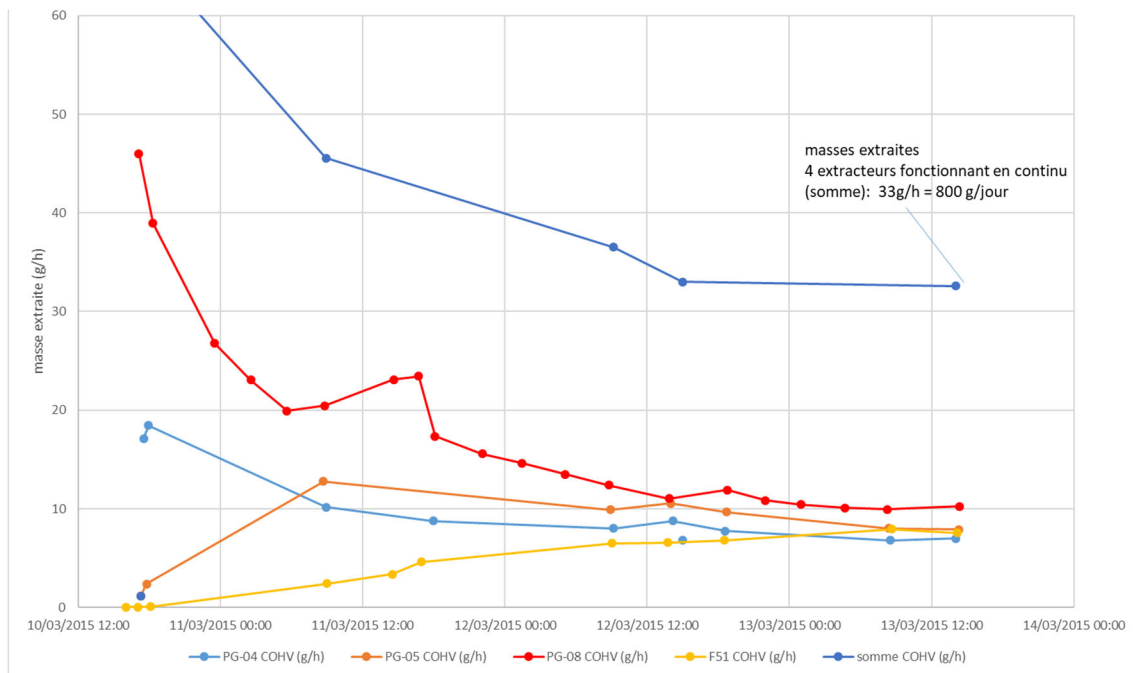


Figure 4 : Exemple de représentation d'un abattement de masse sur différentes aiguilles de traitement lors d'une opération de venting.

2.4.2. L'atteinte d'une concentration résiduelle

Assez facile à mettre en œuvre, l'usage d'une concentration résiduelle fixe (ou Concentration Maximale Admissible ou CMA) est également rencontré dans le domaine des sites et sols pollués. Ainsi, à la réception des travaux, l'objectif du traitement est alors d'atteindre cette valeur ou ce jeu de valeurs dans les milieux considérés (sols, eaux souterraines, gaz du sol) sur chaque point de contrôle avec ou sans variabilité. Par exemple, à titre indicatif, une certaine variabilité peut être tolérée sur tout ou partie des points de contrôle. Cette variabilité est à mettre en regard des incertitudes inhérentes au domaine (hétérogénéité spatiale, incertitudes analytiques, ...).

Cette approche est généralement plus contraignante que la précédente pour la conception et la mise en œuvre des travaux et est directement en lien soit avec un calcul de risque sanitaire, soit avec une valeur réglementaire ou à portée réglementaire (exemple des normes de potabilité, des VGAI (Valeur Guide pour l'Air Intérieur), ...).

Cette approche, qui peut paraître très rassurante et confortable pour un donneur d'ordre, présente toutefois deux inconvénients majeurs en entrée et en sortie de traitement :

- **A la conception des travaux**, elle peut conduire à définir des objectifs de réhabilitation qui sont techniquement inatteignables. Ainsi, retenir comme objectif de traitement une CMA correspondant, par exemple, à une limite de quantification ou ne tenant pas compte des incertitudes inhérentes au domaine (prélèvements, méthodes d'analyse, ...) peut ne pas être pertinent au regard du traitement mis en œuvre (délai, performance, ...). Le cas échéant, la faisabilité de l'atteinte d'une telle valeur doit être validée au préalable par un test de laboratoire et/ou un essai pilote de terrain ;
- **A la réception des travaux**, l'atteinte stricte d'une CMA pour une substance doit être absolument pondérée par les résultats de l'ARR. En effet, les traitements agissent sur plusieurs substances en même temps mais avec des rendements différents. La reprise des calculs de risque permet en général de démontrer que les objectifs sanitaires sont respectés même si la CMA initialement calculée pour une substance tirant le risque n'est pas atteinte.

Comme pour la réduction de la masse ou d'un flux de polluant, l'atteinte d'une asymptote de concentrations résiduelles peut également être demandée. Cette approche est plus souple que l'atteinte *sensu stricto* d'une CMA mais est régulièrement suffisante dans de nombreux contextes. Elle peut permettre aussi de tenir compte de certaines incertitudes (méthodes analytiques notamment).

2.5. LES PRINCIPAUX PHENOMENES A PRENDRE EN CONSIDERATION

2.5.1. Les effets rebonds

Définition

L'« effet rebond » est un effet observé suite à l'arrêt d'un traitement qui, par le rétablissement des équilibres de phase en conditions statiques, conduit à une ré-augmentation des concentrations dans les phases fluides au-delà des concentrations mesurées en conditions dynamiques (période de traitement actif) (cf. Figure 5). Il correspond à une hausse des concentrations d'un polluant donné dans un milieu donné, observée après l'arrêt d'un traitement. Cette augmentation est due à la remobilisation de la pollution encore présente à l'arrêt du traitement dans des zones de faibles perméabilités, les zones peu ou pas sollicitées par le

traitement, ou dans des zones où les polluants sont restés piégés (co-solvance⁵). Plus précisément, la remobilisation s'explique par la dissolution des précipités (pour les composés inorganiques) ou des NAPL (*Non Aqueous Phase Liquid*), la désorption depuis la phase solide et la remise en écoulement de la phase libre. Ce phénomène de remobilisation des polluants, qu'ils soient organiques ou inorganiques, est désigné par le terme anglo-saxon de « *back diffusion* » (littéralement « rétrodiffusion »).

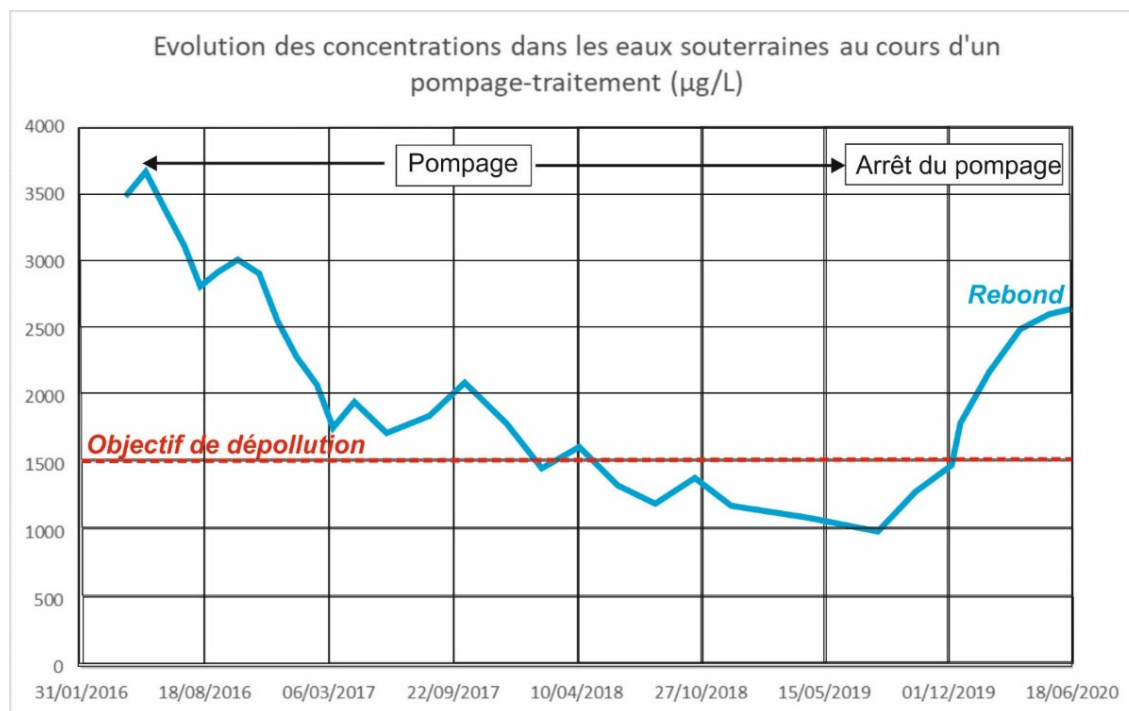


Figure 5 : Schéma de principe de l'atteinte d'une concentration résiduelle lors d'une opération de pompage & traitement (P&T).

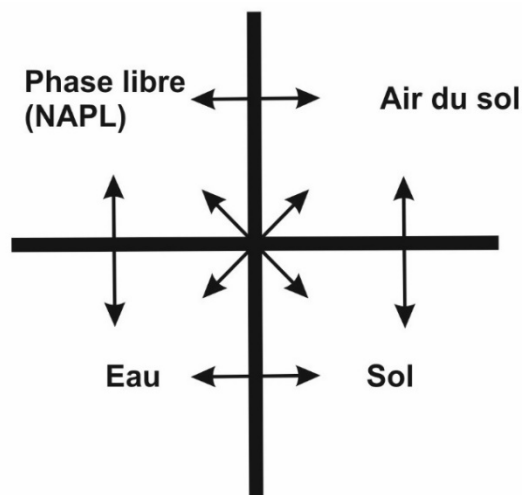
Certaines techniques de dépollution *in situ* sont réputées sujettes à des effets rebonds (oxydation, venting, air-sparging, pompage-traitement, pompage-écrémage, ...). L'arrêt de certains traitements peut parfois engendrer l'apparition de phénomènes d'effets rebonds qui induisent un relargage diffus des polluants et rémanent pendant plusieurs années. Dans la mesure du possible, ce phénomène se doit d'être anticipé et mieux encadré afin d'éviter une dégradation de la qualité du milieu traité par la réapparition non maîtrisée des polluants (à des concentrations incompatibles avec les objectifs de réhabilitation). Le site internet de présélection des techniques de dépollution SELECDEPOL (www.selecdepol.fr) rassemble les préconisations et points d'attention relatifs à chaque technique.

Remarque : concernant l'effet rebond, il est également indispensable d'avoir une bonne connaissance du contexte et de l'environnement direct de la zone à traiter et notamment de la présence d'éventuelles sources de pollution qui pourraient avoir une influence sur la pérennité du respect des objectifs de réhabilitation (poche de pollution qui aurait échappé au diagnostic, source en amont hydraulique sur ou hors site).

⁵ Solubilisation d'une phase organique polluante par une autre ; exemple des solvants chlorés et des hydrocarbures.

Description

Le phénomène de rebond trouve son origine dans les mécanismes de diffusion dans des terrains présentant des variations et anisotropies de l'encaissant hydrogéologique (c'est-à-dire de la conductivité hydraulique (perméabilité à l'eau)), de la teneur en matière organique, ou de la distribution des polluants sous diverses formes physiques (NAPL ou précipités versus dissous, gazeux ou sorbés). Plus précisément, l'effet rebond peut être une conséquence directe et mesurable des mécanismes de rétrodiffusion couplés aux phénomènes de transferts de phase (dissolution, volatilisation, désorption) ou des remobilisations par l'évolution temporelle des conditions. A titre d'exemple, la Figure 6 illustre les équilibres qui régissent les différentes phases.



D'après Mariner P.E., Jin M., Jackson R.E., 1997. An algorithm for the Estimation of NAPL Saturation and Composition from Typical Soil Chemical Analyses. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 3:122-129

Figure 6 : Représentation d'équilibres entre certaines phases.

En effet, les traitements génèrent des déséquilibres de phases (ou la mise en place de pseudo-équilibres) selon la matrice qui est traitée (par exemple : les eaux souterraines dans le cas du pompage/traitement et les gaz des sols dans le cas du venting ...).

Lors de l'arrêt des traitements, un rééquilibrage des phases se produit (par solubilisation, désorption ou volatilisation). Il est donc constaté une augmentation des concentrations en polluants dans les différentes phases. Ces effets rebonds, d'intensités et de durées très variables, restent difficiles à anticiper et à estimer au moment du démarrage des procédés de traitement. Ces effets peuvent également conduire à de nouveaux dépassements des objectifs de réhabilitation alors que les installations de traitement ont été démobolisées voire que la réception des travaux a été actée. Compte tenu des enjeux sous tendus par ce phénomène de rebond (persistance de pollutions en phase dissoute, difficultés d'atteinte des objectifs de réhabilitation dans les eaux souterraines et/ou les gaz du sol, ...), de très nombreux travaux de recherche lui ont été consacrés. Ces travaux concernent à la fois des polluants organiques en phase dissoute (HAP, COHV ou encore le MTBE) mais aussi les polluants inorganiques (par exemple : les ions perchlorates (ClO_4^-), ...). La complexité du phénomène est liée à son caractère multifactoriel (matrice étudiée, méthode de dépollution employée, caractéristiques du site, ...). Ainsi, une attention particulière doit être portée lors de la phase d'étude du site, afin d'appréhender le risque d'un effet rebond et donc d'adapter les traitements mis en place pour le limiter, le maîtriser et le gérer. Le Tableau 1 suivant présente les principaux phénomènes susceptibles de conduire à l'apparition d'effets rebonds.

Phénomènes entrant en jeu	Origines du phénomène
Saturation en NAPL	<ul style="list-style-type: none"> • Battements de nappe ; • Augmentation de la surface de contact (passage d'une phase libre continue à une phase libre discontinue).
Diffusion couplée aux mécanismes de transfert de masse	<ul style="list-style-type: none"> • Relargage de polluants à partir des zones de faibles perméabilités ou de zones contenant encore de la masse de polluant après l'arrêt du traitement.
Cinétiques de dégradation (biologique ou chimique)	<ul style="list-style-type: none"> • Injection (de produits chimiques et/ou d'agents biologiques) insuffisante en termes de durée et/ou de masse.
Mécanismes sélectifs des mélanges	<ul style="list-style-type: none"> • Caractéristiques physico-chimiques distinctes des polluants conduisant à un rendement épuratoire différent.

Tableau 1 : Phénomènes susceptibles d'induire l'apparition d'effets rebonds.

2.5.2. La diffusion

Pour les eaux souterraines, la diffusion est reconnue comme étant le processus régissant la persistance d'un panache de pollution post-traitement. Lors de la mise en place d'une pollution dans un environnement hydrogéologique hétérogène, anisotrope, un gradient de concentrations est généré entre les zones de perméabilité élevée, où les polluants migrent puis s'accumulent préférentiellement et les zones de perméabilité plus faible de l'aquifère. Ce gradient induit un flux de composés mu par diffusion provoquant ainsi l'envahissement progressif par les polluants des couches peu perméables (« *Forward-Diffusion* »). Lorsque la masse de pollution se réduit dans les horizons les plus perméables, en raison de processus naturels d'épuisement ou d'opérations de traitement, la concentration du polluant dissous y diminue contrairement à celle présente dans les horizons de perméabilités moindre ; c'est ainsi que le gradient de concentration s'inverse. Les polluants précédemment emmagasinés dans les niveaux de faible perméabilité peuvent ainsi être progressivement libérés dans les horizons où s'effectuent les écoulements par le processus dit de "*Back-Diffusion*" (littéralement « rétrodiffusion »). Cette libération va alors provoquer l'apparition d'un panache résiduel qui peut augmenter considérablement le délai de traitement de la zone polluée. Des phénomènes similaires concernent les polluants en phase vapeur présents dans les gaz du sol de la Zone Non Saturée (ZNS).

D'après la littérature scientifique⁶, ce phénomène de rétrodiffusion est plus particulièrement rencontré au sein du milieu aquifère :

- De par la présence de NAPL dans les aquifères, créant des panaches persistants composés de substances en phase dissoute ;
- Une persistance de la diffusion hors des zones à faible perméabilité rencontrées dans l'aquifère, même lorsque la source de pollution a été éliminée.

Néanmoins, une remobilisation des polluants peut tout à fait intervenir en zone non saturée, par simple remontée de la nappe.

⁶ TATTI et al., 2018 : "Contaminant back-diffusion from low-permeability layers as affected by groundwater velocity: A laboratory investigation by box model and image analysis "

2.5.3. La saturation

Lors de la migration gravitaire (sous l'effet de la densité) d'une phase libre organique et cohérente (LNAPL et DNAPL), plusieurs forces s'opposent à son déplacement : 1) les forces capillaires, 2) la tension de surface ou la tension interfaciale (imposant une force minimale de pénétration interporale), et 3) la viscosité. Une fraction de la phase mobile est donc retenue sur la trajectoire de sa migration. Il en résulte deux conséquences :

- 1) Une imprégnation résiduelle de phase organique dispersée (par exemple, sous forme de ganglions, de gouttelettes ou d'émulsion) et immobile (à saturation dite résiduelle) sur la trajectoire du produit ;
- 2) La réduction de la masse de la phase libre et mobile au fur et à mesure de sa progression gravitaire (en absence de réalimentation).

Il est à noter que le passage d'une phase libre continue et mobile à une phase libre discontinue voire immobile est à surveiller avec beaucoup d'attention. En effet, cette situation se traduit par une augmentation de la surface d'échange et est souvent à l'origine d'augmentations de concentrations de la substance en question dans les eaux et/ou les gaz. La Figure 7 présente une illustration de DNAPL de type chloré pendant une phase de pompage. Le DNAPL est présent à l'état de saturation résiduelle (ganglions de DNAPL piégés entre les billes de verre) dans le cône de dépression.

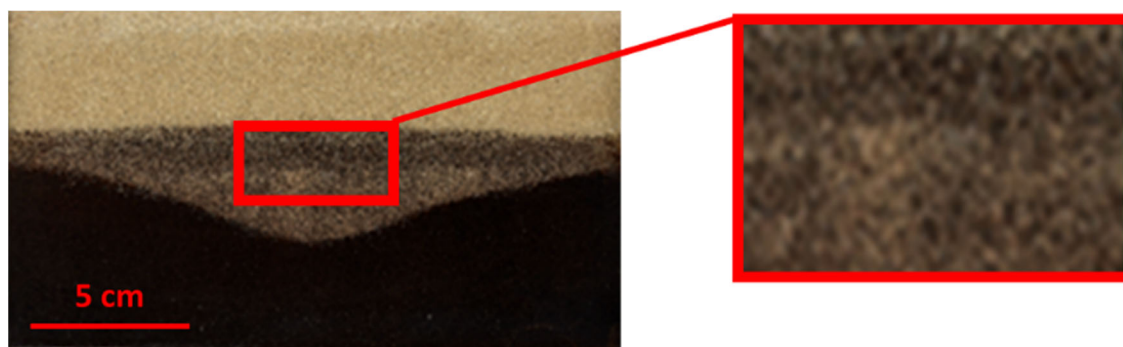


Figure 7 : DNAPL à la saturation résiduelle dans un cône de dépression lors d'un pompage (source : S. COLOMBANO, 2020).

Hors convection forcée (par exemple, sous l'action d'un pompage), la migration s'arrête lorsque la masse de produit ne permet plus d'atteindre une saturation supérieure à la saturation résiduelle (avec rupture de la continuité physique de la phase), et/ou lorsque les forces gravitaires ne contrebalancent plus les forces de passage interporal et/ou la succion capillaire. La phase libre est alors bloquée et dispersée dans le sol à saturation résiduelle.

3. Recherche bibliographique et retour d'expérience étrangers

3.1. POSITION DE LA FRANCE

3.1.1. Cadre et contexte

Cadre législatif et réglementaire

En France, la gestion des sites et sols pollués est définie à l'article L.241-1 du code de l'Environnement et s'appuie en grande partie sur la réglementation applicable aux ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement). Lors d'une cessation d'activité d'ICPE, la réglementation impose qu' « *Au vu notamment du mémoire de réhabilitation, le préfet détermine [...] les travaux de réhabilitation, les mesures de surveillance des milieux et les restrictions d'usages nécessaires pendant la durée desdits travaux. Ces prescriptions sont fixées compte tenu, du ou des usages déterminés et de l'efficacité des techniques de réhabilitation dans des conditions économiquement acceptables au regard d'un bilan des coûts et avantages* » (articles R.512-39-3. II ou R.512-46-27. II du Code de l'Environnement).

Les mesures de surveillance permettent notamment de valider l'efficacité des méthodes choisies dans le processus de dépollution et de suivre l'évolution des différents paramètres à l'issue de celui-ci. Du fait de l'absence de seuils de dépollution définis de façon uniforme sur l'ensemble du territoire, les services de l'État se basent sur les résultats faisant suite aux travaux de dépollution, transmis par l'exploitant.

Documents de cadrage

- Méthodologie nationale en matière de gestion des Sites et Sols Pollués (SSP)

La circulaire du Ministère de l'Ecologie du 8 février 2007 précisait : « *lorsqu'une surveillance environnementale est en place il est recommandé de procéder à des bilans des résultats de cette surveillance, par exemple tous les quatre ans. Il ne s'agit en aucune manière de modifier les modalités de la surveillance déjà en place pour les ramener à une fréquence quadriennale, mais bien d'analyser et d'exploiter régulièrement les résultats de la surveillance environnementale lorsqu'elle est requise et en place, pour l'adapter aux évolutions constatées.* ». De là, a été introduit le principe de « bilan quadriennal ». Cette surveillance permet en particulier de suivre l'évolution de l'état environnemental des eaux souterraines consécutivement à l'arrêt d'opération de dépollution, sur les courts et moyens termes. Le retour d'expérience acquis avec les bilans quadriennaux sur la période 2007-2017 a montré le caractère évolutif des concentrations en polluants dans les nappes aux termes des opérations de dépollution.

En 2017 (texte du 19 avril 2017 du Ministère de l'Ecologie), une version actualisée de la méthodologie nationale SSP a ainsi introduit la notion « *d'effet rebond* » (cf. §3.6.2 et §5.4.2) et précise respectivement que :

« *Avant de prononcer l'arrêt et le repli des installations, il apparaît nécessaire de tenir compte des « effets rebond ». En effet, sur certains sites et pour certaines familles de polluants, après l'arrêt du traitement, des augmentations des concentrations peuvent être constatées nécessitant une poursuite temporaire du traitement jusqu'à la stabilisation définitive des concentrations résiduelles* ».

« Les opérations de réception peuvent aussi intégrer un phasage permettant de prendre en compte les effets rebonds à la fin des travaux (par exemple avant le repli du matériel...) ».

- La série de normes NF X 31-620, version de décembre 2021

La norme NF X 31-620 qui décrit les prestations de services relatives aux sites et sols pollués fournit les exigences que les prestataires du domaine des SSP s'engagent à respecter lors de leurs prestations. La partie 4 de la norme NF X 31-620 (cf. §6.3.2 relatif aux prestations élémentaires des techniques de dépollution) mentionne les effets rebond en ces termes: « *Les effets rebonds doivent être pris en compte dans le livrable si cela est prévu dans le cadre du contrat passé entre le prestataire en charge de l'exécution des travaux et son donneur d'ordre* ». Néanmoins, au moins trois prestations définies dans les parties 2 et 3 de la norme peuvent être utilisées pour aborder les problématiques liées aux effets rebonds :

1. Tout d'abord, **la prestation codifiée B330** (ASSISTANCE AUX OPERATIONS DE RECEPTION) qui vise à valider l'atteinte des objectifs de dépollution et à organiser la réception des travaux telle que prévue au cahier des charges. Cette phase est donc le principal moment dans le cadre contractuel où il faut valider (ou pas) l'arrêt du traitement. En revanche, si des ajustements peuvent être encore possibles selon les discussions entre l'entreprise et son donneur d'ordre, les principes de réception ont tout intérêt à avoir été définis en amont de cette phase, notamment lors de la phase de consultation (cf. **prestation codifiée B310** : ASSISTANCE AUX CONTRATS DE TRAVAUX) ;
2. **La prestation C400** (RECEPTION DU CHANTIER) documente la phase de livraison des travaux de réhabilitation et permet l'information des maître d'ouvrage, maître d'œuvre et de l'administration sur l'état du site après réhabilitation ;
3. **La prestation CONT** (CONTROLE) dont le but est de « *contrôler que les mesures de gestion (opérations de dépollution, réalisation des aménagements, etc.) sont réalisées conformément aux dispositions prévues* ». Sans être explicite, la vérification de l'atteinte et du respect dans la durée des objectifs de réhabilitation peut être contrôlée par cette prestation ;
4. **La prestation SUIVI** (SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE) définie dans la partie 2 de la norme doit comporter : « *une analyse globale de la situation permettant de conclure sur la mise en évidence d'un éventuel impact ou d'une évolution non attendue d'une pollution préalablement identifiée et en cours de gestion depuis la précédente campagne* ». L'observation de l'apparition d'effets rebonds peut ainsi être constatée, malheureusement a posteriori, au travers de cette surveillance.

- Guide méthodologique : la surveillance de la qualité des eaux souterraines appliquée aux ICPE et sites pollués

En mai 2018, le Ministère en charge de l'Environnement a édité un guide méthodologique pour « *la surveillance de la qualité des eaux souterraines appliquée aux ICPE et sites pollués* », qui permet notamment de poser les bases des informations requises et nécessaires dans le cadre du bilan quadriennal. Ce document aborde également (cf. §.7.3 : Bilan de la surveillance des eaux souterraines) le phénomène d'effets rebonds en expliquant son origine et les moyens de l'évaluer au regard de l'utilisation de différents paramètres de mesure (par exemple : indices de biodégradation identifiés à l'aide du pH, de l'Eh, de l'oxygène dissous, concentrations en nitrates, ...). Signalons aussi en complément la parution du guide « *Évolution et arrêt de la*

surveillance des eaux souterraines⁷ ». « Ce guide présente la démarche proposée pour évaluer la recevabilité d'une demande d'évolution ou d'arrêt de la surveillance. Il illustre l'application de la démarche sur quatre cas d'étude établis à partir de situations réelles ».

3.1.2. Bilan et conclusions

A l'heure actuelle, il n'existe pas au niveau français de document de cadrage relatif à l'arrêt des traitements de dépollution *in situ*. Le phénomène d'effets rebonds et ses conséquences sont bien identifiés et mentionnés dans différents documents de référence, quels que soient les milieux concernés. Les modalités d'arrêt semblent être définies au cas par cas par les opérateurs de la dépollution en lien avec l'administration, sans qu'il y ait d'harmonisation des pratiques et des méthodes à l'échelle nationale.

3.2. PAYS EUROPEENS

3.2.1. Royaume-Uni

Seuls des documents génériques sur la dépollution au Royaume-Uni (méthodologie sur les valeurs guides, méthodologie sur les objectifs d'assainissement...) ont pu être collectés à ce stade des études par le BRGM. Ces guides donnent des orientations générales concernant la réhabilitation, mais peu d'éléments concrets sur la remédiation *in situ* au sens propre.

3.2.2. Allemagne

Le gouvernement fédéral a une compétence législative dans le domaine de la protection des sols, ce qui inclut la prévention et la réhabilitation/traitement de sites pollués. Les Länder (États Fédéraux, au nombre de 16) sont quant à eux chargés de l'application des textes et de leur déclinaison selon les spécificités de chaque territoire. Au niveau fédéral, il n'y a donc pas d'élément (guide, document support, réglementation) relatif à des protocoles d'arrêts visant la dépollution *in situ* et/ou *on site*.

3.2.3. Pays-Bas

Le pays s'est doté d'une bibliothèque en ligne rassemblant un certain nombre d'articles sur la dépollution *in situ*. Ces éléments font *a priori* partie intégrante de la directive cadre du pays. Le site : <https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemsaneringstechnieken/b-in-situ-reiniging> rassemble, en ce sens, plusieurs informations sur les différentes techniques de dépollution *in situ*. Le BRGM a mené une étude sur les préconisations liées à différentes techniques de dépollution. A titre illustratif, seule la méthode d'oxydation chimique (ISCO, *In Situ Chemical Oxidation*) est discutée ci-après car la surveillance des milieux après la dépollution y est abordée :

⁷ INERIS (Fabrice QUIOT), BRGM (Valérie GUERIN, Pauline BALON) pour le compte du Ministère en charge de l'Environnement. Novembre 2020, en cours de révision.

Oxydation chimique in situ (ISCO « In Situ Chemical Oxidation »)

Un certain nombre de préconisations est donné pour l'installation, la mise en œuvre et le suivi de cette technique. Le BRGM s'est attaché à analyser les préconisations données vis-à-vis de l'arrêt du traitement *in situ* et de sa surveillance. Là encore, il n'est pas spécifié à quel moment les installations de dépollution *in situ* doivent être arrêtées. Il est cependant fait état du temps de surveillance final recommandé par les Pays-Bas pour cette technique :

*« La surveillance finale du résultat de l'assainissement par oxydation chimique in situ devrait débiter **quelques jours au moins après la dernière série d'injections, puis une fois par trimestre jusqu'à une ou plusieurs années après la fin de la dernière injection**, pour déterminer quelle aurait été l'efficacité du procédé. Cela prend du temps. Le sol traité doit être saturé plusieurs fois avec des eaux souterraines non impactées. La surveillance doit permettre de déterminer si la pollution des eaux souterraines ne "revient" pas, ce qu'on appelle couramment « l'effet rebond ». En fonction de ce qui a été défini dans le plan de suivi, il peut être indiqué que si les concentrations en polluant dans les eaux souterraines augmentent de manière significative dans deux échantillons consécutifs cela peut signifier un rebond [...]. À la fin des réactions d'oxydation chimiques, il peut encore rester de l'oxygène, de sorte qu'il est encore possible de diminuer les concentrations par voie biologique, si la pollution se prête à une biodégradation aérobie. En fonction de la situation naturelle, il convient de déterminer si, pour une dégradation anaérobie biologique naturelle, les conditions doivent être ajustées par injection de substrat, comme par exemple de l'huile de soja, afin de créer une situation anaérobie. »*

3.3. LE CAS DES ETATS-UNIS

CERCLA

Aux États-Unis, les aspects législatifs relatifs aux sites et sols pollués sont introduits par la loi intitulée « *Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act* » (CERCLA) [littéralement « Loi-cadre de l'intervention, l'indemnisation et la responsabilité relatives à l'environnement »], également appelée « *Superfund* ». Cette loi-cadre vise à traiter les sites jugés « *prioritaires* » sur la base d'un système de notation spécifique.

La section 121 du CERCLA :

- Requiert notamment à l'article (a): « *des mesures d'intervention sur les sites contaminés qui permettraient d'atteindre des niveaux d'exposition acceptables et qui protégeraient la santé humaine et l'environnement* » ;
- Indique à l'article (b): « *une préférence pour la sélection des mesures correctives impliquant un traitement permettant de réduire "de manière permanente et significative" le "volume, la toxicité ou la mobilité" de la pollution* » ;
- Précise à l'article (c) que : « *Si les mesures correctives ont pour finalité de laisser des pollutions en place, le président des USA évalue l'efficacité des mesures correctives tous les cinq ans afin de déterminer si cette mesure continue de protéger la santé humaine et l'environnement* » ;
- Puis que « *Si les mesures ne fonctionnent pas comme prévu, le président des USA peut prendre des mesures correctives supplémentaires sur le site pour atteindre l'objectif de traitement.* »

Ainsi, il est prévu au sein de la réglementation américaine d'« *évaluer l'efficacité des mesures correctives* ». À ce titre, l'US EPA a élaboré le document « *Five-year review guidance* », [la directive pour l'examen quinquennal] en réponse à la réglementation en vigueur et dans le but d'aider les décisionnaires à la mise en place du plan quinquennal (cf. Annexe 1).

4. Principes guidant l'arrêt d'un traitement *in situ*

4.1. INTRODUCTION

La recherche d'informations effectuée par le BRGM sur la prise en compte et le cadrage des risques liés à l'apparition d'effets rebonds lors de traitement *in situ* a montré qu'il y a peu d'informations disponibles, y compris à l'étranger, dans des pays utilisant cette famille de techniques de dépollution. Seuls les Etats-Unis abordent régulièrement ce sujet dans différents documents spécifiques aux techniques de traitement mises en œuvre (cf. Annexe 1). Les pratiques sont ainsi hétérogènes et il n'existe généralement pas de document de référence alors que le sujet et les enjeux associés sont importants.

Au cours de l'année 2020, différentes réunions ont été organisées par le BRGM avec des représentants de différentes entreprises du secteur des SSP (bureaux d'études et entreprises de travaux). Ces échanges ont été effectués sous le pilotage du Ministère en charge de l'Environnement et visaient à identifier les points clefs destinés à encadrer l'arrêt des installations de traitement *in situ* ainsi qu'à partager les retours d'expérience sur cette problématique.

Ces discussions ont conduit à mettre en avant les principaux points clefs suivants :

- **La nécessité d'une caractérisation suffisante et proportionnée d'un site et de la pollution avant de s'engager dans les travaux ;**
- **La conception préalable du traitement même si la mise en œuvre sur le terrain nécessite une certaine adaptabilité au regard du contexte ;**
- **La définition, avant le démarrage des opérations de traitement, d'objectifs réalistes et atteignables, notamment du point de vue technique ;**
- **L'adaptabilité du protocole de réception au contexte du site, à sa problématique et à l'approche retenue (réduction de la masse ou atteinte d'une teneur / concentration résiduelle) ;**
- **Le suivi à pas de temps régulier du traitement (monitoring) en vue de son arrêt.**

Ces différents aspects essentiels sont développés tout au long du présent chapitre.

4.2. METHODOLOGIES DE VERIFICATION DE L'ATTEINTE DES OBJECTIFS DE DEPOLLUTION

Les principes de définition des objectifs de réhabilitation sont précisés dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués (cf. §.3.3 de la méthodologie du Ministère en charge de l'environnement d'avril 2017). En revanche, il convient de mieux préciser les approches rencontrées pour vérifier l'atteinte de ces objectifs dans le cas de la mise en œuvre de traitements *in situ* ou *on site*. En effet, cette vérification diffère selon la technique de traitement employée, dont les grandes familles peuvent se résumer ainsi :

- **Techniques physiques par extraction** : type venting (SVE « *Soil Vapour Extraction* »), pompage-traitement, ou encore EMP (Extraction MultiPhasique) ;

- **Techniques de destruction par voie chimique** (oxydation, réduction), **par voie thermique** (combustion *in situ* (« *smoldering* ») à haute température, etc.), ou encore **par voie biologique** ;
- **Techniques de soutien**, permettant d'accroître l'efficacité des techniques d'extraction : désorption thermique, lessivage / lavage *in situ*, etc.

Au-delà de la typologie de la technique retenue, il est surtout important d'assurer une certaine cohérence entre la réception du traitement et le milieu sur lequel la technique va préférentiellement agir. D'une manière générale, les éventuels effets rebond ne sont pas mis en évidence lorsque la réception des travaux s'opère par l'échantillonnage et l'analyse des matrices solides formant le réservoir des eaux souterraines et/ou des gaz du sol. Les seuls effets rebond observables concernent les suivis des fluides (gazeux ou aqueux). Par exemple, la réception d'un traitement de venting, qui vise à capter les gaz circulant dans le sol, est généralement réalisée à partir de contrôles des gaz du sol plutôt qu'à partir d'analyses des sols ou des eaux souterraines. Néanmoins, la mise en place d'un venting peut avoir, selon les cas, un effet bénéfique sur la qualité des eaux souterraines (par exemple, en déplaçant les équilibres entre les phases absorbées et volatiles) (cf. Figure 8 suivante).

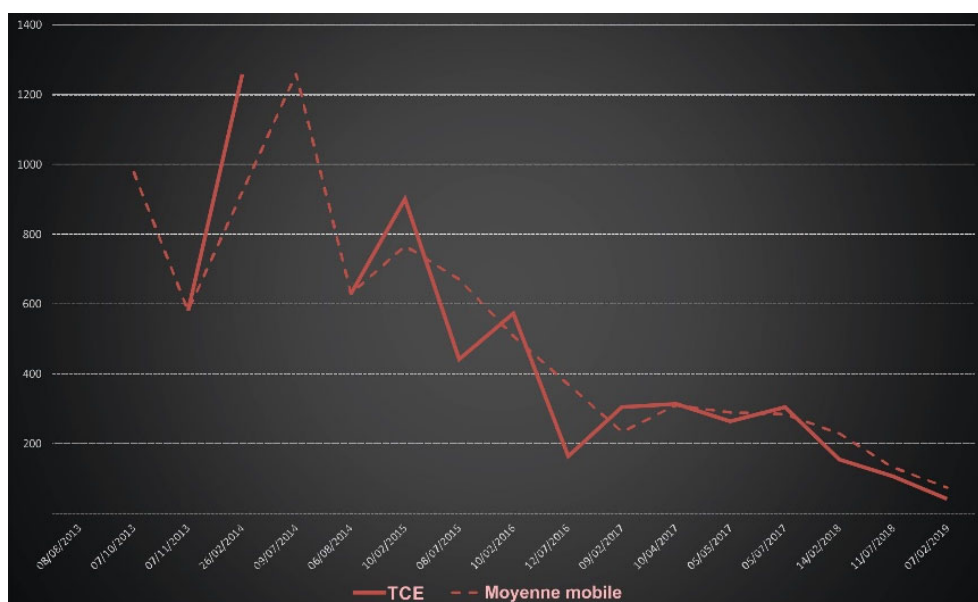


Figure 8 : Exemple d'évolution des concentrations en TCE dans les eaux d'un piézomètre situé en aval immédiat d'une zone traitée par venting⁸.

4.2.1. Cas des modalités de réception de traitements par extraction

Pour les techniques d'extraction, la réception de ce type de traitement s'appuie principalement sur la réalisation d'un bilan massique car il permet d'assurer une comparaison entre l'état initial et l'état post-traitement. La comparaison (pouvant s'exprimer par un rendement épuratoire ou un abattement) peut s'effectuer de deux manières :

- Soit entre la masse initiale de polluants estimée à partir des études de diagnostic et la masse de polluants extraite (cas le plus fréquemment utilisé) ;

⁸ Cette nappe ne fit l'objet d'aucun traitement spécifique. Le schéma conceptuel du site montra que le panache de COHV était très superficiel et résultait de la dissolution d'une phase gazeuse. Le retrait de la phase gazeuse par venting permit de forcer la volatilisation des COHV depuis la phase aqueuse.

- Soit entre la masse initiale de polluants estimée à partir des études de diagnostic et la masse résiduelle de polluants. Cette approche est réservée aux traitements de grande envergure et nécessite de réaliser un diagnostic en fin de traitement comparable (en quantité et en programme) à celui réalisé à l'état initial.

Ces deux manières impliquant la réalisation de bilan de masse de pollution en place (avant ou après traitement), le programme d'investigations associé à ces états des lieux se doit d'être suffisant en nombre et en répartition des points de mesure dans tout le volume de milieu souterrain à traiter. A noter que dans le cas de pollutions historiques chroniques, les quantités de polluants initialement perdus dans le milieu souterrain sont rarement connues.

D'autres indicateurs peuvent être pertinents et sont parfois utilisés comme l'atteinte d'une asymptote de masse de produits récupérés voire celle d'une concentration résiduelle dans un autre milieu que le milieu extrait car il présente des enjeux forts.

Sans définir des lignes directrices spécifiques à chaque technique, quelques éléments génériques visant à guider les acteurs dans l'arrêt de ce type de traitement peuvent être présentés :

- L'élimination même incomplète⁹ des phases organiques libres (LNAPL ou DNAPL pour « *Ligth Non Aqueous Phase Liquid* » et « *Dense Non Aqueous Phase Liquid* ») permet de diminuer considérablement les potentiels de relargage d'une source et donc de limiter les effets rebonds. **Le suivi de la présence et de l'épaisseur de ces phases libres est donc essentiel mais pas forcément suffisant. La transmissivité constitue également un indicateur très pertinent pour apprécier le potentiel de récupération de produit contenu dans la porosité du sol.** Un produit est d'autant plus facilement récupérable par des techniques hydrauliques (ex : pompages) que la transmissivité de l'aquifère est importante. Toutefois, le fait de récupérer uniquement une phase libre ne permet pas de traiter la pollution résiduelle des sols (gouttelettes dispersées dans les sols ou polluants sorbés sur les sols) ainsi que celle restant présente en phase dissoute et/ou gazeuse. La pollution résiduelle reste alors remobilisable ce qui peut justifier un traitement complémentaire. Il est alors recommandé dans ce type de cas de procéder à des analyses de confirmation dans les sols au niveau des zones de remobilisation potentielle ;
- A l'arrêt du traitement, la migration des polluants des couches faiblement perméables vers les horizons sollicités lors de l'extraction peut induire une remontée des concentrations dans ces derniers. Certaines techniques comme le venting (SVE), le pompage-traitement (P&T), l'extraction multi-phasique (EMP), l'air-sparging sont plus particulièrement sensibles à ces effets rebonds. **Pour se prémunir de ce phénomène, il est recommandé d'effectuer, avant la date d'arrêt prévisionnelle, des tests d'arrêt temporaire du système et de relance (marche / arrêt) ou « Stop & Go » sur des durées et périodes à adapter selon la technique et les caractéristiques du milieu à traiter (plages horaire à hebdomadaire).** L'unité de traitement est alors réglée sur ce rythme pour drainer à la fois les polluants facilement accessibles et ceux venant de plus loin ou stockés sur des couches moins perméables. **Il est courant de mettre en œuvre plusieurs cycles de marche / arrêt (au moins 2-3) lors d'un traitement *in situ* ou *on site*.** La réalisation des contrôles permet également d'ajuster / d'optimiser le fonctionnement de l'installation (par exemple, en augmentant le débit d'extraction ou en déconnectant certaines branches de l'installation pour l'orienter / la concentrer sur une autre zone) afin d'atteindre les objectifs de réhabilitation sur l'ensemble de la zone à traiter. La Figure 9 donne un aperçu d'évolution

⁹ Dans les limites de la faisabilité technique de la récupération des phases huileuses, de l'ordre, par exemple, de 1 cm pour l'écémage d'hydrocarbures libres flottants.

des flux massiques extraits (g/jour, en ordonnée) en fonction du temps (en mois, en abscisse) pour un venting conduit selon un protocole en marche / arrêt. Le lecteur peut ici par ailleurs se référer au § 4.3 concernant le phasage de la procédure de réception ;

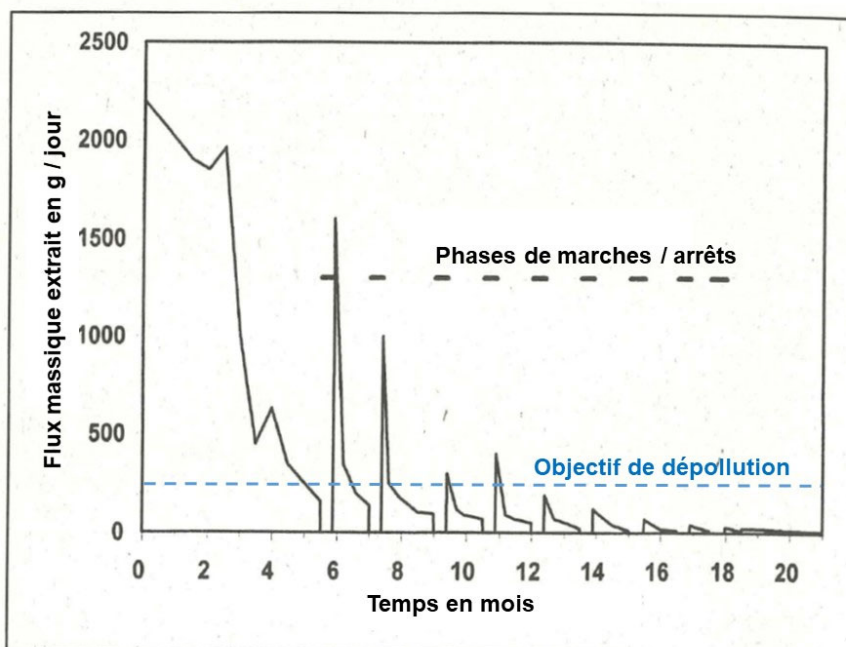


Figure 9 : Exemple d'évolution des flux massiques extraits (g/jour, en ordonnée) en fonction du temps pour un venting conduit selon un protocole en marche / arrêt (source : d'après LfU BADEN-WÜRTTEMBERG¹⁰).

- Avant de s'engager dans la phase de réception des travaux, la première action consiste à réaliser des prélèvements et analyses régulières dans les ouvrages de contrôles prévus au droit et aux abords amont / aval de la zone traitée. Une fois que les concentrations mesurées apparaissent stables et sont, le cas échéant, en-dessous des objectifs de réhabilitation, la démarche consiste à piloter les opérations suivant une série de *Stop & Go*. Si les concentrations restent stables dans le temps (comportement asymptotique), la procédure de réception peut se poursuivre selon la durée prévue. Dans le cas contraire, la stratégie est à ajuster selon le contexte (prolongation du traitement, optimisation du traitement actuel, changement de technique voire mise en place d'autres mesures de gestion : mesures constructives, ...).

Pour résumer cette approche, un logigramme représentant ces différentes étapes a été élaboré (cf. Figure 10). Dans le cas où les objectifs de réhabilitation ne sont pas atteints et que des alternatives au traitement mis en place doivent être recherchées, le préalable à cette réflexion est de s'interroger sur la pertinence du schéma conceptuel et de l'actualiser en conséquence (correction, ajout de nouveaux éléments de connaissance, ...)¹¹.

¹⁰ LfU BADEN-WÜRTTEMBERG. Zentraler Fachdienst Wasser – Boden – Abfall – Altlasten bei der Landesanstalt für Umweltschutz Baden – Württemberg. Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle. Hydraulische und pneumatische in-situ Verfahren. KARLSRUHE 1995.

¹¹ Les opérations de dépollution in situ sollicitent le milieu souterrain et offrent fréquemment l'opportunité d'acquérir des données dynamiques sur la répartition spatiale des pollutions et des propriétés de leurs encaissants.

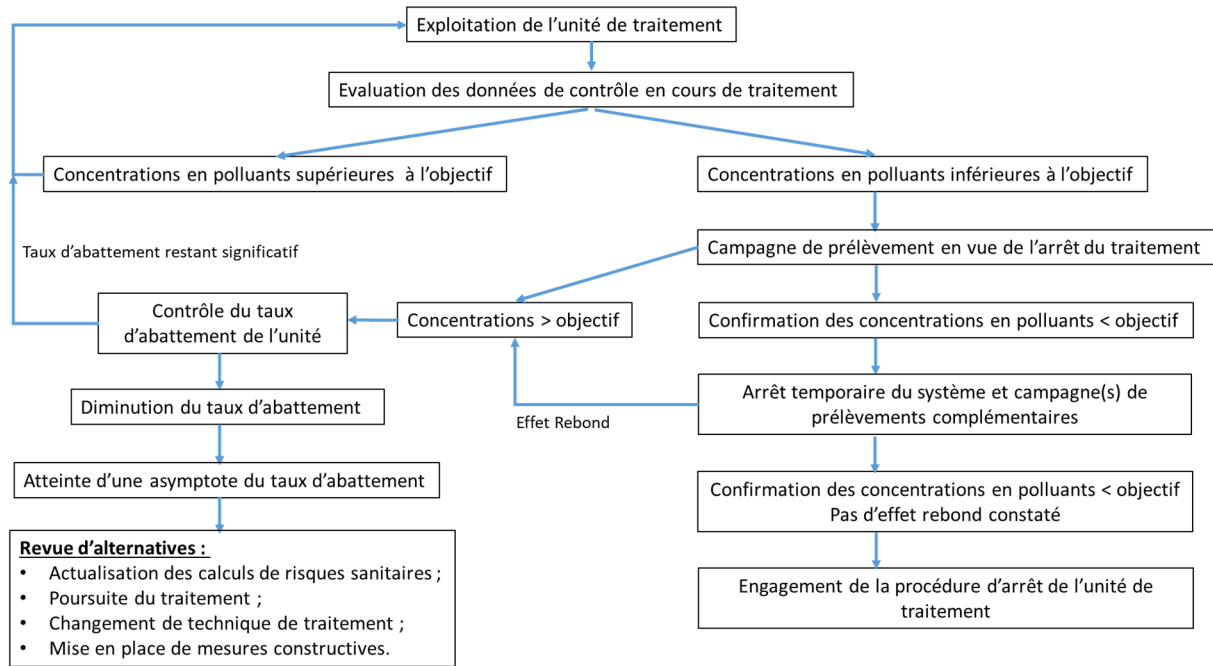


Figure 10 : Logigramme représentant les principales étapes du processus d'arrêt d'une technique de traitement par extraction.

4.2.2. Cas des opérations de réception sur les traitements par destruction des polluants

Pour ce type de techniques, l'atteinte des objectifs de dépollution est plus difficile à établir puisqu'il n'y a pas de capacité de contrôle directement sur la masse de polluants traitée. L'action de traitement consiste à agir sur le polluant pour le dégrader (plus ou moins complètement) par l'ajout de réactifs chimiques (oxydation – réduction), l'augmentation de la température du sol (désorption thermique haute température) ou par stimulation / accroissement de l'activité microbologique (biodégradation). La réalisation de nouvelles investigations dans la zone traitée (par exemple, des sondages avec prélèvements de sol) est techniquement tout à fait possible et permet de dresser un nouveau bilan massique à l'issue du traitement par l'analyse des teneurs résiduelles en polluant. Toutefois, un tel diagnostic doit comporter suffisamment d'investigations pour être représentatif de la zone traitée et permettre d'élaborer un nouveau bilan massique à partir des teneurs résiduelles. Il doit être comparable (en quantité et en programme) à celui réalisé à l'état initial. Cette approche est encore peu utilisée à l'heure actuelle et réservée aux traitements de grande envergure ou réalisés dans des contextes sensibles et à enjeux. Néanmoins, elle est adaptée à la grande majorité des techniques de dépollution basées sur le principe de la destruction du ou des polluants, que ce soit un traitement chimique (ISCO, ISCR, etc.), thermique (ISTD, etc.) ou biologique.

La réception de ce type de traitement s'appuie surtout sur les mesures de concentrations émises dans les voies de transfert (gaz du sol, fraction dissoute dans les eaux souterraines) même si celles-ci ne représentent généralement qu'une masse très réduite de la pollution globale. D'autres indicateurs comme les quantités de réactifs et produits injectées, les mesures des concentrations en O₂ et en CO₂ des gaz extraits, les concentrations des sous-produits de réactions (associées aux mesures de concentrations des accepteurs et donneurs d'électrons ainsi que celles des polluants d'origine), la température du sol au droit de la zone traitée pour les traitements thermiques sont également utiles pour réaliser le suivi du traitement et d'une manière indirecte évaluer son efficacité.

L'arrêt de ce type de traitement s'effectue donc à partir des résultats des prélèvements et des analyses réalisées à différentes reprises dans les ouvrages de contrôles prévus aux abords (amont / aval) de la zone traitée et d'investigations réalisées au droit de cette dernière. La période de suivi de ces traitements est souvent adaptée aux cinétiques de lessivage ou de réactions des agents injectés. Dans le cas de techniques d'injection de produits réactifs, il faut signaler que les durées de suivi sont généralement plus longues suite aux dernières injections.

4.2.3. Modalités de prise en compte de l'hétérogénéité du sol

Le sol étant un milieu plus ou moins hétérogène selon les échelles considérées, le traitement effectué peut avoir des effets, eux-aussi, hétérogènes. Ainsi, un traitement peut être très efficace dans une partie de la zone polluée mais ne pas fonctionner (ou d'être d'efficacité moindre) dans un autre secteur. Il est à noter que l'hétérogénéité du milieu souterrain peut représenter un frein pour le choix de certaines techniques de dépollution *in situ* (comme l'air-sparging par exemple). Il convient donc de prendre en compte cette hétérogénéité du sol dans le processus de traitement, mais plus globalement d'intégrer l'ensemble de la chaîne d'incertitudes associée aux résultats. Plusieurs éléments permettent d'intégrer ces risques de la phase de conception (bonne caractérisation, essais préalables...) jusqu'à la phase de réception du traitement :

- L'intégration d'une variabilité dans les concentrations résiduelles est régulièrement pratiquée avec différentes approches :
 1. soit à partir d'un minimum de taux d'abattement pour la zone voire par point ;
 2. soit par l'atteinte d'une concentration moyenne sur l'ensemble de la zone à traiter, donc sur l'ensemble des points de contrôle ;
 3. soit par l'atteinte d'une concentration résiduelle fixée sur la totalité des points de contrôle mais en intégrant une variabilité statistique (exemple : 90 % des points auront une concentration inférieure à X, 10 % comprise entre X et Y, ...).
- La définition d'un nombre de points de contrôle pertinent avec une localisation pertinente. Le fait d'avoir de nombreux points de contrôles bien placés permet d'avoir une bonne vision de l'efficacité du traitement sur l'ensemble de la zone traitée. D'une manière globale, il s'agit d'avoir *a minima* un échantillonnage représentatif des zones polluées telles que définies au Plan de Gestion ;
- Privilégier des unités de traitement modulables permettant d'adapter la conduite des opérations de traitement à l'évolution de la situation (dans le cas d'un *Pompage & Traitement*, privilégier lorsque c'est possible un débit total de pompage distribué sur plusieurs ouvrages).

Dans tous les cas, la représentativité de la situation après traitement doit être recherchée quelle que soit l'approche initiale retenue (bilan massique, atteinte d'une concentration résiduelle). **Cette perspective passe par une bonne densité et une bonne représentativité des contrôles** (répétition des campagnes de mesures et d'analyses sur des points en nombre et judicieusement implantés) **mais aussi par une analyse globale de la situation validée par une ARR démontrant le respect au global des indices de risque ($QD^{12} < 1$ et $ERI^{13} < 10^{-5}$)**. A noter que l'ARR peut être actualisée au regard de l'acquisition de paramètres susceptibles d'avoir évolué en raison du traitement (le changement de spéciation / valences, la matière organique ou le COT par

¹² Quotient de Danger.

¹³ Excès de Risque Individuel.

exemple). Néanmoins, il doit être démontré que les valeurs obtenues après traitement sont homogènes sur l'ensemble de la zone traitée (en effet, ces paramètres peuvent modifier sensiblement les résultats de l'ARR finale).

Concernant les points de contrôle, il n'y a pas de règles fixant précisément une densité de points de contrôle. Néanmoins, d'une part, l'arrêt d'un traitement *in situ* ne peut pas être effectuée au moyen d'un nombre trop restreint de points de contrôle ponctuels. D'autre part, la densité de points de contrôle pour la réception n'est généralement pas supérieure à la densité de points de caractérisation initiale. Ainsi, à titre indicatif, on peut mentionner :

- Le renouvellement des prélèvements sur 10 à 15% des points analysés au moment de la caractérisation initiale, au droit des zones où un traitement a été réalisé ;
- l'échantillonnage d'un point par maille de 100 m² ou d'un échantillon pour 100 m³ de sol;

Il s'agit d'approches couramment retenues dans les opérations de dépollution menées en France.

Par ailleurs, pour les techniques d'extraction, il faut signaler que les ouvrages sollicités pour le traitement peuvent également être exploités pour la réception des travaux. Cette optimisation est intéressante notamment dans le cas d'objectifs de réduction de la masse de polluants car elle permet d'accroître le nombre de points de mesures complémentaires. Il convient néanmoins d'utiliser ces anciens ouvrages de traitement en conditions « normales » ou « statiques » (sans influence d'un traitement ou d'un pompage) et de conserver des points de contrôle en dehors de la zone de traitement afin d'avoir une bonne répartition.

Il est à noter que la réalisation d'un nombre suffisamment important de contrôles en fin de travaux est indispensable pour évaluer l'efficacité d'une opération de dépollution quelle qu'elle soit (*in situ*, *on site* ou *hors site*) et donc de décider de l'arrêt du traitement ou des travaux. Même si la multiplication des contrôles ou du suivi représente un coût qui peut être significatif, cette dépense est à mettre en relation avec le budget global de l'opération et/ou avec les coûts d'une nouvelle intervention sur le site ou à la perception d'une mauvaise gestion d'un chantier (atteinte de l'image d'une entreprise, nécessité d'une communication complémentaire, perte de temps, ...).

Du point de vue sanitaire, la démarche à adopter est :

1. **De valider l'acceptabilité sanitaire des expositions et pollutions résiduelles**, c'est-à-dire avec additivité des risques ($QD < 1$ et $ERI < 10^{-5}$) plutôt que de se fixer l'atteinte d'une CMA (Concentration Maximale Admissible) pour une seule substance, ce qui au final peut empêcher la réception d'un traitement alors qu'au global, sur le plan sanitaire, l'exposition est acceptable. La situation est évidemment différente si un seul polluant est impliqué ou si un nombre très restreint de polluants tirent le risque parmi un cortège de substances ;
2. **D'avoir une approche conservatoire mais également représentative de la réalité de l'exposition**. Il peut ainsi être retenu d'utiliser dans le cadre de l'ARR, en première approche, les concentrations résiduelles maximales mesurées, puis de pondérer par les concentrations moyennes sur un secteur dont le temps et le mode d'exposition seront homogènes ;
3. **De réaliser une étude de sensibilité** qui permettra notamment de tenir compte des incertitudes et de la variabilité des résultats (par exemple, le taux de ventilation dans les bâtiments, le type de sol, etc.).

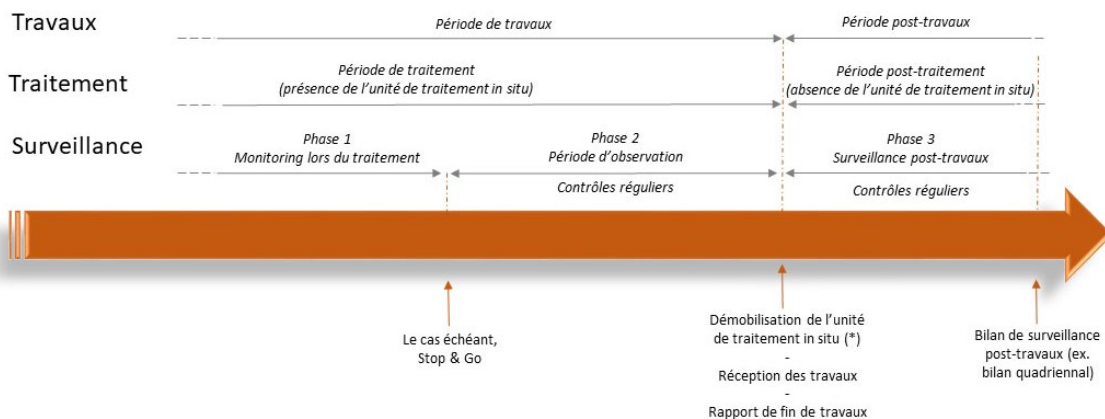
4.3. PROCESSUS D'ARRÊT D'UN TRAITEMENT *IN SITU*

L'ensemble du processus d'un traitement *in situ* et de la surveillance associée peut être globalement représenté selon la Figure 12. Il convient de souligner que les plages temporelles représentées avec des longueurs identiques sur cette figure, ne rendent pas compte des longueurs réelles des différentes étapes lors d'une mise en œuvre opérationnelle. Concernant la surveillance d'une opération de traitement *in situ*, au moins quatre étapes peuvent être généralement distinguées :

1. **Etape 1** : une phase de monitoring lors du traitement ;
2. **Etape 2** : une période d'observation post-traitement ;
3. **Etape 2bis** : le cas échéant, sur les sites à enjeux, une période de vigilance ;
4. **Etape 3** : une surveillance post-travaux (qui peut être celle d'un bilan quadriennal par exemple).

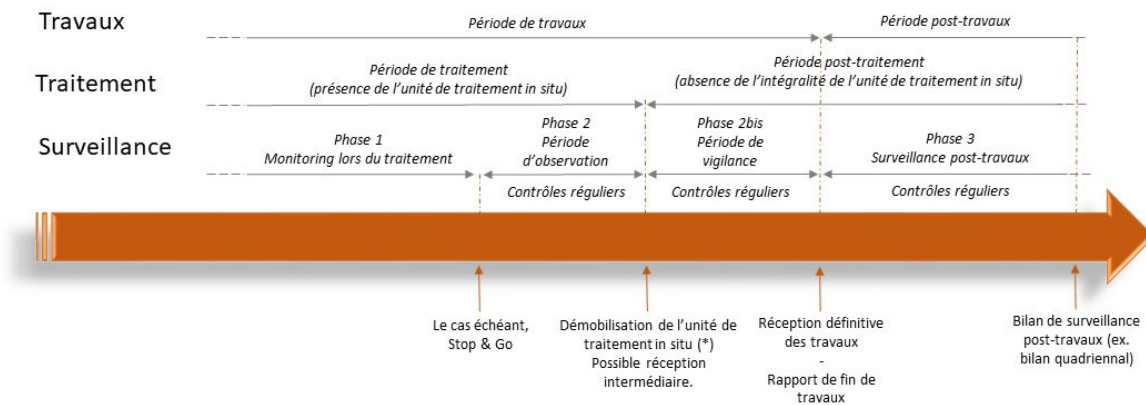
Dès à présent, il convient de signaler que ce phasage et les durées sont à adapter au cas par cas (selon le principe de spécificité) au regard du contexte du site et des travaux. Par exemple, dans le cas d'enjeux forts (notamment en terme de risques sanitaires), le dédoublement de la période d'observation avec la mise en place d'une période complémentaire de vigilance est recommandée (cf. § 4.3.2.). Dans le cas d'enjeux faibles et d'un objectif relevant d'un bilan massique, ce dédoublement est à évaluer au cas par cas. A l'issue du monitoring réalisé lors des traitements, la réception est prononcée en fonction de l'atteinte des objectifs, puis la surveillance post-travaux est alors engagée.

Le présent document étant consacré à la définition de principes d'arrêt d'une installation de traitement *in situ*, une attention plus particulière est apportée aux étapes 2, 2bis (lorsque mise en œuvre) et 3 des points énumérés ci-avant. Pour les aspects liés à la phase de monitoring lors du traitement (étape 1), il convient de se rapporter plus particulièrement aux exigences associées à chaque technique de dépollution et à leurs rejets dans la norme NF X 31-620-4. De la même manière, il est rappelé que la prestation codifiée CONT (norme NF X 31-620-2) permet de contrôler que les mesures de gestion (dans le cas présent, les opérations de dépollution) sont réalisées conformément aux dispositions prévues. Suivant les cas (présence d'un maître d'œuvre ou travaux en conception-réalisation), le suivi des traitements peut être intégré dans la prestation B320 (DIRECTION DE L'EXECUTION DES TRAVAUX) définie dans la norme NF X 31-620-3.



(*) : Suivant les chantiers, la démobilisation de l'unité de traitement in situ peut avoir lieu après la phase de réception des travaux.

Figure 11 : Processus classique d'enchaînement des phases de travaux / traitement et de surveillance dans le cas d'un traitement *in situ* en contexte peu sensible.



(*) : Suivant les chantiers, la démobilité de l'unité de traitement in situ peut avoir lieu après la phase de réception des travaux.

Figure 12 : Processus d'enchaînement des phases de travaux / traitement et de surveillance dans le cas d'un traitement in situ en contexte sensible.

Remarque :

Selon les contextes, la démobilité des dispositifs de traitement peut être prévue et peut intervenir à des moments différents de la réception des travaux. A contrario, les installations peuvent être maintenues sur place pour que l'entreprise intervienne rapidement si les concentrations augmentent pendant une période (période de vigilance) qui peut durer de quelques mois à un an en attendant que la réception soit définitive. Dans ce second cas, le dossier de consultation doit détailler les spécifications techniques à mettre en œuvre, le dispositif contractuel retenu et surtout intégrer dans le bordereau de prix, un poste pour l'immobilisation des installations de traitement.

4.3.1. Période d'observation

Avant de démobilité une installation de traitement *in situ*, il convient de s'assurer que les concentrations résiduelles sont stables dans le temps et ne risquent pas d'augmenter à plus ou moins long terme. Ce laps de temps jugé suffisant est appelé « période d'observation ». Elle vise à vérifier que les objectifs de réhabilitation ont été atteints durablement et que le traitement peut être arrêté. **Ainsi, l'arrêt du traitement *in situ* et la démobilité des installations interviennent à l'issue de la période d'observation.**¹⁴ Selon la typologie des traitements *in situ*, les méthodologies d'évaluation seront forcément différentes. Elles seront basées dans tous les cas sur la réalisation de plusieurs campagnes de prélèvements et d'analyses. Statistiquement, pour évaluer une tendance (hausse, stabilité, baisse) il convient de réaliser au moins trois campagnes au cours du temps. La durée de cette période d'observation dépend de différents facteurs :

- Des caractéristiques du site (géologie, hydrogéologie, accès à la zone polluée, ...) ;
- Des caractéristiques de la pollution évaluée lors du diagnostic (polluants mis en jeu, concentrations mesurées, extension spatiale, ...) ;
- De l'objectif de réhabilitation (asymptote ou atteinte d'une concentration résiduelle, ...) ;

¹⁴ A la fin de la période d'observation, la démobilité de l'unité de traitement devra suivre toutes les précautions qui s'imposent en terme de sécurité du travailleur et de sécurité environnementale.

- De la technique employée pour dépolluer le site ;
- De la sensibilité du site et de ses enjeux ;
- D'éventuelles contraintes de délais pour la réalisation des opérations de dépollution et/ou du chantier.

La durée de cette période est de fait **site-dépendante**. **Elle est donc à adapter au cas par cas, selon les contextes de gestion**. Elle peut être très courte (quelques jours à quelques semaines) si la dynamique des polluants et/ou des milieux est élevée (vitesses de transferts, perméabilité forte, solubilité, volatilité, etc.) et de plusieurs mois, dans d'autres cas. L'évaluation de la durée de cette période d'observation est importante, ne serait-ce que pour mettre en évidence la présence (s'il y avait lieu) d'effets rebonds. Les critères permettant d'évaluer cette durée ou d'en définir les ordres de grandeur font partie des éléments de caractérisation issus du diagnostic préalable.

Remarque :

Dans certains cas, la stabilité des concentrations durant la période d'observation est constatée alors que les objectifs de réhabilitation définis pour le ou les milieux considérés ne sont pas atteints à l'issue de la durée prévue pour le traitement. Plusieurs solutions sont alors à étudier (cf. logigramme de la Figure 10) :

- *Poursuite du traitement, globalement, selon les mêmes modalités ;*
- *Optimisation de la technique utilisée jusqu'alors ;*
- *Changement de technique de traitement.*

Ce cas de figure doit donc être, autant que faire se peut, anticipé lors de la consultation des entreprises, par exemple, en prévoyant dans le bordereau de prix, le chiffrage du traitement sur une durée complémentaire (exemple : trois mois) ou évoqué à l'occasion d'un entretien avec les candidats sur les solutions qu'ils pourraient proposer en cas de non-atteinte des objectifs de réhabilitation.

4.3.2. Période de vigilance

Afin de se donner toutes les garanties de succès ou, plus exactement, d'une maîtrise durable de la situation (notamment des concentrations résiduelles), **il est recommandé, pour les sites à enjeux** (notamment ceux concernés par des aspects sanitaires), **qu'une période de vigilance soit mise en place à l'issue de la période d'observation**. Cette étape doit être prévue dès la phase de consultation des entreprises et est alors à inclure dans les opérations de réception. La réception n'est prononcée de manière définitive qu'à l'issue de la période de vigilance. Il convient ici de rappeler qu'il ne faut donc pas confondre la remise en état du site et l'établissement d'un constat de fin de chantier avec la réception des travaux.

Comme pour la durée de la période d'observation, les caractéristiques de la période de vigilance (étendue, durée, ...) sont dépendantes du contexte du site, ayant fait l'objet du traitement. Ce délai complémentaire va permettre de vérifier la pérennité de la solution de traitement, suivre l'évolution des concentrations résiduelles depuis l'arrêt du traitement et ainsi observer, sur une phase relativement longue, l'apparition d'éventuels effets rebonds.

Lorsque cette phase est mise en place, sa durée est à adapter au cas par cas selon les contextes. Les durées de plusieurs mois sont possibles uniquement si les unités sont démobilisées et le chantier réceptionné, sinon les surcoûts peuvent s'avérer rédhibitoires et engendrer des risques contractuels. Ce délai permet de vérifier, à partir de différentes campagnes de surveillance que la stabilité des concentrations résiduelles est assurée alors que les conditions (hydrogéologiques, pressiométriques, ...) sont très différentes. Cette période de vigilance est assortie d'une surveillance environnementale dont la durée et les modalités d'exécution sont à adapter au cas par cas. Elle peut s'inscrire dans le cadre plus général du bilan quadriennal prévu dans la méthodologie nationale en matière de gestion des sites et sol pollués au sens des textes d'avril 2017.

De la même manière, il convient de prévoir une fréquence de contrôles plus élevée pendant la période de vigilance que celle qui pourrait être mise en œuvre lors de la surveillance post-travaux. Les différents documents consultés dans la bibliographie et le retour d'expérience de différents travaux témoignent d'une densité plus élevée des contrôles dans les premiers moments après l'arrêt du traitement, puis d'un espacement des contrôles avec le temps, avec des pas de temps dépendant des résultats obtenus (avec la possibilité de densifier les contrôles en cas de hausse des concentrations). En revanche, il convient de rechercher une continuité dans les principes de contrôles qui ont eux-mêmes conduit aux travaux (laboratoire d'analyses, panel analytique recherché, reproductibilité des modalités d'échantillonnage appliquées, ouvrages de contrôle, ...).

Si là encore, l'adaptation au contexte du site est nécessaire, il est régulièrement observé la mise en place d'au moins deux contrôles pendant le premier mois après l'arrêt d'un traitement, puis le basculement vers une fréquence mensuelle à trimestrielle pendant toute la durée de la période de vigilance. Cette organisation en première approche est recommandée pour permettre de disposer à la fin de la période de vigilance de chroniques de résultats et de justifier, plus sereinement, de la bonne stabilité des concentrations résiduelles.

Pour illustrer cette approche, dont la mise en œuvre dépend du contexte du site et des travaux (délai et moyens alloués aux travaux), suite à la réalisation d'un venting, après deux contrôles de la qualité des gaz du sol lors du premier mois après la fin du traitement, des contrôles mensuels sont mis en œuvre sur un trimestre complet, puis une fréquence trimestrielle est réalisée pendant la première année (correspondant à la période de vigilance). La gradation des campagnes de contrôle serait ainsi la suivante :

- T0= fin arrêt ;
- T0+1 mois : campagnes n° 1 et n° 2 ;
- T0+4 mois : campagnes n° 3, 4, 5 ;
- T0+7mois : campagne n° 6 ;
- T0+10 mois : campagne n° 7 ;
- T0+13 mois : campagne n° 8.

Huit campagnes permettent sur cet exemple d'apprécier la maîtrise de la situation (respect des objectifs, stabilité des concentrations, ...).

Dans d'autres cas de figure, l'organisation des contrôles est adaptée au contexte spécifique de certains sites : des bouffées polluantes ont été mesurées en aval hydraulique d'anciennes décharges chimiques correspondant à la baisse du niveau de la nappe consécutivement à des hautes eaux directement dépendantes d'épisodes pluvieux forts, quelle que soit la saison dans laquelle ils s'inscrivent. La surveillance a donc été adaptée à cette temporalité et resserrée aux périodes de fins d'évènements pluvieux.

Dans le cas où une tendance à l'augmentation des concentrations serait constatée pendant cette période de vigilance (sur au moins deux campagnes consécutives), selon les termes du marché et, le cas échéant, des réserves formulées lors de la fin de chantier / réception, la mise en œuvre des mesures correctives peut être décidée en concertation avec l'entreprise ayant réalisée le traitement. Dans le cadre des surveillances post-traitement et lors des périodes de vigilance et d'observation, il est important également d'apprécier les fluctuations saisonnières des concentrations avant de statuer sur d'éventuelles actions complémentaires ou correctives.

4.3.3. Surveillance post-travaux

Conformément à la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués du Ministère en charge de l'Environnement au sens des textes d'avril 2017 (cf. §1.7 et §3.4.8), la mise en place d'une surveillance environnementale est recommandée (lorsque celle-ci est justifiée) à l'issue de travaux de dépollution. Celle-ci vise à vérifier l'efficacité intrinsèque des mesures ou techniques de dépollution mises en œuvre, en particulier l'atteinte pérenne des objectifs de qualité fixés pour les différents milieux concernés (eaux souterraines, gaz du sol, ...).

Cette surveillance « conventionnelle » désignée dans le cas présent par les termes « surveillance post-travaux » ou « surveillance post-traitement » démarre ainsi à l'issue de la réception des travaux. La durée de ce suivi est à évaluer en fonction de la connaissance de la pollution et du site en lui-même. **Selon les contextes, il convient également de s'inscrire dans le cadre d'un bilan quadriennal pour évaluer l'état de la situation sur cette période.** Dans le cas où une période de vigilance a été définie et que les concentrations sont restées stables pendant cette période, cette durée peut alors s'inscrire dans cette surveillance post-travaux et correspondre à une partie de ce cycle de quatre ans.

Les exigences associées à la phase de surveillance environnementale et de bilan quadriennal sont précisées dans la norme NF X 31-620-2 (prestations codifiées respectivement SUIVI et BQ).

4.4. RECOMMANDATIONS RELATIVES AUX OPERATIONS DE RECEPTION DES TRAVAUX

L'arrêt d'une opération de traitement *in situ* représente, selon les cas, tout ou partie de la phase de réception de travaux. Cette réception des travaux peut être dissociée de la remise en état du site (phase de réception ≠ constat de fin de chantier) mais elle doit être absolument subordonnée aux résultats de différentes campagnes de contrôle.

Comme les autres étapes des travaux de dépollution *in situ*, la phase de réception d'un chantier est basée sur différents aspects : techniques, financiers, organisationnels et contractuels. Même si le présent document n'a pas vocation à détailler de manière exhaustive tous les engagements et garanties qui peuvent être définis et apportés dans ce contexte, différents éléments utiles et permettant de mieux cadrer la phase de réception sont rappelés ci-après :

1. Le protocole de réception doit être défini dès la phase de consultation des entreprises, même si celui-ci peut être adapté lors des travaux suite à des aléas et/ou des décisions prises lors du chantier. Les principaux éléments du protocole de réception doivent néanmoins être définis dans le cahier des charges en fonction des obligations de l'entreprise (par exemple : objectif de moyens mis en place pour assurer l'extraction d'une masse de polluants ou objectif de résultats dans le cas de l'atteinte d'une concentration résiduelle). Le protocole vise également à définir les paramètres pris en compte pour la réception, par exemple, le nombre de points de contrôle, la méthodologie pour réaliser les contrôles en réception, le panel analytique recherché, etc. **En particulier, il est recommandé dans le cas de pollutions impliquant des composés volatils de mettre en œuvre les protocoles de**

prélèvements et d'échantillonnage limitant la volatilisation des composés (comme par exemple l'utilisation d'un carottier sous gaine, la stabilisation des échantillons ou l'emploi d'un cylindre inox, ...). De la même manière, lorsque la réception s'opère à partir d'une comparaison de bilans de masse (état initial versus état final), il convient que les méthodologies de réalisation soient cohérentes entre elles et qu'une marge d'erreur soit définie le plus en amont possible de la réception. En effet, les résultats peuvent être différents d'une méthode à une autre en lien avec la sensibilité des équipements de terrain, aux méthodes analytiques utilisées, ... Il importe donc que la reproductibilité des campagnes de suivi et de contrôle soit recherchée afin qu'une comparaison des résultats puisse être réalisée (notamment par l'usage des mêmes méthodologies de prélèvements, de la continuité des normes analytiques, etc.) ;

2. Le cahier des charges doit également préciser la durée de la phase de réception ainsi que le phasage prévu ;
3. Un nombre suffisant d'ouvrages de contrôle doit être prévu et mis en place pour bien apprécier l'efficacité du traitement appliqué. Néanmoins, le donneur d'ordre doit avoir conscience qu'une certaine cohérence entre les données initiales et les vérifications à prévoir en fin de traitement est nécessaire ;
4. Le Dossier de Consultation des Entreprises (DCE) doit préciser quelles sont les obligations de l'entreprise. En effet, selon les chantiers, elles peuvent différer d'un chantier à l'autre (obligation de moyens versus obligation de résultats). Par ailleurs, le montage du contrat (conception réalisation, présence d'un maître d'œuvre, ...) a une conséquence directe sur la réception du chantier et sur les responsabilités associées.

Du point de vue contractuel, les modalités sont évidemment convenues entre le donneur d'ordre, son représentant éventuel et l'entreprise qui réalise les travaux. Néanmoins, il peut être également rappelé qu'il existe différents dispositifs qui peuvent être utilisés dans le contexte des traitements *in situ* pour encadrer, dès la phase de consultation des entreprises, les modalités contractuelles de réception du traitement. Ainsi, dans le code de la commande publique (article L291-7), il est possible pour un donneur d'ordre de prévoir une retenue de garantie qui est une somme d'un montant maximum de 5 % prélevée par fraction sur les acomptes versés au titulaire d'un marché, destinée à couvrir les éventuelles réserves formulées lors de l'admission ou de la réception des fournitures, services ou travaux, ainsi que celles pouvant surgir durant la période de garantie (de telles dispositions pouvant être reprises et adaptées dans le cadre d'un contrat privé). Selon les contextes, il peut également être demandé à l'entreprise de constituer une garantie à première demande voire une caution personnelle et solidaire.

4.5. POINTS CLES DANS L'ARRET D'UN TRAITEMENT *IN SITU*

La mise en œuvre de traitements *in situ* comporte certaines spécificités techniques notamment concernant l'objectif et les modalités d'arrêt des opérations à un moment donné. Si la définition de règles génériques ou l'élaboration d'un protocole unique, contraignant et applicable à tous les contextes, ne sont évidemment pas envisageables, des principes de base et des bonnes pratiques peuvent être utilement mis en avant. Ces éléments restent importants pour guider et orienter différents acteurs impliqués, qui ne sont pas toujours en situation de confort avec cette typologie de traitement. Ces éléments laissent également une marge de flexibilité pour s'adapter au contexte rencontré.

La réflexion sur l'arrêt d'un traitement *in situ* doit débuter dès la définition des objectifs de dépollution et se poursuivre tout au long des opérations avec pour finalité la réception des travaux.

- Globalement, **deux approches peuvent être rencontrées pour la définition des objectifs de dépollution (soit la réduction d'une masse et/ou d'un flux de polluant, soit l'atteinte d'une teneur/concentration résiduelle)**. Hors contexte à enjeux, l'atteinte d'une valeur fixe issue d'un calcul de risques sanitaires est à éviter car les objectifs définis sont souvent déconnectés de la faisabilité technique dans la période de temps imposée au traitement. De plus, ils ne tiennent pas compte de l'hétérogénéité du sol qui induit une variabilité des résultats. La définition des objectifs doit donc être basée sur la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués avec, en premier lieu, assurer le traitement des sources de pollution concentrées (réduction de la masse et/ou du flux de polluants) et assurer l'acceptabilité (sanitaire) des expositions résiduelles ($QD < 1$ et $ERI < 10^{-5}$) via une ARR. Cette bonne pratique laisse aux acteurs la souplesse nécessaire pour définir, au regard du contexte, de manière pragmatique la méthode pour vérifier l'atteinte des objectifs en fin de traitement ;
- **Les objectifs de dépollution doivent être cohérents avec la typologie de la technique mise en œuvre** (extraction versus destruction) **ainsi qu'avec la nature du milieu visé par le traitement**. Le cas échéant, il s'agira :
 - de contrôler la qualité et la quantité de polluants extraits (par exemple, les gaz du sol pour un venting) ;
 - et/ou d'apprécier les effets induits par le traitement sur les milieux environnants (par exemple : concentrations en dissous, qualité des gaz du sol, ...) ;
 - et/ou d'estimer le stock de polluant (teneur/concentration finale, épaisseur résiduelle de phase libre, ...). Pour ce point, il est évident qu'établir un bilan de masse résiduelle en fin de traitement suppose qu'un bilan de masse ait été élaboré selon des modalités comparables, lors des études de caractérisation préalables aux travaux.

Le croisement des approches est une bonne pratique visant à acquérir une meilleure vision de l'efficacité du traitement même si certains écarts sont constatés et à justifier.

- **L'objectif général d'atteindre une asymptote à l'issue du traitement est une bonne pratique commune aux approches** par réduction de masse de polluant ou d'atteinte d'une concentration résiduelle. Ce constat se construit à l'avancement pendant le traitement et, dans tous les cas, avant l'arrêt du traitement. Il vise à démontrer la stabilisation des concentrations résiduelles dans le temps, et donc l'efficacité durable du traitement. Néanmoins, d'autres indicateurs sont utiles pour assoir la décision d'arrêt des opérations comme le volume de produit / réactif injecté (exemple des ISCO, ISCR, etc.) ou la température du sol (exemple des procédés thermiques). De plus, l'observation d'une asymptote dépend des conditions de mise en œuvre des traitements (débits d'extraction dans chaque aiguille, dose injectée en chaque puits, etc.) et impose aux différentes parties d'avoir des échanges réguliers, notamment sur les possibilités d'optimisation des conditions de traitement et/ou les suites à donner lorsque les objectifs quantitatifs de dépollution ne sont pas atteints. La prolongation du traitement, son optimisation, le changement de techniques ou le recours à d'autres mesures de gestion (mesures constructives, ...) sont alors à étudier. Cette approche démontre qu'il y a tout intérêt pour les différents acteurs à orienter leurs réflexions et décisions sur le ou les objectifs à atteindre en fin de traitement plutôt que de s'attacher de manière très rigide aux moyens pour les atteindre ;

- **Tout au long du processus d'une opération de dépollution (conception / consultation / réalisation / réception), une certaine flexibilité doit être recherchée** afin de tenir compte des découvertes et difficultés rencontrées au cours des travaux mais aussi pour tenir compte de l'hétérogénéité du milieu souterrain. Cette marge de manœuvre peut s'anticiper de différentes manières et à différents moments du processus :
 - Intégrer **dès la phase de consultation** des éléments relatifs à l'apparition d'effets rebonds (prévoir un prix pour un délai de traitement complémentaire par exemple) mais surtout définir un rebond acceptable sur la durée (pour autant que les risques sanitaires soient maîtrisés de façon pérenne). Pour les techniques d'extraction (venting, air-sparging, pompage-traitement, Extraction Multiphasique (EMP), ...), il s'agit de prévoir plusieurs cycles (en général deux à trois) d'arrêt temporaire et de (re)mise en marche de l'unité de traitement sur des plages horaires à hebdomadaires pour suivre les effets rebonds et, le cas échéant, décider des suites à donner. Lors de ces répétitions de marche-arrêt du traitement, l'évolution des concentrations doit être particulièrement observée ;
 - Introduire une certaine **variabilité / flexibilité des objectifs de dépollution**. Cette variabilité / flexibilité est à inscrire dans l'ARR fin de travaux, au niveau de l'étude de sensibilité, mais elle peut également être intégrée dans le dossier de consultation (pondération des concentrations résiduelles à l'échelle de la zone traitée plutôt qu'en un point fixe, définition de concentrations maximales en limite de site).
- **Le suivi des travaux est un poste clé qu'il ne faut ni négliger ni sous-estimer**. Assurer un contrôle régulier de l'efficacité du traitement en cours de travaux (suivi de la qualité des rejets des installations, suivi des injections, exploitation des résultats, suivi des taux d'abattement, ...) permet, d'une part, d'ajuster de façon optimale le traitement au fur et à mesure en fonction des conditions rencontrées et, d'autre part, de préparer et de sécuriser la réception du chantier, donc l'arrêt des installations. En effet, une partie des moyens de suivi utilisés en cours de traitement seront également des outils de réception, le cas échéant, complétés par d'autres approches (mesures *in situ* entre autres).
- **Les modalités de réception doivent être définies le plus tôt possible même si, au regard de l'évolution du chantier, certains ajustements pourraient être consentis**. La durée du processus de réception d'opérations de traitement *in situ* est généralement chronophage. Elle doit donc être suffisante et cohérente avec les caractéristiques du site (exemple perméabilité des terrains, vitesse de transferts dans les eaux souterraines, ...). Pour cette phase, les bonnes pratiques consistent à :
 - **Définir une bonne densité de points de contrôle** jugés représentatifs pour constater l'effet du traitement ;
 - **Prévoir plusieurs campagnes de prélèvements et d'analyses** pour évaluer la maîtrise de la situation (stabilité des concentrations résiduelles par exemple dans les ouvrages de contrôle). A cette occasion, la mise en place d'une période de vigilance assez longue (plusieurs mois à adapter selon le contexte au cas par cas) comportant des modalités spécifiques est recommandée pour les sites à enjeux. Pendant cette période, dans le cas d'une augmentation des concentrations sur deux campagnes consécutives, une action corrective est alors à mettre en œuvre selon les dispositions contractuelles. Le bordereau de prix doit ainsi inclure des postes spécifiques pour les contrôles préalables à la réception, l'immobilisation et la démobilitation des installations si celles-ci sont souhaitées par le donneur d'ordre ;

- **Dresser le constat pour la réception finale des travaux à partir d'une chronique de résultats** traduisant l'évolution des teneurs/concentrations au regard des objectifs de réhabilitation (stabilisation des concentrations, augmentation voire dépassements au-delà des objectifs).

Enfin, à l'issue d'un traitement *in situ*, la mise en place d'une surveillance classique selon la notion de bilan quadriennal est préconisée.

5. Conclusion

L'utilisation des installations de dépollution *in situ* représente entre 40 et 50 % des techniques de traitement actuellement employées dans le domaine des sites et sols pollués. Si ces techniques sont bien maîtrisées par les acteurs du domaine, l'arrêt de ce type de traitement est rendu délicat par différents phénomènes : effets rebonds, saturation qui, s'ils ne sont pas bien gérés, peuvent induire un relargage diffus et rémanent de polluants après l'arrêt des traitements.

Afin de mieux gérer ces phénomènes, le BRGM a été à l'initiative d'un travail effectué pour le compte du Ministère en charge de l'Environnement visant à mieux cadrer les conditions de l'arrêt des traitements *in situ*. Cette étude a également été effectuée de façon collégiale avec la collaboration de différentes entreprises du domaine des sites et sols pollués qui ont contribué notamment à préciser les attentes des acteurs mais aussi à partager leur propre retour d'expérience sur ce sujet. Une DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) a également été consultée.

Les principaux résultats de ces échanges et de l'étude du retour d'expérience étranger sur ce sujet ont montré :

1. qu'à l'heure actuelle, **aucun document n'existe au niveau français concernant les modalités d'arrêt des installations de traitement *in situ*, ce qui se traduit par des pratiques hétérogènes et/ou un manque de visibilité sur les protocoles appliqués.** L'intérêt de l'étude est confirmé pour l'ensemble des acteurs quels qu'ils soient (administration, bureaux d'études, donneurs d'ordres ou entreprises de travaux) ;
2. **que si des bonnes pratiques générales pour faciliter l'arrêt de ce type de traitement peuvent être mises en avant, le principe de spécificité des sites prend toute sa pertinence dans ces contextes** (cf. méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués au sens des textes d'avril 2017) ;
3. **que l'arrêt d'un traitement *in situ* est d'autant plus simple que certains éléments fondamentaux sont connus et correctement réalisés :**
 - a. Caractérisation préalable fiable et la plus représentative possible de la pollution et de son étendue ;
 - b. Réalisation d'essais préalables en vue d'appréhender autant que possible certains phénomènes et de préciser le dimensionnement des installations. La mise en œuvre d'essais en laboratoire et surtout d'essais de terrain pour les traitements *in situ* est ainsi recommandée ;
 - c. Définition d'objectifs pertinents techniquement et en adéquation avec le traitement retenu et le contexte. Sur ce point, en dehors d'enjeux sanitaires, l'objectif d'acceptabilité des expositions résiduelles doit être privilégié plutôt que l'atteinte d'une CMA brute déconnectée d'une faisabilité technique ;
4. **la durée du traitement doit être en adéquation avec les caractéristiques du site, les concentrations mesurées et le rendement épuratoire de la technique retenue.** Il convient de considérer un vaste ensemble de retours d'expérience et les variabilités dans le temps pour définir une durée de traitement, plutôt que d'avoir recours à un unique avis d'expert ;

5. **que la méthodologie de réception du traitement, donc de l'arrêt des installations doit être anticipée et discutée – autant que faire se peut – le plus amont possible de travaux afin que chaque acteur puisse bien connaître et appréhender ces modalités du point de vue technique, financier et en terme de durée.** A ce titre, le marché doit intégrer toutes les sujétions nécessaires aux coûts liés à l'immobilisation éventuelle des installations mais aussi au déclenchement et à la réalisation des contrôles destinés à valider l'arrêt du traitement.

L'Arrêté Préfectoral qui encadre les travaux de dépollution in situ peut prévoir une clause spécifique concernant la durée de la surveillance en période de vigilance, qui s'appuiera sur des données techniques pertinentes. Le Préfet se réserve la possibilité de prescrire une durée de la période de vigilance lorsque les éléments techniques le permettent.

Trois critères sont plus particulièrement prépondérants pour assurer le succès d'une réception de travaux de dépollution *in situ* :

- **La durée.** La réception de traitements de ce type demande généralement du temps et valider un arrêt sur une seule campagne de contrôle n'est pas recommandé. De plus, pour les sites à enjeux et selon la technique utilisée, la mise en place d'une période de vigilance d'une durée généralement de plusieurs mois, à adapter au cas par cas selon les spécificités du site (un cycle hydrogéologique par exemple), est une bonne pratique même si celle-ci induit un coût supplémentaire aux travaux et/ou peut s'avérer en inadéquation avec certaines contraintes fortes de délais ;
- **La réalisation de plusieurs campagnes de prélèvements et d'analyses de contrôle avec un nombre de points suffisants et bien positionnés.** La réalisation de plusieurs campagnes synchrones effectuées à l'aide du même protocole de prélèvements et les mêmes méthodes analytiques est recommandée. De la même manière, il convient d'être particulièrement vigilant sur les méthodologies de mesure (échantillonnage, analyse...) et d'interprétation des résultats qui doivent être cohérentes avec celles utilisées en amont du chantier (notamment au niveau du Plan de Gestion). Cette approche permet de fiabiliser la comparaison entre l'état initial pré-travaux à l'état final post-travaux. Enfin, il s'agit aussi d'intégrer les incertitudes inhérentes à l'hétérogénéité du sol, aux méthodes analytiques ou à la sensibilité des équipements utilisés ;
- **La démonstration d'une diminution nette des concentrations initiales avec une stabilisation des concentrations résiduelles.** L'atteinte d'une asymptote des concentrations sous les objectifs de réhabilitation doit être recherchée. Cette notion est indépendante de l'approche retenue (réduction de la masse de polluant et/ou atteinte d'une concentration résiduelle). Il s'agit de démontrer que le traitement a été efficace (sur tout ou partie de la zone traitée voire en aval) et surtout que la situation est durablement maîtrisée.

Annexe 1

Recherches bibliographiques : cas des Etats-Unis

a) *“In Situ Remediation: Design Considerations and Performance Monitoring Technical Guidance Document”*

Ce document a été édité en octobre 2017 par le département de la protection de l'environnement du New Jersey. Il s'agit d'un extrait du code administratif du New Jersey (repris dans son intégralité au sein du chapitre 7 du « *New Jersey Administrative Code - 7:26E : Technical requirements for site remediation* ». Bien que l'information soit très succincte et l'échelle d'application très globale, ce document vise à préciser les exigences réglementaires pour l'assainissement d'un site pollué. Le chapitre 5 précise notamment les dispositions réglementaires vis-à-vis des actions de remédiation.

Biosparging (code C315c dans la norme NFX 31 620-4)

Cette technologie consiste à injecter, au sein des eaux souterraines polluées par des composés organiques volatils en phase dissoute, de l'air comprimé sous le niveau de la nappe. Cette injection d'air fait buller la nappe, se traduisant par un transfert des polluants de la phase dissoute vers la phase gazeuse. Ces gaz sont interceptés et extraits depuis la zone non saturée par un dispositif d'extraction forcée des gaz du sol (venting – Code C311a). Les gaz sont alors récupérés puis traités en surface. L'injection d'air stimule la biodégradation aérobie des polluants qui peut aussi encore être stimulée par l'injection de nutriments, chaleur, dans le domaine à traiter.

Le guide étudié précise, au sein du chapitre 6.2.2.2.2 relatif au suivi des performances de biosparging, que la surveillance est nécessaire afin de déterminer si la concentration de contaminants diminue dans la zone saturée et pour s'assurer que l'assainissement se déroule à un rythme raisonnable. L'objectif du New Jersey au travers de ce document est de valider l'efficacité du traitement par biosparging.

Au travers de cet objectif, les problématiques d'effets rebonds sont évoquées. Ainsi le retrait des installations de dépollution *in situ* (a fortiori le biosparging dans ce cas) est envisageable dans le cas suivant: « *si le comportement asymptotique persiste pendant des périodes d'environ six mois ou plus et qu'il y a **peu de rebond des concentrations après des périodes d'arrêt temporaire** du système. Le rendement continu du système de biosparging doit être évalué pour déterminer si les buts et objectifs d'assainissement ont été atteints. Si l'objectif de l'assainissement est de réduire davantage les contaminants, il faudra alors envisager une autre technologie d'assainissement.* ». On comprend au travers ces éléments qu'il n'est pas question d'anticiper les effets rebonds en tant que tels mais de valider leur absence au moyens **d'arrêts périodiques répétés**.

Lavage in situ / Soil flushing (code C313a dans la norme NFX 31 620-4)

Cette technologie consiste à injecter des fluides en amont de la zone saturée polluée à traiter pour mobiliser les polluants alors ensuite collectés par des pompages en aval direct de la zone visée. Ce fluide peut être de l'eau (mobilisation par accroissement des gradients hydrauliques), des tensio-actifs, etc. Les eaux pompées sont ensuite traitées en surface.

Afin d'évaluer le risque d'un effet rebond dû à la présence de contaminants, il est proposé au sein du chapitre 6.3.2.2.2. relatif à la surveillance du rendement en matière d'efficacité corrective [pour le lavage in situ], d'analyser les concentrations cibles de contaminants restants dans le sol et/ou dans l'eau souterraine.

« Il est important que l'enquêteur attende suffisamment longtemps après une opération de nettoyage du sol avant de prélever des échantillons pour permettre aux concentrations de contaminants dans le sol et l'eau souterraine de **revenir à l'équilibre**. On s'attend à des **augmentations à court terme des concentrations de contaminants en phase dissoute dans les deux premières semaines suivant l'arrêt du lavage in situ et avant le rétablissement de la phase dissoute**. Il s'agit là d'une preuve que le lavage in situ a réussi à mobiliser la contamination en phase sorbée de la matrice du sol. Le délai de retour à l'équilibre des conditions sera établi en fonction des conditions propres au site. Il est recommandé de prélever les échantillons de surveillance post-traitement au même intervalle de temps approximatif après chaque opération de lavage in situ. À la suite de multiples lavage in situ, les concentrations de contaminants en phase dissoute diminuent à mesure que la source s'épuise. ». Du fait de la technique employée, une diminution de la phase sorbée est attendue.

b) *“Methods for evaluating the attainment of Cleanup Standards-Volume 2: Ground Water”*

Ce guide, écrit par l'US EPA, est paru en Juillet 1992. Il fournit aux utilisateurs des méthodes d'échantillonnage et d'analyse pour évaluer le bon respect des objectifs de réhabilitation des eaux souterraines.

Le chapitre 6 du document détaille la « *décision de mettre fin au traitement au moyen d'une analyse de régression* ». L'objectif de l'analyse de régression est d'estimer la relation fonctionnelle sous-jacente (c'est à dire le modèle), d'évaluer l'ajustement et le cas échéant, d'utiliser le modèle pour faire des prévisions sur les observations futures. Une fois les objectifs de réhabilitation atteints, il reste à évaluer la stabilité de l'état qualitatif des eaux souterraines (hypothèse de départ) avec le modèle établi. Ainsi, il est proposé « *En établissant un modèle de régression simple avec la mesure du contaminant comme variable dépendante et le temps comme variable indépendante, on peut vérifier si la pente estimée du modèle linéaire résultant est positive ou non (voir la section 6.1.3 du document étudié). Des diagrammes de dispersion des données s'avéreront utiles pour évaluer le modèle. Lorsque l'on utilise les moyennes annuelles, la régression peut être effectuée sans tenir compte de la corrélation en série. [...] Si, d'après le test, il n'y a pas de preuve significative que la pente est positive, alors la preuve est conforme à la conclusion préliminaire que l'eau souterraine dans le(s) puits atteint la norme de nettoyage. Si la pente est significativement supérieure à zéro, alors la préoccupation que les niveaux de contaminants puissent plus tard dépasser la norme de nettoyage existe toujours et l'hypothèse d'un état stable est remise en question. Dans ce cas, il faut examiner plus à fond les raisons de cette augmentation apparente et, peut-être, les efforts d'assainissement supplémentaires.* ».

Cette analyse de régression permet ainsi d'évaluer le risque de rebond dans les eaux souterraines. Il en est de même pour le document « *Methods for evaluating the attainment of Cleanup Standards-Volume 3 : Soil and Solid Media* »

c) *“Pump and Treat - Ground Water Remediation”*

Ce document établi par l'US-EPA en Juillet 2016 est un guide à destination des décisionnaires et utilisateurs du système de pompage et traitement. Dans le cadre de ce traitement, le guide cherche à élaborer des pistes pour « *anticiper les problèmes de pollution résiduelle et de rebond* ». Il définit en ce sens la notion de phénomène de pollution résiduelle comme faisant « *référence au taux de diminution progressivement plus lent de la concentration des contaminants dissous avec l'exploitation continue d'un système de pompage et de traitement* ». Dans le cadre d'une dépollution par pompage et traitement, le rebond correspond à « *l'augmentation assez rapide de la concentration de contaminants qui peut survenir après l'arrêt du pompage. Cette augmentation peut être suivie d'une stabilisation de la concentration des contaminants à un niveau légèrement inférieur* ».

L'évaluation de la quantité de pollution résiduelle et du risque d'effet rebond lors de la dépollution d'un site est un des facteurs à prendre en compte lors de la mise en place d'un traitement *in situ*. Il est rappelé à ce titre l'importance de caractériser le site afin d'en définir au mieux la complexité du cadre hydrogéologique, ainsi que la distribution souterraine des contaminants. Ces deux informations doivent pouvoir aider l'exploitant à évaluer les risques de rejets et de rebonds sur site. Ainsi, les caractéristiques de sorption peuvent être évaluées au moyen d'essais de sorption préalables. « *Évaluer les possibilités d'enlèvement ou de confinement du produit en phase libre* » est une des priorités des sites contaminés par du NAPL, couplée à une évaluation étendue de la contamination résiduelle en NAPL.

Dans ce document, au travers d'exemples, il est montré que le retrait des installations de dépollution *in situ* ne saurait être anticipé qu'au travers d'un **travail complet et approfondi** sur les différents facteurs influençant les effets rebonds. Ceux-ci sont, en effet, dépendants du site considéré.

Sans parlé de protocole, l'US EPA a élaboré un système en six étapes qui vise à qualifier la bonne exécution d'une opération de dépollution à savoir :

- **Étape 1.** Évaluation de l'emplacement pour déterminer la nécessité et les conditions d'une mesure d'assainissement ; définir les modalités de traitement ;
- **Étape 2.** Exploitation du système de dépollution, au cours de laquelle les concentrations de contaminants diminuent ;
- **Étape 3.** Conclusion du traitement après que les concentrations de contaminants sont demeurées **inférieures à l'objectif de réhabilitation pendant une période de temps suffisante**, d'après les connaissances des conditions hydrogéologiques locales et les données recueillies pendant les opérations de pompage et de traitement ;
- **Étape 4.** Surveillance après l'arrêt de l'installation de dépollution des niveaux d'eau et des concentrations de contaminants pour déterminer quand le libre écoulement permanent des eaux souterraines est rétabli ;
- **Étape 5.** Échantillonnage pour évaluer l'atteinte des objectifs de réhabilitation. Si ces objectifs ne sont pas atteints, il faudra peut-être évaluer et réviser le plan de gestion et de traitement de la pollution ;
- **Étape 6.** Déclaration que les eaux souterraines sont assainies ou encore contaminées d'après les données recueillies au cours de la phase 5.

Cependant, il n'est pas précisé à quel moment les installations de dépollution peuvent être retirées, ni quelle est la « *période de temps suffisante* » ou comment l'appréhender.

d) *“Technical and Regulatory Guidance for In Situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Groundwater” (ITRC, 2005)*

Ce document a été élaboré par l'ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council), en 2005. L'ITRC est une coalition nationale dirigée par les États et composée de membres du personnel des organismes de réglementation environnementale d'une quarantaine d'États et du district de Columbia, de trois organismes fédéraux, de tribus et d'intervenants publics et industriels. Le document visé est un document d'orientation, élaboré pour décrire les exigences techniques et réglementaires de l'oxydation chimique *in situ* (ISCO pour « *In situ chemical oxidation* »).

Il y intègre notamment une partie sur la surveillance post-traitement *in situ* (par l'oxydation chimique *in situ*) et l'arrêt de celle-ci (chapitre 6.2). La surveillance est vue comme étant le moyen permettant de « *montrer la bonne atteinte des objectifs du traitement comme par exemple, la réduction du flux massique entraînant l'arrêt des systèmes de pompage et de traitement.* »

Un certain nombre de paramètres sont à suivre pour valider que les réactions chimiques sont terminées et que le système a retrouvé son équilibre (température, présence d'oxydant résiduel...).

Il est par ailleurs précisé : « *Pour déterminer l'efficacité du traitement et évaluer si le degré souhaité d'oxydation et de désorption a été atteint dans la zone saturée et dans le contaminant en phase aqueuse, la surveillance devrait se poursuivre **trimestriellement pendant au moins un an après la fin du traitement et de l'activité oxydante pour s'assurer qu'aucun rebond ne se produit.** Au cours de cette phase de surveillance post-traitement, on s'attend à ce que le site soit revenu à l'équilibre et à ce que les concentrations se rapprochent des objectifs du traitement. **Si les concentrations augmentent pendant deux trimestres consécutifs, il est fort probable qu'il y ait un rebond et qu'il y ait encore une masse de contaminants non traités dans les sols saturés, ce qui entraînerait une augmentation des concentrations en phase dissoute. Une injection subséquente peut être nécessaire** ».*

L'ITRC rapporte enfin, que les États « *diffèrent quant à l'ampleur de la surveillance nécessaire pour assurer la fermeture du site. La plupart des États [aux États-Unis] souhaitent que les données soient recueillies **longtemps après l'injection** pour assurer le nouvel équilibre. Il n'est pas rare que les États exigent **une surveillance annuelle pendant trois ans** pour conclure que la contamination restera inférieure aux niveaux cibles à long terme* ».

On observe à ce niveau une différence entre les préconisations de l'ITRC (une surveillance trimestrielle pendant a minima un an) qui permet de voir le bon retour à l'équilibre, au fil des saisons, et la demande des États aux entreprises de dépollution avec une surveillance annuelle sur trois ans. Là encore il n'est pas précisé à quel moment les installations de dépollution *in situ* doivent être retirées. Notons cependant que l'ITRC fait mention d'une « *injection subséquente* » supplémentaire nécessaire en cas de rebond qui implique soit la réinstallation du système soit d'une autre installation soit un traitement autre.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34



Géosciences pour une Terre durable

brgm