

**Réhabilitation des sites pollués
aux solvants chlorés
Techniques de dépollution**

**Rachel Pecci - ERM
10 décembre 2013**

Sommaire

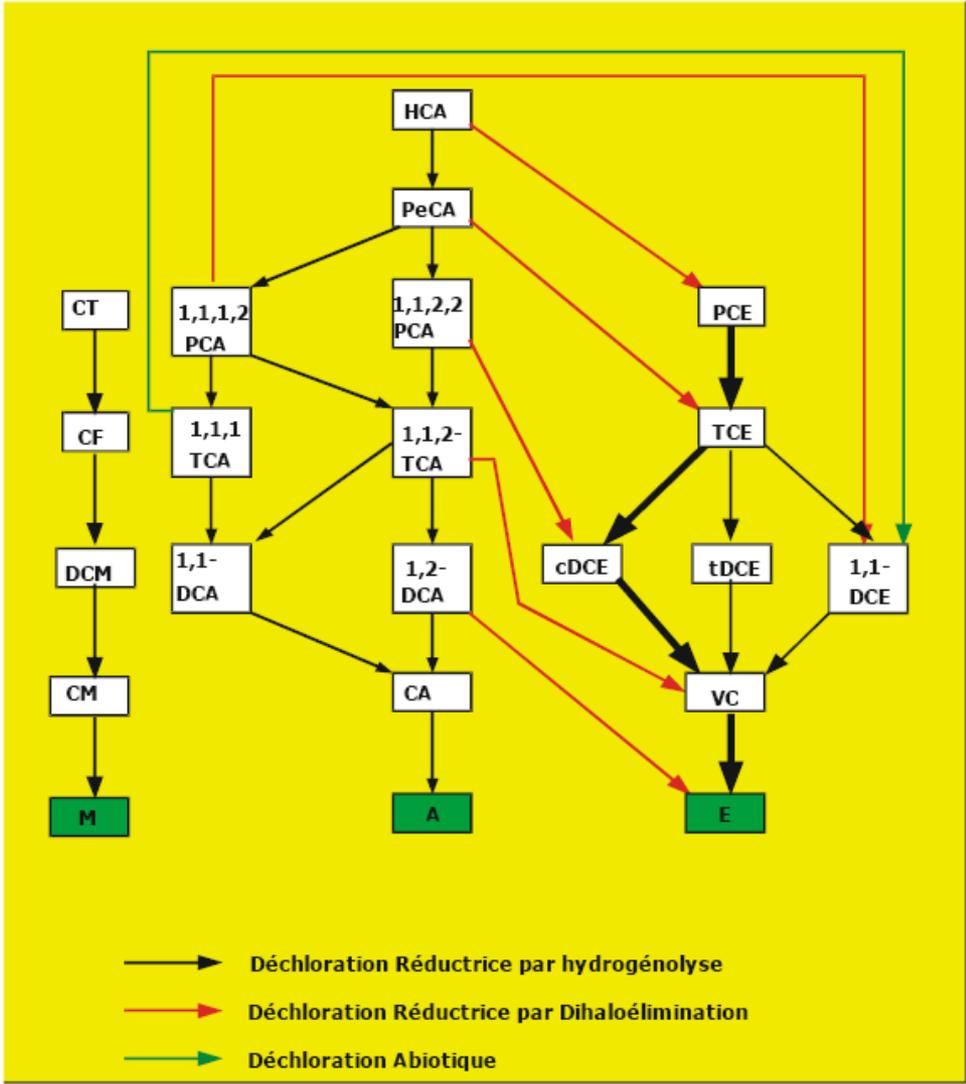
- Introduction
- Traitements par extraction
- Principaux traitements par injection
 - Oxydation
 - Réduction
- Points clefs

Quelques mots sur les solvants chlorés

- Solvants très utilisés historiquement (trichloroéthylène, tétrachloroéthylène, etc...)
- Des caractéristiques physico-chimiques variables, mais produits généralement mobiles, plus denses que l'eau et volatils
- Variété des produits retrouvés (dégradation des produits en sous-produits)
- Produits toxiques et parfois cancérigènes → problématique sanitaire (avec renforcement récent de la réglementation)
- Problématique très fréquente sur les sites industriels, et qui s'étend parfois hors site (problématique intrusion de vapeurs)

↳ Une problématique complexe en termes de dépollution

Quelques mots sur les solvants chlorés



(abréviations des sigles détaillées en Annexe I)

FIGURE 11 - DÉGRADATION DES COMPOSÉS ORGANO-CHLORÉS ALIPHATIQUES (ADAPTÉ DE MOREAU [21] ET VOGEL ET AL. [30, 31])

Sources potentielles et phases rencontrées

Migration dans le milieu souterrain des composés organo-chlorés aliphatiques

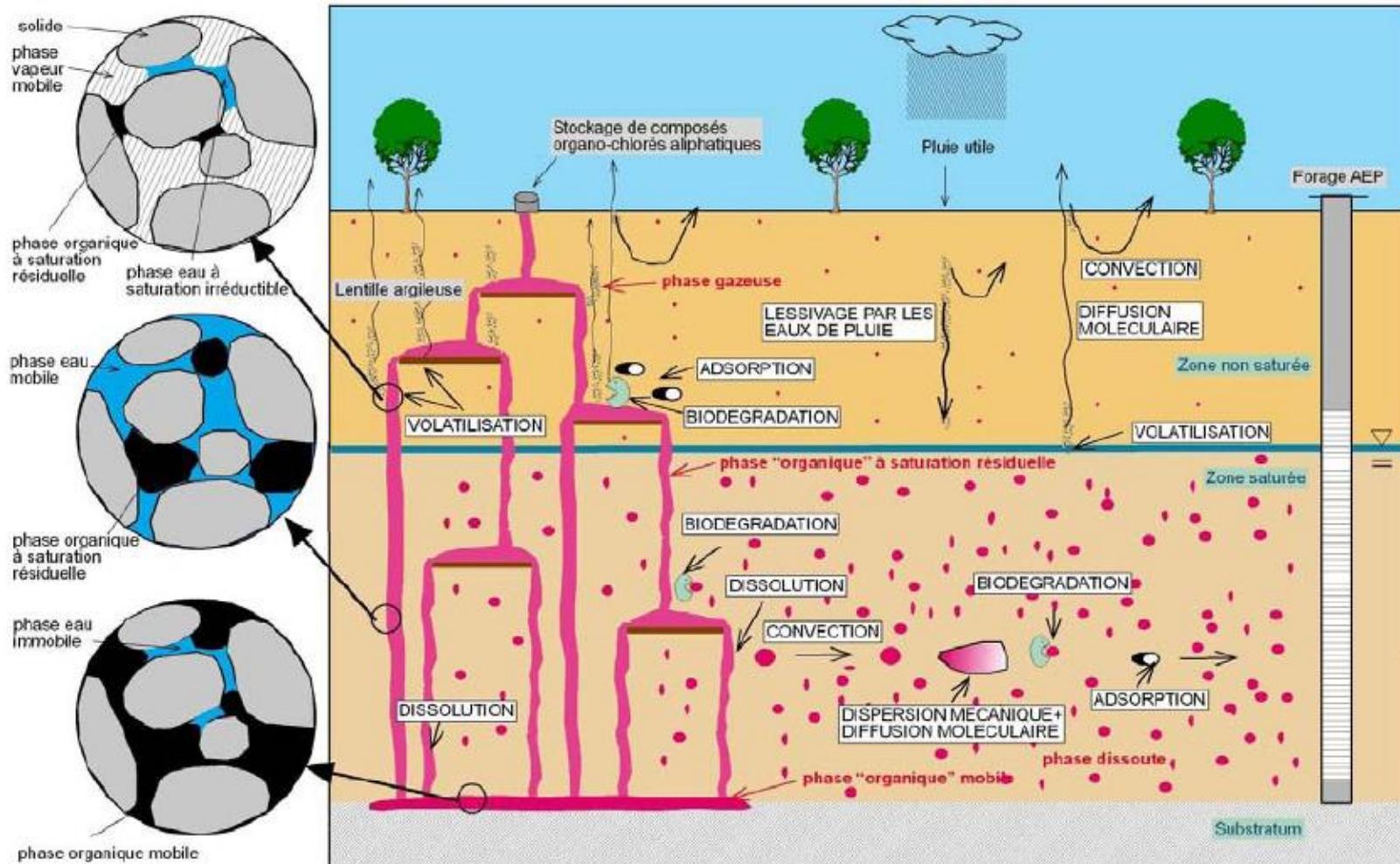


FIGURE 1 - MÉCANISMES EN JEU DANS LE DEVENIR D'UNE POLLUTION DE TYPE ORGANO-CHLORÉS ALIPHATIQUES DANS LE MILIEU SOUTERRAIN

Traitement des solvants chlorés

- Il existe différentes techniques efficaces pour le traitement des sols et nappes polluées par des solvants chlorés
 - Il n'y a pas de technique de traitement universelle
- ↳ Le traitement doit être défini en fonction d'une multitude de paramètres :
- Contexte géologique / hydrogéologique
 - Propriétés des substances polluantes (TCE ≠ TCA), nature de la contamination (chronique ≠ accidentelle)
 - Objectifs selon la nature des risques associés à la pollution (cibles AEP / résidentiel / industriel...)
 - Temps / Espace disponible
 - Potentiel de valorisation du site, situation administrative...

Traitement des solvants chlorés

- L'essentiel repose dans la compréhension de la répartition des polluants dans le sous-sol :



IL NE FAUT JAMAIS NEGLIGER LA PHASE DIAGNOSTIC



UN TRAITEMENT QUI S'ENLISE EST LE PLUS SOUVENT LE FAIT D'UNE MAUVAISE APPRECIATION DU PROBLEME



UNE PHASE PILOTE EST SOUVENT INDISPENSABLE POUR LE DIMENSIONNEMENT

Différents types de traitement

- Traitements par extraction : basés sur les propriétés physico-chimiques des polluants → transfert des polluants
- Traitements par injection : traitement des solvants chlorés in situ = réduction ou oxydation pour former des sous-produits de dégradation

Traitements par extraction

Excavation

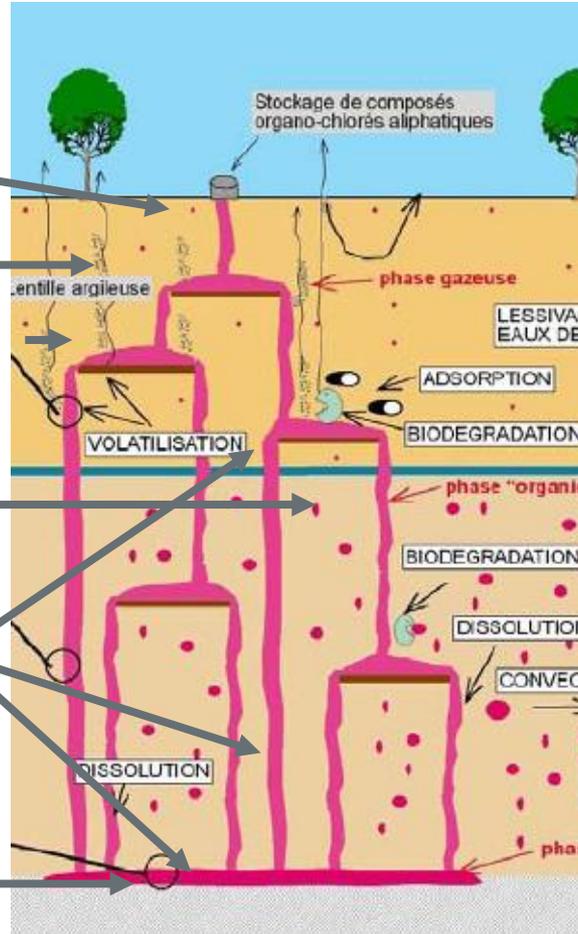
Venting (+Vapeur)

Désorption thermique

Air Sparging

Extraction multi phase

Pompage DNAPL



Pump & Treat

Traitements par extraction : applicabilité

Technique	Domaine d'application	+	-	Risques
Excavation	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Sols non saturés <input checked="" type="checkbox"/> Sols saturés (avec rabattement) <input checked="" type="checkbox"/> Tous types de contaminants 	<ul style="list-style-type: none"> • Délai court • Peut permettre une suppression totale de la source 	<ul style="list-style-type: none"> • Démolition préalable • Coût potentiellement très élevé • ≠ Développement durable 	<ul style="list-style-type: none"> • Source pas totalement extraite • Exposition aux vapeurs - Nuisances olfactives
Venting 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Sols non saturés <input checked="" type="checkbox"/> Tension de Vapeur > 0,5 mm Hg <input checked="" type="checkbox"/> Bonne perméabilité des sols 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution rapide de la source sol si les sols sont perméables 	<ul style="list-style-type: none"> • Les coûts de traitement des gaz peuvent être importants 	<ul style="list-style-type: none"> • Sous dimensionnement : phase pilote nécessaire • Rejets atmosphériques
Désorption thermique in situ (+ venting) 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Sols non saturés <input checked="" type="checkbox"/> Point d'ébullition < 100°C 	<ul style="list-style-type: none"> • Permet le traitement de composés organiques même peu volatils • Diminution rapide de la source si la température souhaitée est atteinte 	<ul style="list-style-type: none"> • Installation complexe et coûteuse • Traitement des gaz chauds extraits 	<ul style="list-style-type: none"> • Sous dimensionnement : phase pilote nécessaire • Rejets atmosphériques • Modification possible de la structure du sol sous l'effet de la chaleur

Traitements par extraction : applicabilité

Technique	Domaine d'application	+	-	Risques
<p>Extraction multiphase</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Zone saturée et non saturée <input checked="" type="checkbox"/> faible perméabilité (<math><10^{-5}</math>m/s) <input checked="" type="checkbox"/> Nappes peu profondes <input checked="" type="checkbox"/> Tension de vapeur > 0,5 mm Hg 	<ul style="list-style-type: none"> • Une seule pompe est nécessaire pour extraire air et eau • Forte dépression > volatilisation importante des solvants adsorbés même en milieu peu perméable 	<ul style="list-style-type: none"> • Domaine d'application restreint • Existence de « zones d'ombre » entre les points d'extraction • Traitement des eaux et des gaz à prévoir • Les coûts de traitement des gaz peuvent être importants 	<ul style="list-style-type: none"> • Sous dimensionnement : phase pilote nécessaire • Rejets atmosphériques • Rejets aqueux
<p>Pump & Treat</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Zone saturée > eau souterraine <input checked="" type="checkbox"/> Confinement – protection de l'aval hydraulique 	<ul style="list-style-type: none"> • Permet de rapidement réduire la migration des polluants 	<ul style="list-style-type: none"> • N'agit que sur la fraction dissoute > ne permet généralement pas de traiter la pollution • Opérations de longue durée 	<ul style="list-style-type: none"> • Durée non prévisible, potentiellement • Remontée des concentrations dans le panache en cas d'arrêt • Rejets
<p>Air sparging</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Zone saturée > eau souterraine <input checked="" type="checkbox"/> Confinement – protection de l'aval hydraulique <input checked="" type="checkbox"/> Traitement de la source 	<ul style="list-style-type: none"> • Opération et maintenance limitée, possible utilisation des fluides du site • Pas de rejets aqueux • Agit sur les fractions dissoutes et adsorbées (volatilisation) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessité d'associer le sparging à un dispositif de capture des gaz (venting) • Opérations de longue durée 	<ul style="list-style-type: none"> • Mauvaise maîtrise des gaz > risques H&S au voisinage : pilote nécessaire • Colmatage des puits par dépôts d'oxydes

Traitements par injection

- Traitements basés sur :
 - L'oxydation des solvants chlorés
 - La réduction des solvants chlorés

Traitements par injection : oxydation

- ISCO (In Situ Chemical Oxidation)
 - Injection d'un oxydant puissant pour « détruire » les polluants : réaction rapide
 - » Fenton (Peroxyde d'hydrogène + Fe _{catalyseur})
 - » Ozone
 - » Permanganate de sodium ou potassium, etc.
 - Les principales limitations :
 - » Détermination du besoin en oxydant
 - » H & S : les oxydants puissants sont très réactifs et donc délicats à stocker, manipuler, injecter
 - » L'oxydation peut modifier la forme chimique de métaux lourds qui peuvent devenir mobilisables (ex : CrIII → CrVI)
 - » L'application des oxydants stérilise le sol → les processus naturels de biodégradation sont stoppés
 - » L'injection doit être très ciblée sur les zones polluées sous peine voir les coûts exploser
 - » Effets « rebond » fréquents et difficiles à anticiper

Traitements par injection : oxydation biologique

- Biodégradation aérobie
 - Injection d'air, de nutriments
 - Applicable uniquement aux solvants avec 1 à 2 atomes de chlore

- Biodégradation cométabolique
 - Injection d'air, de nutriments et d'un cométabolite (butane, propane, toluène (!))
 - A priori applicable à tout type de solvants chlorés
 - La consommation du cométabolite permet l'oxydation concomitante du polluant

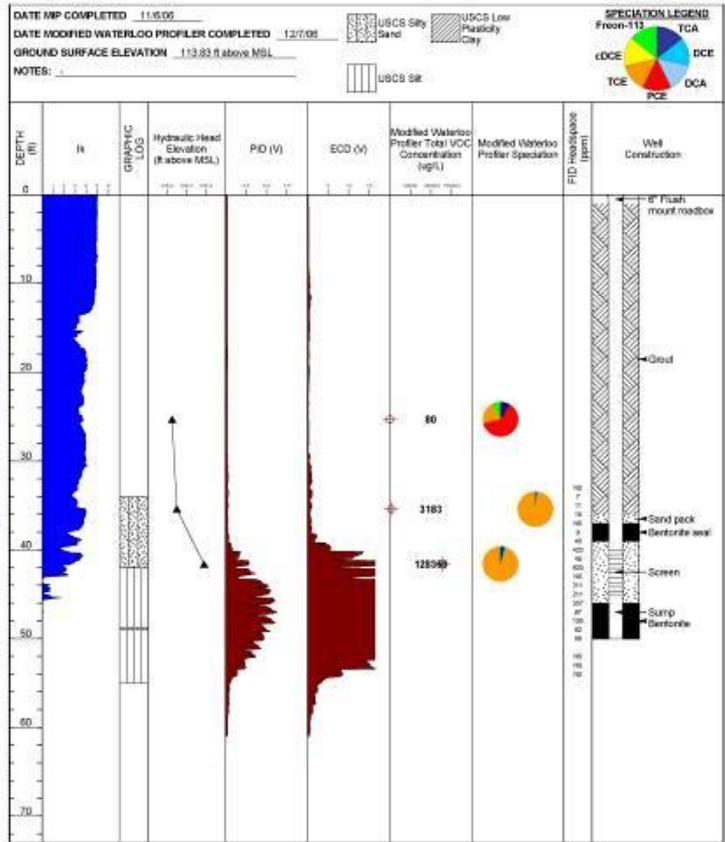
Traitements par injection : réduction

- Réduction biologique
 - Instauration de conditions favorables au développement de bactéries qui utilisent les solvants chlorés comme substrat
 - Processus indirect : injection de substrats carbonés facilement assimilables par la flore aérobie > consommation de l'oxygène, production d'H₂ et mise en place de conditions réductrices
 - Principales limitations :
 - » L'ensemble des micro-organismes nécessaires peut ne pas être présent > accumulation de substances filles toxiques
 - » Compétition avec d'autres accepteurs d'électrons (fer, nitrates, sulfates notamment)
 - » Les cinétiques sont lentes > peut être incompatible avec une nécessité de confiner la pollution
 - » Production potentielle de CH₄ et/ou H₂S
- Réduction chimique
 - Injection directe de réducteurs puissants (ex : Fer Zérovalent)

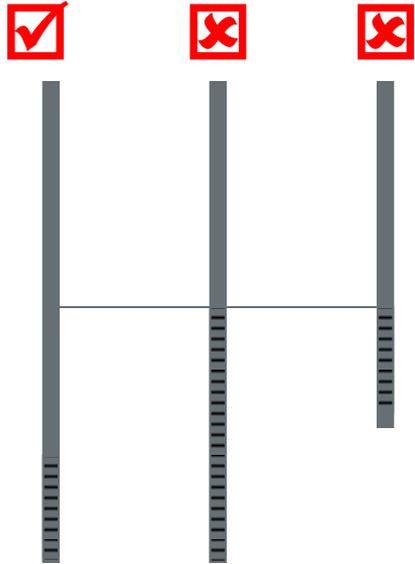
Dépollution – Points clefs (1/5)

- Le diagnostic doit permettre une connaissance suffisante du site pour permettre de choisir une technique viable
- La technique choisie doit généralement être validée par un essai pilote ou une phase test
- Différentes techniques d'injection sont disponibles et fonctionnent si
 - Le principe actif adapté entre en contact avec le polluant en quantité suffisante et pendant suffisamment longtemps

Dépollution - Points clefs (2/5)



Injection ISCO



Dépollution – Points clefs (3/5)

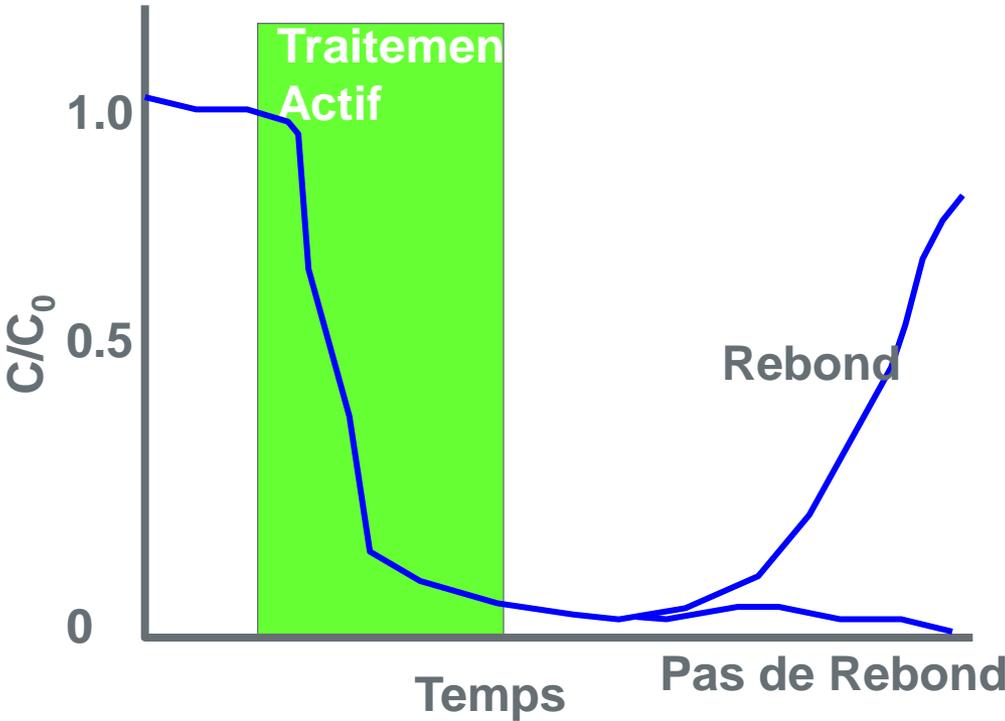
- Une technique in situ correctement dimensionnée permet généralement la réduction du problème d'un ordre de grandeur (90% d'abattement)
- Pour poursuivre la dépollution au-delà il est souvent nécessaire de mettre en œuvre une combinaison de techniques
- Attention aux effets « rebond »

Dépollution – Points clefs (4/5)



- Présence de phase libre : DNAPL
 - mesure directe rarement possible
 - indirecte : présence de concentrations > 1% solubilité
 - » PCE : > 1,5 mg/L
 - » TCE : > 11 mg/L
- Supprimer complètement une phase libre est très difficile
> la stratégie de traitement et les objectifs retenus doivent être adaptés en conséquence

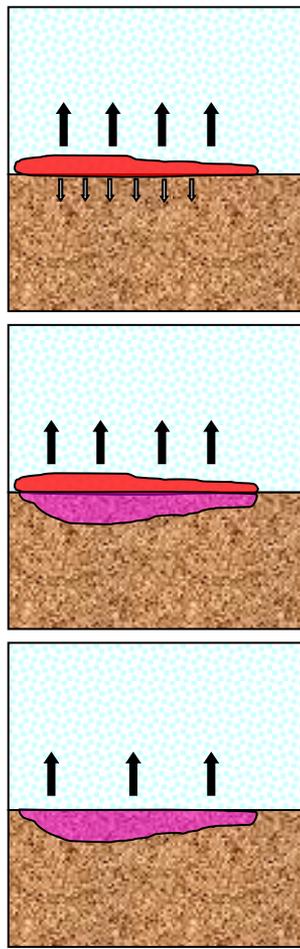
Dépollution – Points clefs (5/5)



① Déversement :
dissolution et
imprégnation

② Migration par
capillarité dans
la matrice peu
perméable

③ Traitement
incomplet de la
pollution :
dissolution
progressive à
partir de la
matrice



Questions ?

Rachel Pecci
Principal Consultant
Agence de Paris
13 rue Faidherbe
75011 Paris
Tél. 01 53 24 10 27

rachel.pecci@erm.com

www.erm.com