

**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

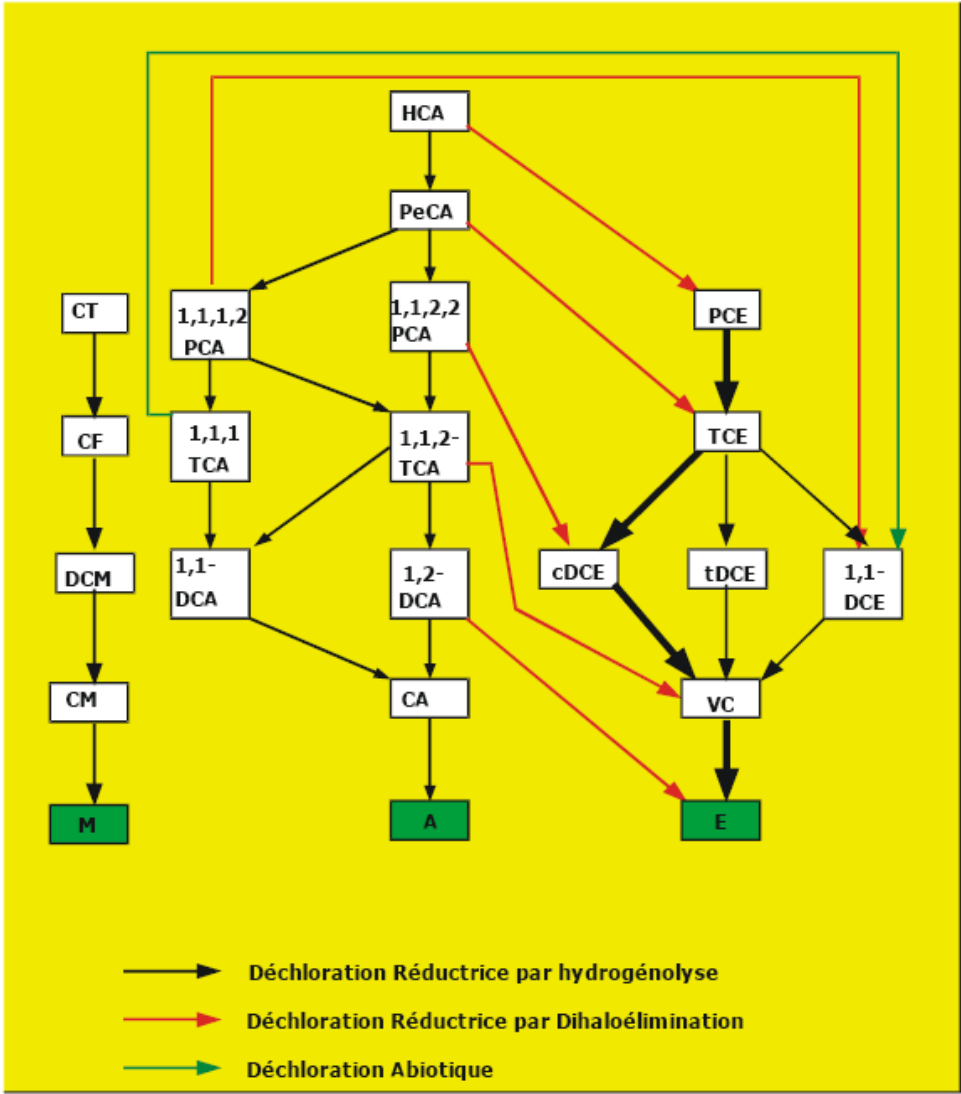
# Quelques mots sur les solvants chlorés

---

- 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

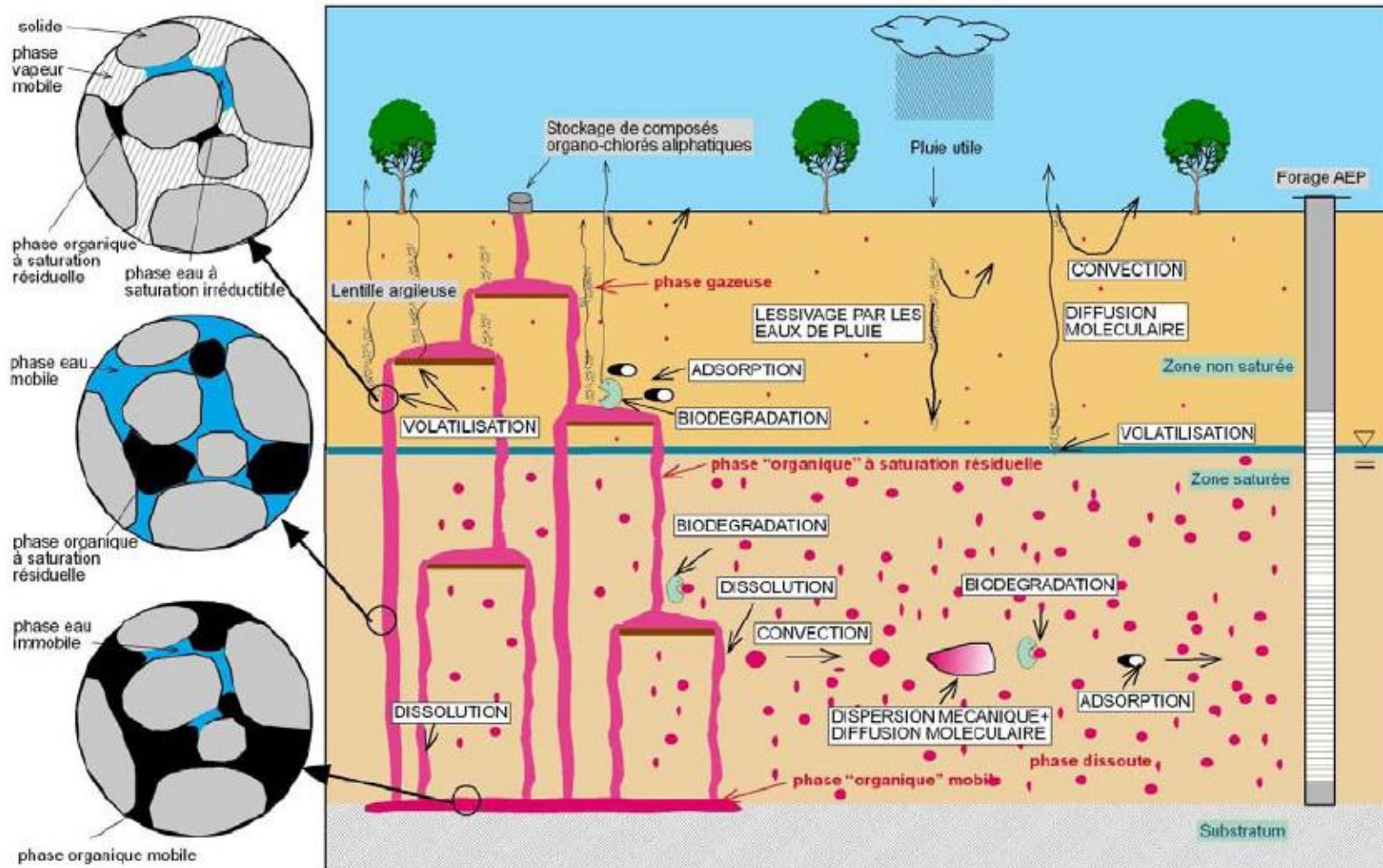


FIGURE 1 - MÉCANISMES EN JEU DANS LE DEVENIR D'UNE POLLUTION DE TYPE ORGANO-CHLORÉS ALIPHATIQUES DANS LE MILIEU SOUTERRAIN

# 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

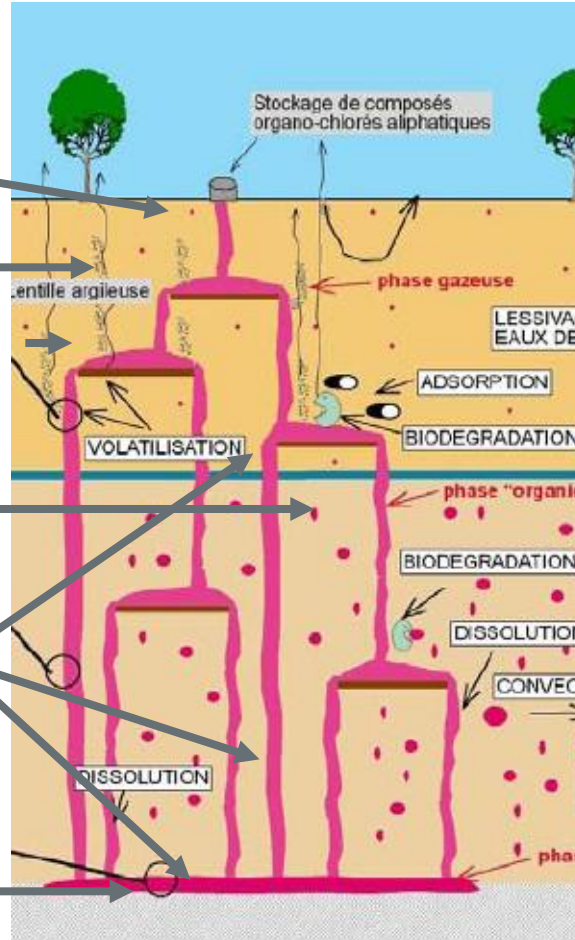
Venting (+Vapeur)

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

# Traitements par extraction : applicabilité

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

# 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 <sub>catalyseur</sub>)
    - » 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'H<sub>2</sub> 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 CH<sub>4</sub> et/ou H<sub>2</sub>S
- Réduction chimique
  - Injection directe de réducteurs puissants (ex : Fer Zérovalent)

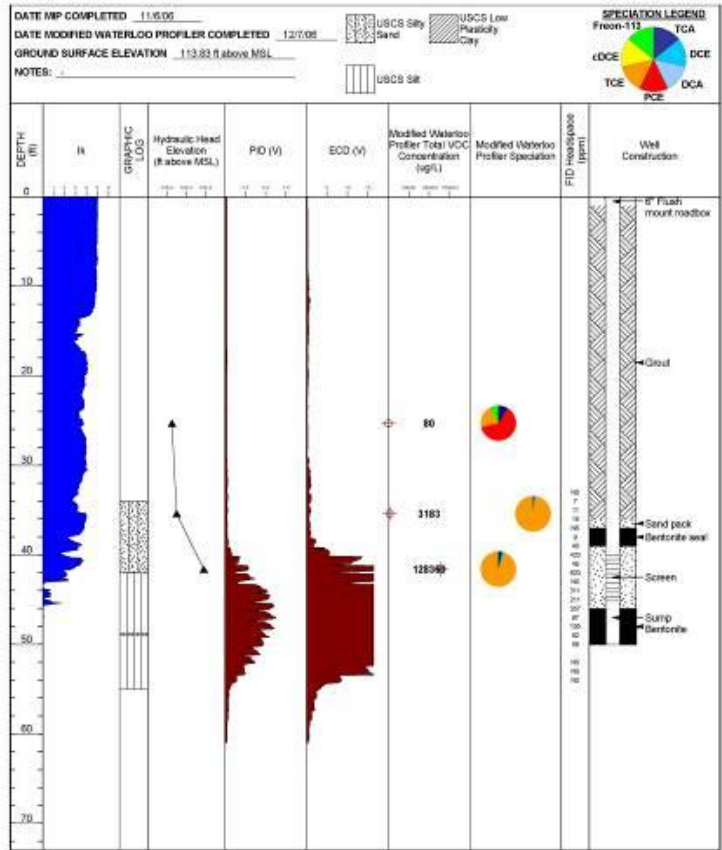
# Dépollution – Points clefs (1/5)

---

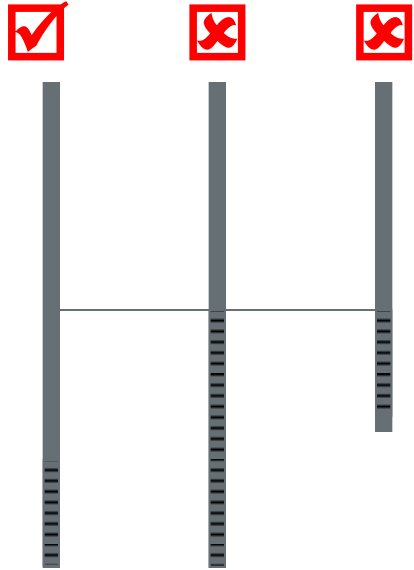
- Le diagnostic doit permettre une connaissance suffisante du site pour permettre de choisir une technique viable
- La technique choisie doit généralement être validée par un essai pilote ou une phase test
- Différentes techniques d'injection sont disponibles et fonctionnent si
  - Le principe actif 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 »

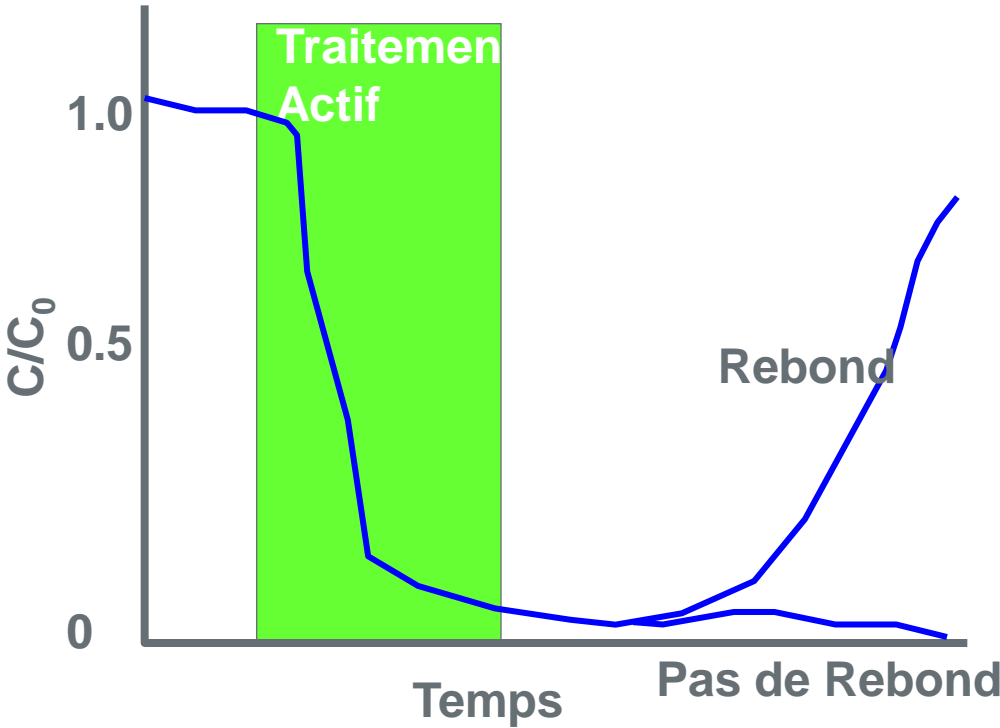
# Dépollution – Points clefs (4/5)

---

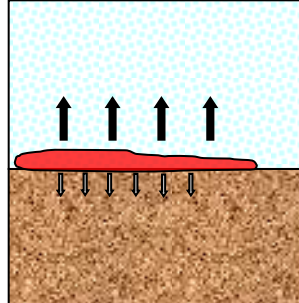


- Présence de phase libre : DNAPL
  - mesure directe rarement possible
  - indirecte : présence de concentrations > 1% solubilité
    - » PCE : > 1,5 mg/L
    - » TCE : > 11 mg/L
- Supprimer complètement une phase libre est très difficile  
> la stratégie de traitement et les objectifs retenus doivent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

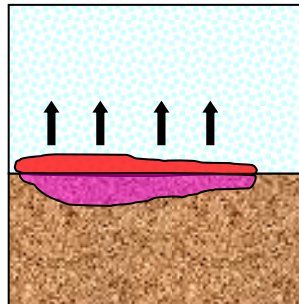
# Dépollution – Points clefs (5/5)



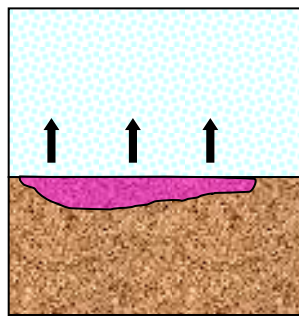
① Déversement :  
dissolution et  
imprégnation



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](mailto:rachel.pecci@erm.com)

[www.erm.com](http://www.erm.com)