

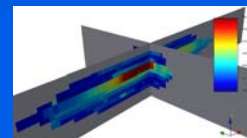
## Projet R&D



### MACAOH

### Modélisation, Atténuation, Caractérisation dans les Aquifères des Organo-Halogénés (2001-2006)

Jean-Marie CÔME - BURGEAP



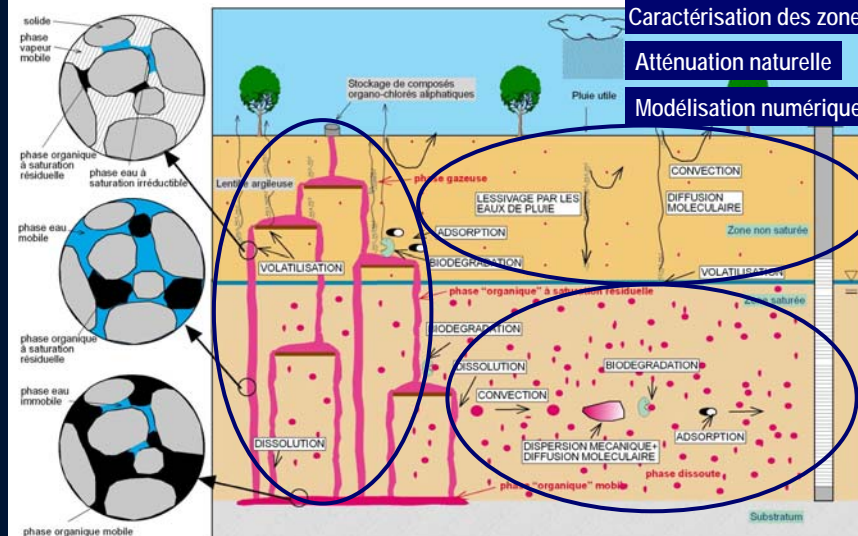
3<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet – 19 septembre 2010



## Les 3 thématiques du projet



### Migration dans le milieu souterrain des composés organo-chlorés aliphatiques

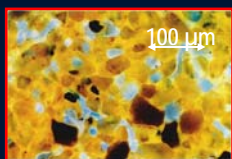


3<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet – 19 septembre 2010

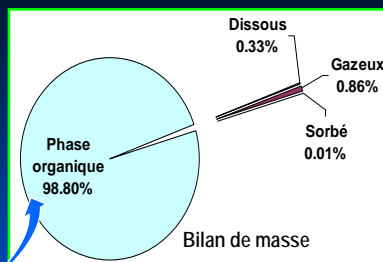




## Concept clé n°1 : phase organique (NAPL)



Sable moyen (porosité 40%)	Système	Saturation résiduelle %	Concentrations TCE PCE mg/kg MS	
TCE/PCE	ZNS	4	10 000	5 400
TCE/PCE	F.Cap.	9	21 500	12 000
TCE/PCE	ZS	11	26 000	14 500
TCE	ZNS	3,5	13 000	-
TCE	F.Cap.	5	18 000	-

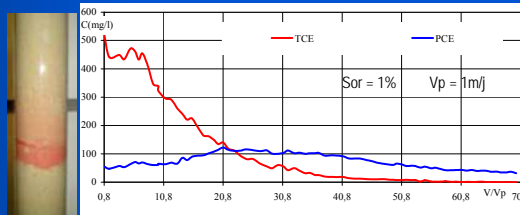


$$S_{TCE}=1100 \text{ mg/l} \quad S_{PCE}=150 \text{ mg/l} \quad \chi_{TCE}=60\% \quad \chi_{PCE}=60\%$$

$$C_{eq \text{ TCE}}=771 \text{ mg/l} \quad C_{eq \text{ PCE}}=45 \text{ mg/l}$$

Approche « mécanique des fluides » des transferts entre phases :

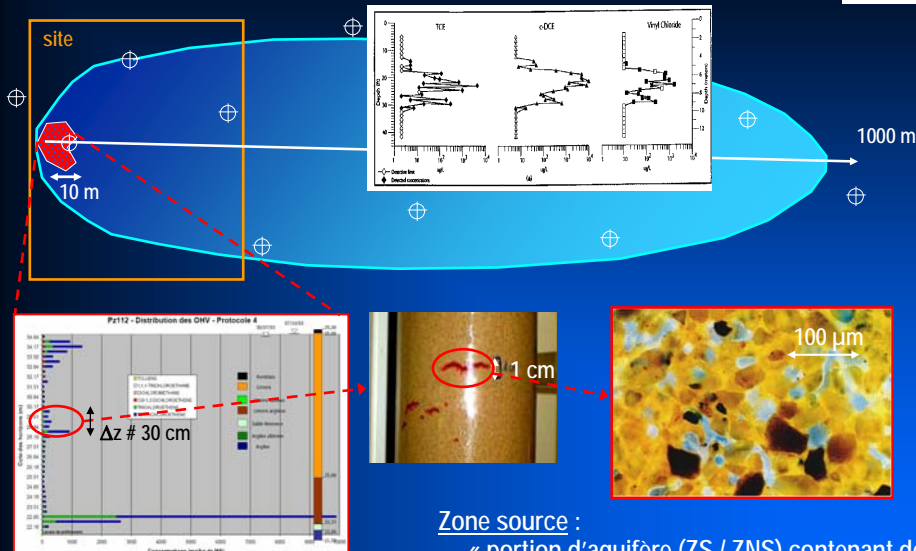
- loi de Raoult
- concentration d'équilibre ( $P_v$ ,  $S$ ,  $H$ , ...)
- modèle équilibre local / non équilibre local



3<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet – 19 septembre 2010



## Concept clé n°2 : dimensions et hétérogénéités



Zone source :

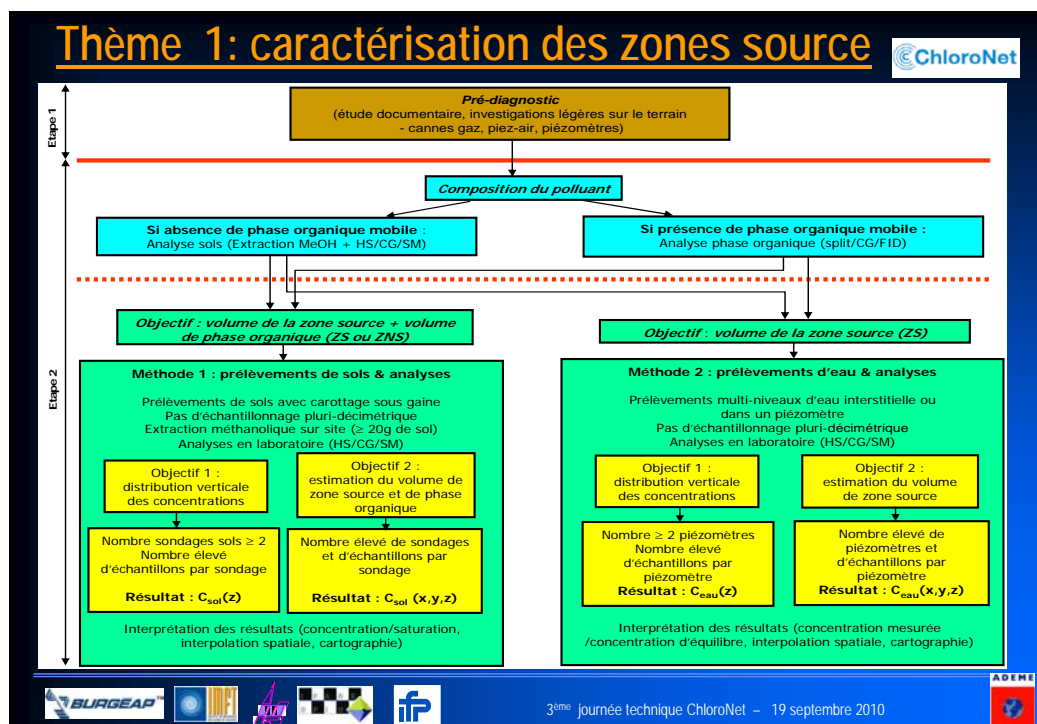
« portion d'aquifère (ZS / ZNS) contenant de la phase organique (NAPL) »



3<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet – 19 septembre 2010

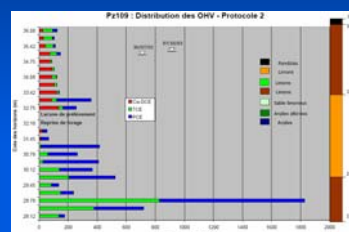
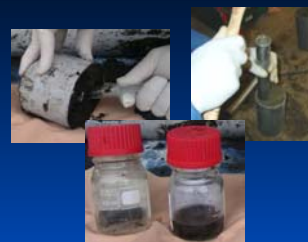






## Protocole de prélèvement et analyse de sols

- Contenu protocole (EPA 5035A / ISO NF 22155)
  - Étape 1 – préparation au labo
    - Standard Interne d'Extraction dans le méthanol
  - Étape 2 - bureau d'études, sur site
    - Sondage carotté sous gaine sur tout l'aquifère
    - Visualisation lithologie + analyses pétrophysiques
    - Echantillonnage par emporte-pièce : # 20g
    - Conservation / extraction sur site dans le méthanol
  - Étape 3 – au laboratoire
    - Analyse GC-MS : C<sub>sol</sub> en mg/kg MS  
+ % récupération du SIE
- Plus value
  - Limitations pertes par volatilisation
  - Choix de la prise d'essai par le BE
  - Traçabilité labo pour le BE



Implication de laboratoires d'analyse  
(ALCONTROL, ANALYTICO, LEM  
LABORATOIRES, WESSLING)



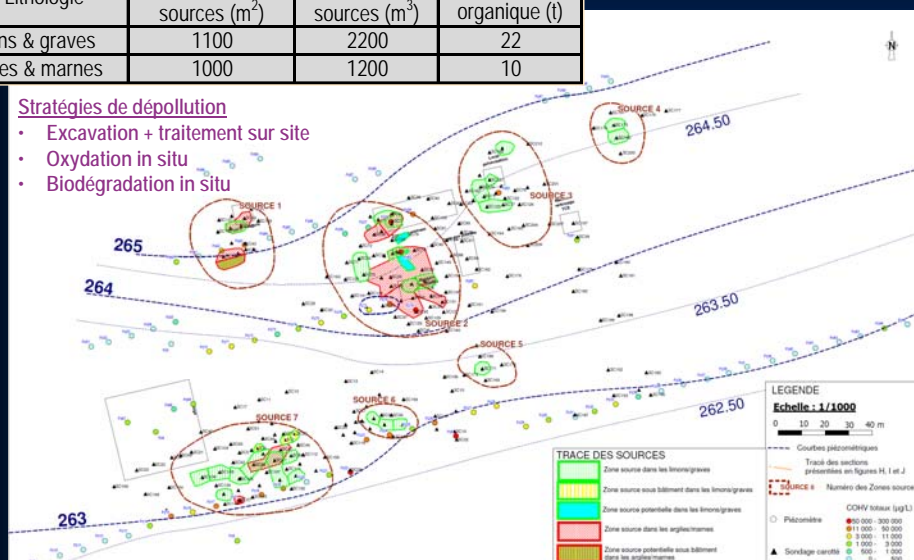
## Exemple : caractérisation des zones source



Lithologie	superficie zones sources (m <sup>2</sup> )	volume zones sources (m <sup>3</sup> )	masse phase organique (t)
limons & graves	1100	2200	22
argiles & marnes	1000	1200	10

### Stratégies de dépollution

- Excavation + traitement sur site
- Oxydation in situ
- Biodégradation in situ



3<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet – 19 septembre 2010



## Thème 2 : atténuation naturelle

### Evaluation des mécanismes d'Atténuation Naturelle

#### Étape 1 - Analyse préliminaire des données

Contexte géographique, géologique, hydrogéologique, hydrographique du site  
Identification des cibles  
Nature, extension spatiale et évolution dans le temps de la pollution  
Modèle conceptuel du site  
Cahier des charges pour l'acquisition de données complémentaires

#### Étape 2 - Evaluation qualitative de la biodégradation

Acquisition des paramètres spécifiques à la biodégradation (6 packs analytiques)  
Identification des mécanismes biologiques  
Expertise des données (à partir de concentrations seuils)

#### Étape 3 - Evaluation quantitative des mécanismes contribuant à l'Atténuation Naturelle

Bilan de masse dans la zone source (ZS et ZNS)  
Bilan de masse dans le panache de composés dissous  
Bilan de masse dans le panache gazeux (au droit d'une zone source ou au droit du panache de composés dissous)

#### Étape 4 - Prévion de l'évolution dans le temps de la pollution

Méthodologie générale (Guide méthodologique MACAOH « Modélisation »)  
Typologie de situations (zone source, panache dissous et panache gazeux)

**Faisabilité et performance de l'ANS comme technique de dépollution pour atteindre des objectifs de dépollution dans un délai fixé**  
**Comparaison avec des techniques « actives »**

### Mise en œuvre de l'Atténuation Naturelle sous Surveillance

#### Étape 5 - Surveillance à long terme des eaux souterraines

Cahier des charges : réseau de mesure, paramètres, fréquence, méthodes d'interprétation  
Phase I : suivi trimestriel sur 2 ans à minima (impact des phénomènes transitoires)  
Phase II : suivi annuel ou pluriannuel à long terme (atténuation de la pollution)  
Interprétation, mise à jour éventuelle du contenu de la surveillance

**Réévaluation périodique de la pérennité de l'ANS et de son adéquation avec les objectifs de dépollution**

**Caractérisation du site et des mécanismes :**  
Convection  
Dispersion  
Diffusion  
Dissolution  
Volatilisation  
Adsorption  
Dégradation abiotique  
Biodégradation  
« Dilution »





## Etape 2 : évaluation qualitative de la biodégradation



Prélèvements d'eau de nappe sur  $\geq 7$  piézomètres

- $\geq 1$  amont, 2 zones source, 2 aval immédiat et 2 en aval plus éloigné

Analyses regroupées en 6 « packs »

- Analyses sur site avec sondes et spectromètre
  - « Pack électrochimie » : pH, T°C, Cond., O<sub>2</sub> dissous, POR
  - « Pack colorimétrie » : Alcalinité, Fe<sup>2+</sup>
- Analyses au laboratoire
  - « Pack volatils » : organo-chlorés, hydrocarbures (BTEX, TMB, ...)
  - « Pack anions » : Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>
  - « Pack M-E-E » : éthène, éthane, méthane
  - « Pack COD » (méthode NPOC)

Information	Paramètre	Taux de déchloration ou seuil de concentration dans l'eau
<b>BIODEGRADATION DES ORGANO-CHLORES</b>		
Performance de la déchloration	Taux de déchloration (%)	< 60%
		de 40 à 60%
		de 20 à 40%
		de 5 à 20 %
Métabolites "inoffensifs"	Ethène + Ethane	< 5%
Produit final	Chlorures	20 à 200 µg/L
<b>CONDITIONS REDOX DE L'AQUIFERE</b>		
Méthanogénèse	Méthane	> 1 mg/L
Réduction des Sulfates	Sulfates	< 20 mg/L
Réduction du fer ferrique (Fe III)	Fer ferreux (Fe II)	> 2 mg/L
Réduction des nitrates	Nitrates	< 1 mg/L
Anaérobiose	Oxygène dissous (OD)	< 0,5 mg/L
Pression électronique	Potentiel d'Oxydo-Réduction (POR avec électrode Ag/AgCl)	< +100 mV (Eh)
	Alcalinité	< -100 mV (POR)
<b>SOURCES DE CARBONE</b>		
Carbone Organique Dissous "Non Purgeable"	COD-NPOC	> 10 mg/L
Carbone "Purgeable"	Composition carbonée : mesure des COV autres que les organo-chlorés (BTEX + Alkyl-benzènes + naphthalène)	> 2 mg/L

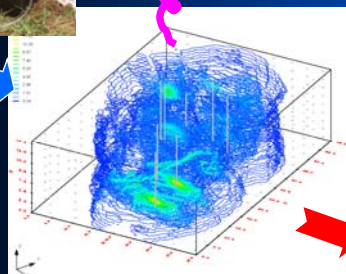


3<sup>ème</sup> journée tec

## Etape 3 : évaluation quantitative de l'AN Exemple d'application pour la zone source



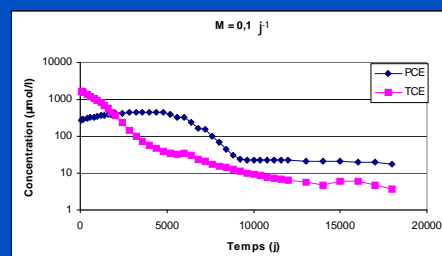
$\Phi_{\text{vapeurs}} = 4100 \text{ moles / an}$   
(3 chambres à flux)



$\Phi_{\text{dissous}} = 250 \text{ à } 340 \text{ moles / an}$   
(9 piézomètres)

Caractéristiques zone source

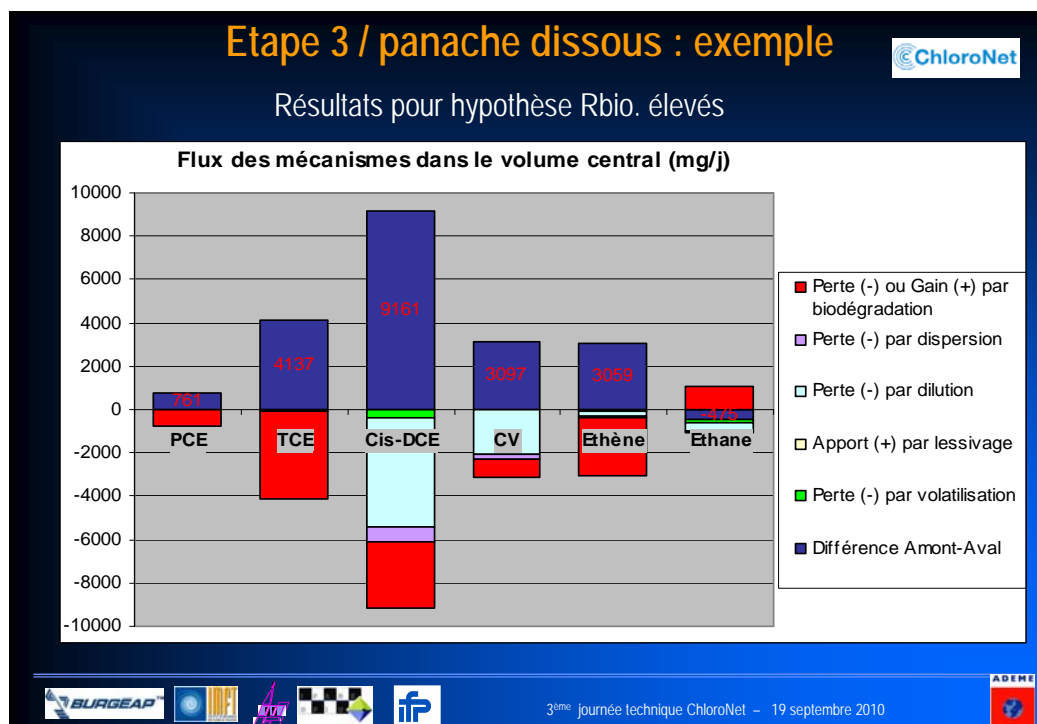
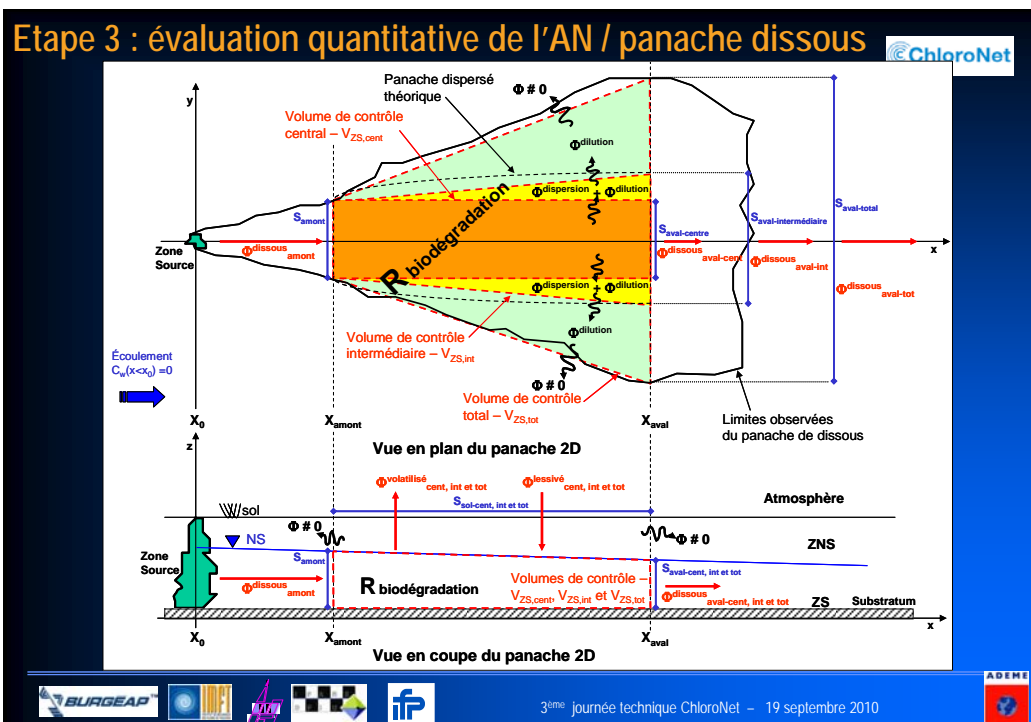
- Volume zone source = 24 000 m<sup>3</sup>
- Masse de NAPL = 10 m<sup>3</sup>
- Composition NAPL : PCE = 72% TCE = 28%
- Masse volumique = 1.58 kg/L
- Masse molaire = 155 g/mol
- ➔ 102 000 moles de phase organique



3<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet – 19 septembre 2010









## Thème 3 : modélisation

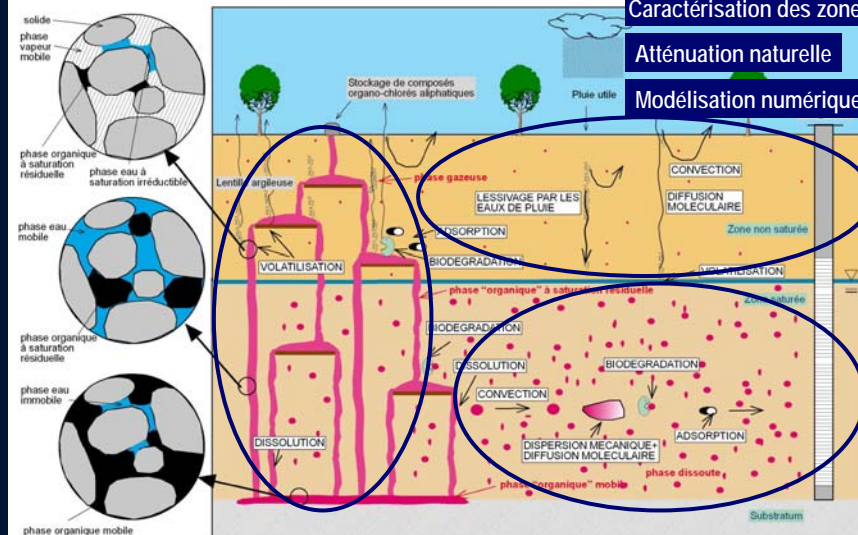
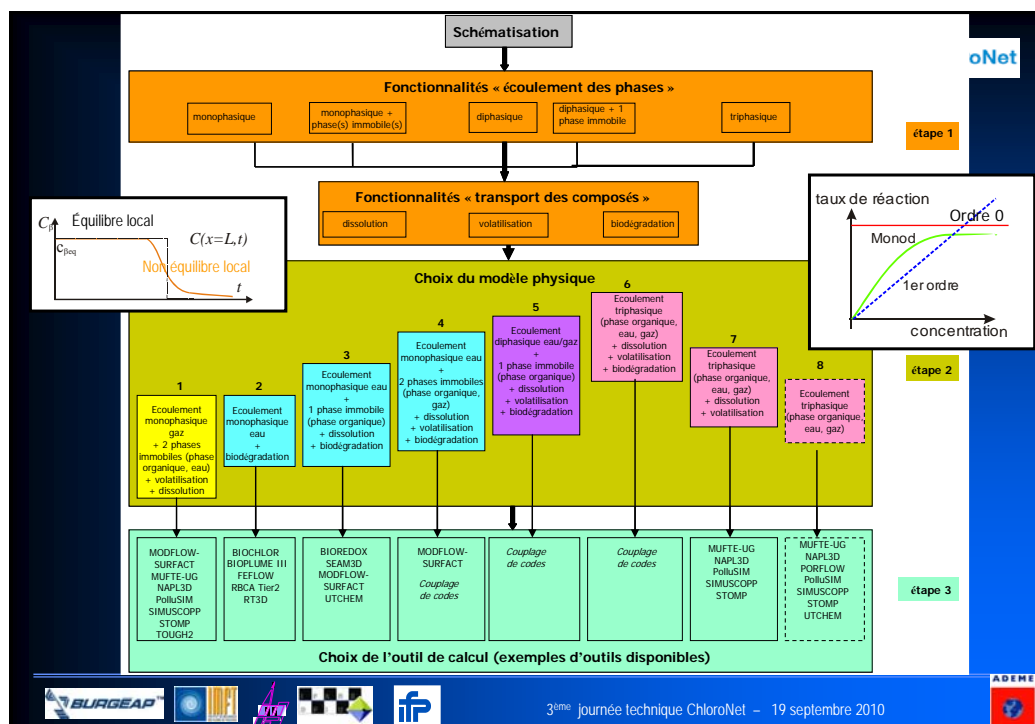


### Migration dans le milieu souterrain des composés organo-chlorés aliphatiques

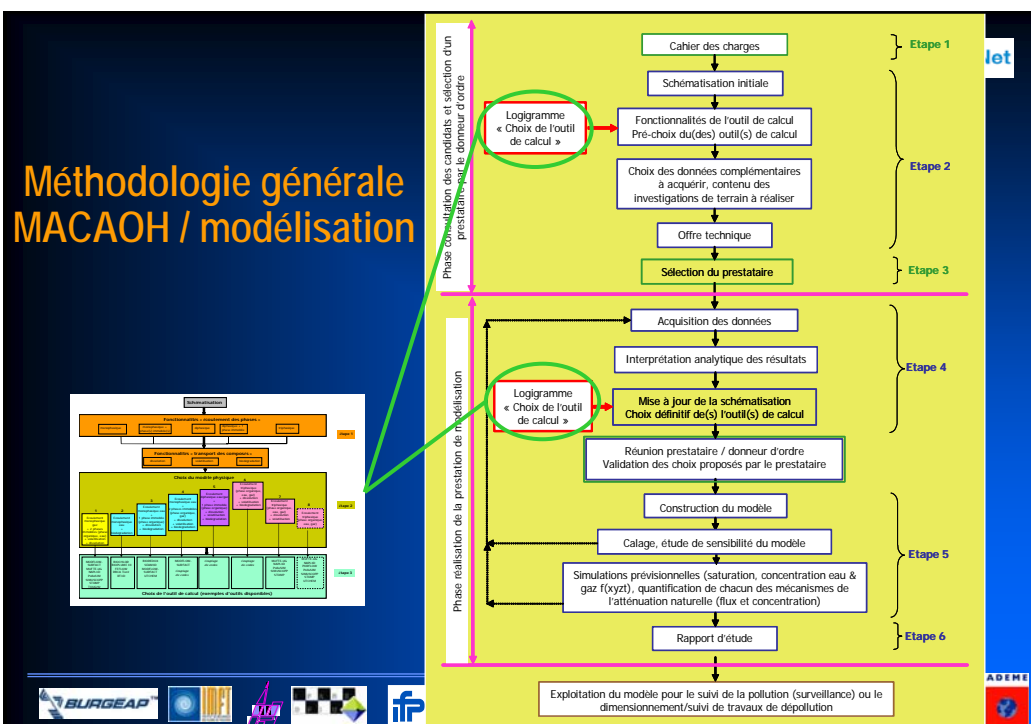
Caractérisation des zones source

Atténuation naturelle

Modélisation numérique

3<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet – 19 septembre 2010





## Paramètres nécessaires en f° du type de modèle

Paramètres	Modèle1	Modèle2	Modèle3	Modèle4	Modèle5	Modèle6	Modèle7	Modèle8
<b>Petrophysique, relations pression capillaire/saturation et perméabilité relative/saturation</b>								
Conductivité hydraulique	(X)	X	X	X	X	X	X	X
Porosité totale	X	X	X	X	X	X	X	X
Porosité cinématique		X	X	X	X	X	X	X
Relations pression capillaire / saturation eau-gaz					X	X	X	X
Saturation résiduelle en phase organique	X		X	X	X	X	X	X
Saturation irréductible en eau	X		(X)	X	X	X	X	X
Saturation résiduelle en gaz	X			X	X	X	X	X
Densité de la phase organique					X	X	X	X
Viscosité de la phase organique					X	X	X	X
Densité de la phase gazeuse	X			X	X	X	X	X
<b>Dispersion, diffusion, tortuosité</b>								
Dispersivité zone source ( $\alpha_T$ )		(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	
Dispersivité panache ( $\alpha_L$ , $\alpha_T$ )		X	X	X	X	X	X	
Diffusion moléculaire dans l'eau pour chaque composé	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	
Diffusion moléculaire dans l'air pour chaque composé	X			X	X	X	X	
Tortuosité	X			X	X	X	X	
<b>Thermodynamique multi-composés</b>								
Fraction molaire de chaque composé dans la phase organique	X		X	X	X	X	X	
Masse molaire de chaque composé	X		X	X	X	X	X	
Solubilité de chaque composé	X		X	X	X	X	X	
Pression de vapeur saturante de chaque composé	X			X	X	X	X	
Constante de Henry de chaque composé	X			X	X	X	X	
Coefficient d'échange pour la dissolution	(X)		X	X	X	X	X	
Coefficient d'échange pour la volatilisation	X			X	X	X	X	
Coefficient de partage sol/eau	(X)	X	X	X	X	X	X	
Fraction de carbone organique		(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	

/ ...



## Mode d'acquisition des paramètres



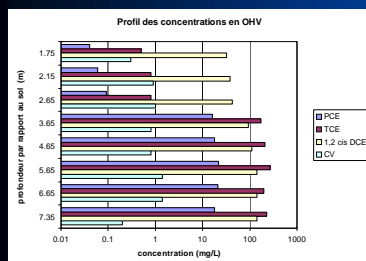
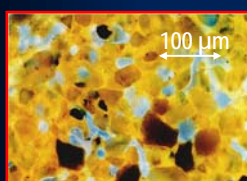
Paramètres	Mesures terrain	Mesures de laboratoire	Données de la littérature	Données de calage	Commentaire
« xx » : méthode à mettre en œuvre de préférence « x » : méthode utilisable					
Porosité totale	XX	X			Mesure en laboratoire si échantillon non destructuré Porosité totale ouverte (accessible à la convection et à la diffusion)
Porosité cinématique	XX				Terrain : traçage (formellement) Dans le cas d'une nappe libre, approximation de la porosité cinématique par défaut à l'aide du coefficient d'emmagasinement obtenu par essai de pompage
Relations pression capillaire / saturation eau-gaz		X	XX		Nécessaire pour les modèles des types 5 à 8. Grande sensibilité aux paramètres. Problème de la représentativité des données de la littérature : Bradford <i>et al.</i> [9, 10]. Attention : la mouillabilité peut être variable selon la lithologie
Dispersivité zone source ( $\alpha_T$ )				X	Petite échelle / panache. Intérêt pour les directions Y et Z.
Dispersivité panache ( $\alpha_L$ , $\alpha_T$ )	XX		X	X	Terrain : traçage (formellement) Littérature : courbes dispersivité longitudinale apparente / distance injection/restitution Calage : à partir de la géométrie du panache d'organochlorés + modélisation (si modification saisonnière de la direction des écoulements par exemple)
Tortuosité	X		X		1 valeur par niveau lithologique. Fonction de S si multiphasique, méthode semi-empirique. Littérature : Werner <i>et al.</i> [90].
Fraction molaire de chaque composé dans la phase organique	XX				Variabilité spatiale au temps t Méthodes présentées dans le guide méthodologique MACAOH « Caractérisation des zones sources »
Masse molaire de chaque composé			XX		
Solubilité de chaque composé		X	XX		Multicomposés : utilisation de la loi de Raoult en général, si besoin coefficient d'activité fonction de la température



3<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet – 19 septembre 2010



## Contenu des guides MACAOH & bénéfices escomptés



### Contenu des guides

- *approche « globale »*
- description des concepts
- logigrammes d'aide à la décision
- protocoles de mesures/ échantillonnage/ analyses
- outils d'interprétation des données
- exemples d'application

### Bénéfices opérationnels

- Optimisation & sécurisation études sites pollués
  - éviter de multiples études non conclusives
- Sécurisation et réduction coûts travaux de dépollution
  - choix d'une solution de gestion du site
  - volumes zones sources & NAPL, quantification des mécanismes d'AN, ...



3<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet – 19 septembre 2010

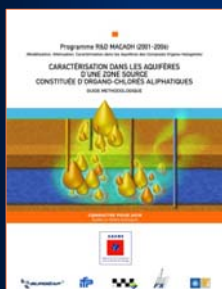




## Pour aller plus loin ...



3 guides ADEME qui sont des outils de gestion des sites pollués du MEEDDM  
3 résumés étendus Français / Anglais



Guides téléchargeables sur [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr) ou sur  
[www.sites-pollues.developpement-durable.gouv.fr](http://www.sites-pollues.developpement-durable.gouv.fr)

Formation MACAOH ([www.burgeap.fr](http://www.burgeap.fr))



3<sup>ème</sup> journée technique ChloroNet – 19 septembre 2010

