



Guide des hydrocarbures chlorés (HCC)

Propriétés et comportement dans l'environnement

ChloroNet, un projet de l'Office fédéral de l'environnement, du canton de Zurich et du canton de St-Gall

Mai 2008 (Version actualisée septembre 2009)

Impressum

Auteurs BMG Engineering AG, Schlieren: C. Munz, A. Häner
sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement OFEV

Année Mai 2008 (version actualisée: septembre 2009)

Table des matières

Préface	1
1 Utilisation des hydrocarbures chlorés (HCC)	1
1.1 Historique et quantités produites	1
1.2 Applications des hydrocarbures chlorés	3
2 Propriétés des hydrocarbures chlorés	6
2.1 Masse molaire	6
2.2 Densité	6
2.3 Tension de vapeur	7
2.4 Solubilité dans l'eau	7
2.5 Répartition air/eau	7
2.6 Répartition solide/eau	8
2.7 Diagrammes synoptiques des propriétés des substances	9
3 Comportement dans l'environnement	13
3.1 Répartition dans le sous-sol saturé et insaturé	13
3.1.1 Zone insaturée	15
3.1.2 Sous-sol saturé (nappe souterraine)	17
3.2 Transport	18
3.2.1 Infiltration et volatilisation (sous-sol insaturé)	18
3.2.2 Transport dans les nappes souterraines	20
3.2.3 DNAPL	21
3.3 Biodégradabilité	22
3.3.1 Conditions requises	23
3.3.2 Voies de dégradation	24
3.3.3 Cinétique	26
3.4 Recommandations pour les investigations sur le terrain	28
4 Valeurs indicatives et valeurs limites	28
4.1 Bases et détermination	29
4.1.1 Facteur de pente	30
4.1.2 Dose de référence	31
4.1.3 Concentration maximale au poste de travail	31
4.1.4 Concentration prévue sans effet	31
5 Sources d'informations recommandées	33
6 Fiches techniques des substances	34

Préface

Dans le présent guide, on entend par « hydrocarbures chlorés » les hydrocarbures chlorés aliphatiques au sens de l'annexe 1 de l'ordonnance sur l'assainissement des sites pollués (ordonnance sur les sites contaminés, OSites) c'est-à-dire les hydrocarbures halogénés « classiques », généralement volatils (HCHV), y compris le 1,2-dibromoéthane. Il ne traite pas des composés chlorés aromatiques (p. ex. chlorobenzènes, PCB) ni des composés chlorés aliphatiques substitués par d'autres groupes fonctionnels (p. ex. amines).

1 Utilisation des hydrocarbures chlorés (HCC)

Ce chapitre donne un aperçu des conditions dans lesquelles des hydrocarbures chlorés ont pollué le sous-sol et les nappes souterraines. Il en retrace l'historique, l'évolution des quantités produites et les principales applications. Ces connaissances sont importantes pour évaluer le risque (la probabilité d'occurrence) d'une pollution aux hydrocarbures chlorés dans le sous-sol d'un site compte tenu de ses utilisations antérieures.

1.1 Historique et quantités produites

Quelques hydrocarbures chlorés ont été synthétisés au XIX^e siècle déjà (p. ex. le tétrachloréthène par Michael Faraday en 1821). Mais leur utilisation commerciale n'a débuté en Europe que dans les années 1920.

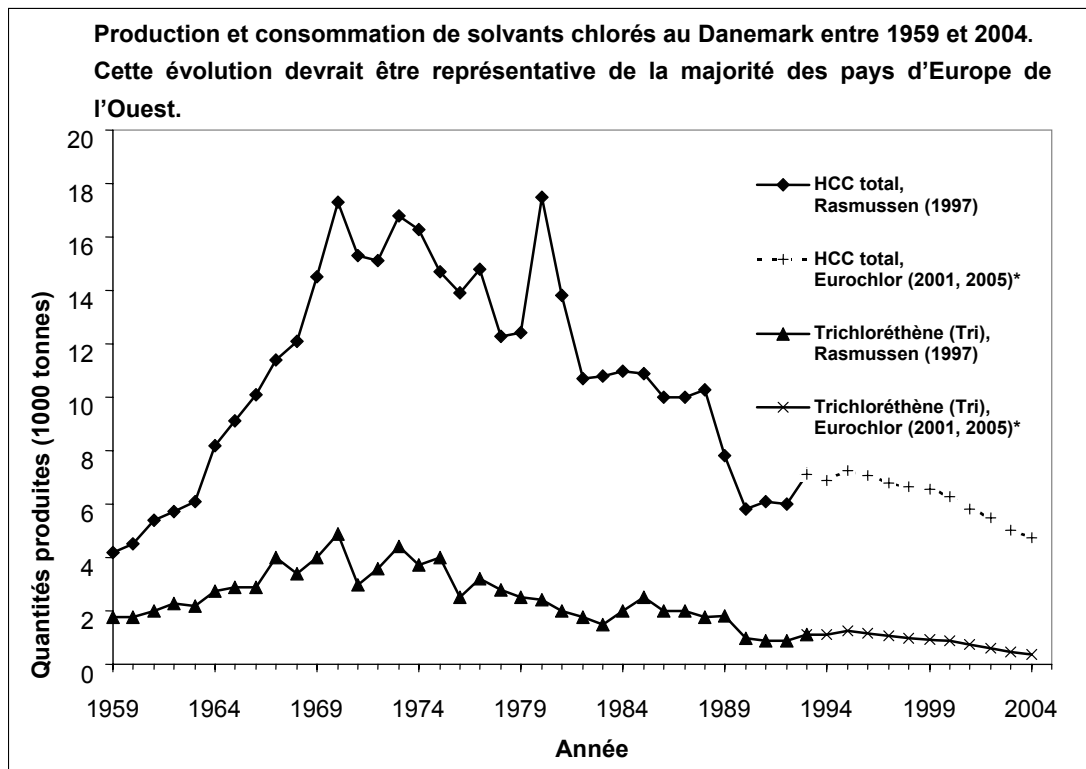
Les propriétés remarquables de ces substances comme solvants pour la graisse, l'huile et d'autres substances organiques ont été perçues rapidement et toujours plus exploitées dans des applications commerciales (p. ex. dégraissage du métal et nettoyage chimique des vêtements). A cela s'ajoute le fait que les hydrocarbures chlorés ne dégagent aucune odeur désagréable (contrairement aux benzines), que ces liquides sont peu inflammables en conditions normales, relativement faciles à manipuler malgré leur volatilité (sauf le chlorure de vinyle) et qu'ils ont toujours été bon marché.

La production d'hydrocarbures chlorés a fortement augmenté entre le début des années 1940 et la fin des années 1970 (fig. 1 ci-dessous), notamment parce que les industries chimique, pharmaceutique et alimentaire ont également exploité leurs qualités de solvants pour extraire et synthétiser de nombreuses autres substances (p. ex. extraction de caféine à partir de grains de café ou de substances odorantes à partir de plantes, transformation d'huiles et de graisses, synthèse d'insecticides, etc.). Le chloroforme a même été utilisé comme anesthésique durant cette période.

Jusqu'à cette époque (fin des années 1970), les hydrocarbures chlorés étaient fréquemment utilisés dans des systèmes plus ou moins ouverts, si bien qu'il était généralement presque impossible de les manipuler et de les éliminer d'une manière appropriée selon les critères actuels. Le danger qu'ils peuvent présenter pour les personnes et pour l'environnement (concernant notamment la protection du travail

et les émissions / immissions dans l'air et les eaux) fut également décelé au cours des années 1970.

Dès le début des années 1980, les hydrocarbures chlorés ont été utilisés toujours plus fréquemment dans des systèmes en circuit fermé ou partiellement remplacés par d'autres solvants moins problématiques (p. ex. dioxyde de carbone supercritique, paraffines synthétiques, alcools, composés d'esters, etc.). Certains HCC ont même été interdits dans l'intervalle (l'utilisation de tétrachlorométhane et de 1,1,1-trichloréthane est par exemple prohibée depuis 1996, à quelques exceptions près, car ces substances provoquent une dégradation significative de la couche d'ozone stratosphérique).



* Les chiffres concernant le Danemark depuis 1994 ont été estimés à partir des données portant sur la production (somme des dichlorométhane (DCM), trichloréthène (Tri) et tétrachloréthène (Per)) d'Europe occidentale durant la même période, en partant de l'hypothèse que le rapport de 1993 entre les deux séries de chiffres est resté constant depuis lors.

Il en résulte que la production (et la consommation) d'hydrocarbures chlorés est en baisse en Europe depuis le milieu des années 1980 (figure ci-dessus).

La mise en œuvre croissante d'appareils fermés avec récupération et recyclage des hydrocarbures chlorés ainsi que l'entrée en vigueur de prescriptions écologiques pertinentes (loi fédérale sur la protection de l'environnement dès le 1^{er} janvier 1985) ont permis de réduire de manière significative le risque de nouvelle contamination du sous-sol et des nappes souterraines durant les années 1980 et 1990.

Les sites importants du point de vue du traitement des sites contaminés sont ceux qui ont hébergé une activité industrielle notable entre 1920 environ et 1990 au maximum, la période la plus critique étant celle de 1950 à 1985.

1.2 Applications des hydrocarbures chlorés

Des hydrocarbures chlorés ont été utilisés principalement:

- comme détergents et solvants (dégraissage, nettoyage à sec);
- comme solvants dans la fabrication chimique;
- comme solvants dans certains produits (p. ex. peintures, adhésifs);
- dans la fabrication de plastiques (chlorure de polyvinylidène [PVDC] et surtout chlorure de polyvinyle [PVC]).

Les deux tableaux suivants donnent un aperçu des applications possibles des hydrocarbures chlorés, classées selon les branches d'activité et les processus mis en œuvre.

Notons que différents processus peuvent être mis en œuvre dans une seule et même branche et qu'un processus donné peut recourir à plusieurs HCC différents.

Il est par conséquent recommandé de toujours rechercher des informations aussi précises que possible au sujet des activités antérieures des entreprises examinées. Les renseignements fournis directement par d'anciens collaborateurs ou par des collaborateurs de longue date, qui sont au courant des manipulations et de la consommation effective de solvants à leur époque, ont une grande valeur. Lorsqu'on ne dispose pas d'informations aussi détaillées, l'estimation des pollutions éventuellement causées au sous-sol par les processus appliqués fournit généralement un tableau plus précis que l'appartenance à une branche d'activité.

Aperçu des applications possibles de HCC par branches

Branches*	1,2-dibromoéthane	1,1-dichloroéthane	1,2-dichloroéthane	1,1-dichloroéthène	Cis-1,2-dichloroéthène	Trans-1,2-dichloroéthène	Dichlorométhane	1,2-dichloropropane	1,1,2,2-tétrachloroéthane	Tétrachloroéthène	Tétrachlorométhane	1,1,1-trichloroéthane	Trichloroéthène	Trichlorométhane	Chlorure de vinyle
Branche automobile	+	+	+	+			+	+	+	++	+	++	++		
Commerce de détail de carburants et combustibles liquides, station-service	+		+					+		+					
Commerce de gros de produits pétroliers	+		+					+		+					
Industrie du pétrole	+	+	+	+			+	+	+	+	+	++	++		
Production de textiles, vêtements et lavage		+		+	+	+	++	+	+	++	+	++	++		
Blanchisserie, nettoyage à sec					+	+	+	+		++	+	+	+		
Industrie du bois		+		+			+	+	+	+	+	++	+		
Produits en ciment, chaux, plâtre, béton, génie civil et construction, entreprises de construction	+	+	+	+	+	+	+	+	+	++	+	++	+		
Construction de fourneaux en catelles et cheminées		+		+	+	+	+	+	+	++	+	++	++		
Produits en céramique, fabrications en verre	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+		
Horlogerie, mécanique de précision		+		+	+	+	+	+	+	++	+	++	++		
Production et transformation de métaux non ferreux, fonderie	+	+	+	+			+	+	+	++	+	++	++		
Aciérie, atelier de laminage	+	+	+	+			+	+	+	++	+	++	++		
Commerce de gros / de détail	voir note au bas du tableau														
Réparation des biens de consommation		+		+	+	+	+		+	++	+	++	++		
Commerce de gros de fer, acier, métaux non ferreux, produits semi-finis de métaux, produits de métaux	+	+	+	+	+	+	+	+	+	++	+	++	++		
Électrotechnique, électronique, mécanique de précision, optique		+		+	+	+	++	+	+	++	+	++	++	+	
Construction de machines pour la production, construction de machines de bureau et d'installations informatiques		+		+	+	+	++	+	+	++	+	++	++	+	
Commerce de récupération	voir note au bas du tableau														
Construction de machines et véhicules, machines et tracteurs agricoles, machines pour la construction	+	+	+	+			+	+	+	++	+	++	++		
Atelier de composition et de reproduction graphique, imprimerie, reliure		+		+	+	+	++	+	+	++	++	++	++		
Galvanoplastie	+	+	+	+			+	+	+	++	+	++	++		
Industrie chimique, production de matières synthétiques et d'articles en caoutchouc	+	+	++	+	+	+	++	+	+	+	+	+	+	+	+
Production d'articles en cuir et de chaussures		+		+			+		+	++	+	++	++		
Papeteries et cartonnerie	+	+	+	+	+	+	+	+	+	++	+	++	++		

++ probable

+ possible

Vide improbable

* source: liste des branches de l'aide à l'exécution « Etablissement du cadastre des sites pollués », OFEFP (2001)

Dans le commerce de gros, de détail et de récupération, l'utilisation éventuelle d'hydrocarbures chlorés est très variable, car elle dépend directement des substances et des produits vendus. En règle générale, leur utilisation revêt la même importance que dans les branches avec lesquelles la société concernée a commercé. Exemples: commerce de gros de teintures (industrie chimique), produits d'imprimerie (imprimerie) ou commerce de récupération de pièces d'automobiles (branche automobile).

Aperçu des applications possibles de HCC par processus

Processus	N° de procédé AWEL															
		1,2-dibromoéthane	1,1-dichloroéthane	1,2-dichloroéthane	1,1-dichloroéthène	Cis-1,2-dichloroéthène	Trans-1,2-dichloroéthène	Dichlorométhane	1,2-dichloropropane	1,1,2,2-tétrachloroéthane	Tétrachloroéthène	Tétrachlorométhane	1,1,1-trichloroéthane	Trichloroéthène	Trichlorométhane	Chlorure de vinyle
Traitement mécanique (forage, tournage)	9		+		+			+		+	++	+	++	++		
Peinture, laquage, projection, immersion, enduisage	14				+					+			++	++		
Dégraissage, nettoyage, lavage	17		+		+			+		+	++	+	++	++		
Fabrication et montage de plaquettes de circuits imprimés	26							++			+		++		+	
Fabrication de plaques d'impression, clichés et films	31							++		+	++		+			
Fabrication de relais et d'interrupteurs	32							+			+		+		+	
Citernes, stations de transvasement, canalisations	37	++		++						+	+					
Production de froid	39					+	+	+	+						+	
Traitement des huiles usagées	43					+	+	+			+				+	
Coloration (textiles, papier, cuir)	48					+	+			+			++	++		
Impression (papier, textiles)	49					+	+			+	+		++	++		
Équipement chimique, conservation, imprégnation	50				+								+	+		
Protection d'installations en plein air contre la végétation	51					+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Traitement de films et d'images	56							++		+						
Manipulation d'essence avec plomb	-	++		++						+						
Lutte antiparasite avec des insecticides gazeux	-	++	+					+	+			+		+	+	
Production chimique	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Décapage de peinture	-		+		+			+	+	+	+					
Fabrication de PVC et de PVDC	-				+											++
Extraction de substances thermo-sensibles, telles que caféine	-					+	+	++			+			+	+	
Préparation de graisses et d'huiles	-					+	+	+		+	++			++		

++ probable (ou a été utilisé principalement dans ces processus)

+ possible

Vide improbable

source: processus numérotés selon l'AWEL, Direction des travaux publics du canton de ZH: Anleitung zur Erfassung und Beurteilung der Betriebsstandorte: Verfahrensablauf, Prozesstypen und Kriterienkatalog (2004).

2 Propriétés des hydrocarbures chlorés

Le comportement d'une substance dans son environnement est déterminé par ses caractéristiques physiques et chimiques. Ce chapitre définit les propriétés suivantes, les explique brièvement et indique leur importance du point de vue du traitement des sites pollués par des hydrocarbures chlorés:

- Masse molaire
- Densité
- Tension de vapeur
- Solubilité dans l'eau
- Répartition air/eau (constante de Henry)
- Répartition solide/eau

Les propriétés principales des hydrocarbures chlorés sont synthétisées dans quatre diagrammes synoptiques.

2.1 Masse molaire

Masse molaire (g/mole) (aussi nommée masse moléculaire): la masse molaire d'une substance est la masse (en grammes) d'une mole de cette substance.

Une mole contient un nombre défini de molécules ($6,02 \cdot 10^{23}$) d'une substance quelconque. Les réactions chimiques sont habituellement exprimées en moles. Ainsi, par exemple, 1 mole A + 1 mole B \rightarrow 1 mole C. Le facteur de conversion appliqué pour calculer la masse requise (en g) des substances initiales A et B ainsi que la masse de leur produit C est la masse molaire.

Exemple: pour interpréter correctement (et plus aisément) la biodégradabilité, on devrait utiliser la masse molaire (p. ex. en moles/L) plutôt que la concentration massique classique (p. ex. en g/L). Ainsi, la dégradation (cumulative) d'une mole de tétrachloréthène (Per) produit une mole de trichloréthène (Tri), qui donne à son tour une mole de cis-/trans-1,2-dichloréthène (DCE), puis une mole de chlorure de vinyle (CV), etc. La dégradation (cumulative) d'un gramme de Per produit ainsi:

- 0,79 g Tri (= $131/165$ = masse molaire Tri / masse molaire Per);
- 0,58 g cis-/trans-DCE (= $96/165$ = masse molaire DCE / masse molaire Per);
- 0,38 g CV (= $62/165$ = masse molaire CV / masse molaire Per), etc.

2.2 Densité

Densité (kg/L): la densité d'une substance est sa masse rapportée à un volume donné. Par exemple, un litre d'eau a une masse d'un kilogramme, si bien que sa densité est de 1 kg/L.

La densité, tributaire de la température, décroît presque toujours avec celle-ci. Les hydrocarbures chlorés ont une densité généralement supérieure à celle de l'eau (> 1 kg/L). Lorsque la capacité maximale d'emmagasinement d'une de ces substan-

ces dans l'eau est dépassée (\geq solubilité dans l'eau) apparaît une phase organique non aqueuse d'hydrocarbures chlorés (aussi nommée DNAPL, pour « **D**ense **N**on **A**queous **P**hase **L**iquid »), qui descend du fait de sa densité supérieure (au contraire des huiles minérales).

2.3 Tension de vapeur

Tension de vapeur (Pa): la tension de vapeur exprime la tendance d'une substance à rejoindre la phase gazeuse. En d'autres termes, il s'agit de la pression gazeuse (correspondant à la concentration dans la phase gazeuse) exercée par une substance dans un système fermé à deux phases comprenant cette substance pure et de l'air.

La tension de vapeur devrait être exprimée en Pascal ($\text{Pa}=\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$). On utilise aussi fréquemment le Torr (1 Torr = 1 mm Hg = 133,332 Pa), le bar ou l'atmosphère (1 atm = 101 325 Pa $\sim 10^5$ Pa). Une substance bout lorsque sa tension de vapeur atteint celle de son environnement (la tension de vapeur de l'eau vaut approximativement 1 atm à 100° C). Le fait qu'une substance ait une tension de vapeur $> 10^5$ Pa (à pression atmosphérique) signifie que cette substance est présente sous forme de gaz à la température indiquée, à l'exemple du chlorure de vinyle. La tension de vapeur d'une substance dépend étroitement de sa température.

2.4 Solubilité dans l'eau

Solubilité dans l'eau (mg/L): la solubilité dans l'eau est la quantité maximale d'une substance (exprimée en grammes ou en moles) pouvant se dissoudre entièrement dans un volume donné d'eau pure.

La solubilité des HCC dans l'eau varie très peu dans la fourchette de température de 10-25° C. Lorsqu'elle est dépassée, une phase organique distincte (généralement transparente mais visible) coexiste à côté de la phase aqueuse (DNAPL). D'une manière générale, la solubilité dans l'eau décroît lorsque le nombre d'atomes de chlore augmente (les chloréthènes sont ainsi moins solubles que les chloréthanes) tandis que la mobilité augmente avec la solubilité dans l'eau.

2.5 Répartition air/eau

Répartition air/eau: le partage d'une substance entre la phase gazeuse et la phase aqueuse d'un système à deux phases à l'équilibre est exprimé par la **constante de Henry (H, ou K_H)** ou coefficient de répartition air/eau. La constante de Henry revêt généralement la forme d'un paramètre sans dimension:

$$H = \frac{[\text{Concentration à l'équilibre dans la phase gazeuse (moles/L)}]}{[\text{Concentration à l'équilibre dans la phase aqueuse (moles/L)}]} \quad [-]$$

Plus la constante de Henry d'une substance a une valeur élevée, plus cette substance est « volatile » dans une solution aqueuse et plus il est facile de l'extraire de l'eau ou d'un sol humide insaturé (procédés d'assainissement: stripping, aspiration d'air dans le sol). Pour les substances peu solubles dans l'eau (solubilité $\sim < 10'000$ mg/L), dont la plupart des hydrocarbures chlorés, la constante de Henry se calcule comme suit:

$$H = \frac{[Tension\ de\ vapeur\ (Pa)]}{[Solubilité\ dans\ l'eau\ (moles/m^3)]} \cdot \frac{1}{RT} [-]$$

avec R = constante universelle des gaz ($Joule \cdot K^{-1} \cdot mole^{-1} = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mole^{-1}$) et T = température absolue en degrés Kelvin. La constante de Henry est donc sensiblement corrélée avec la température, comme la tension de vapeur (règle empirique pour les hydrocarbures chlorés volatils: facteur d'environ 1,6 entre 10° C et 20° C). De nombreux hydrocarbures chlorés présentant une tension de vapeur et une constante de Henry élevées en comparaison avec d'autres groupes de substances (p. ex. HAP), ils sont souvent nommés « hydrocarbures chlorés volatils ».

La constante de Henry est un paramètre important pour déterminer ou estimer la répartition et le transport d'une substance dans la tranche insaturée du sous-sol.

2.6 Répartition solide/eau

Répartition solide/eau: le coefficient de répartition (K_{OC}) décrit le partage d'une substance à l'équilibre entre le carbone organique (en anglais **O**rganic **C**arbon) d'un sol ou d'un sous-sol et la phase aqueuse qui l'entoure. L'adsorption des hydrocarbures chlorés sur les phases minérales, généralement faible, est en principe négligée. Le coefficient de répartition est défini comme suit:

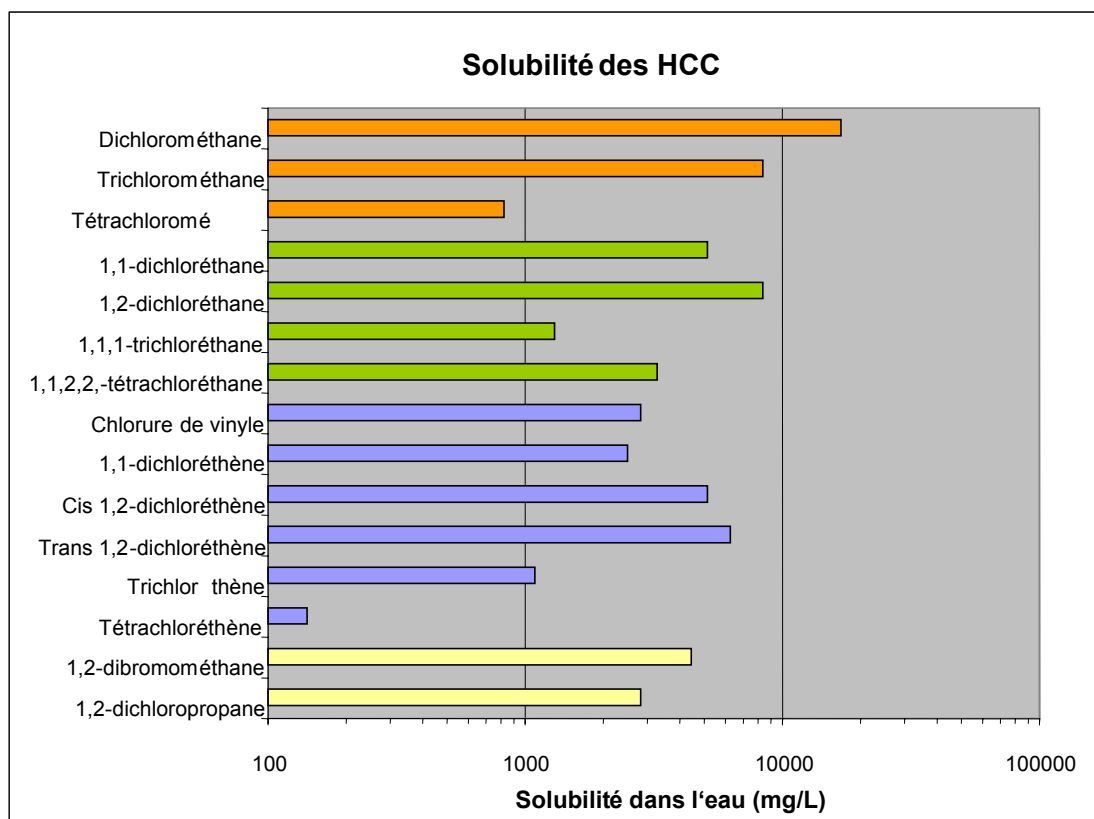
$$K_{oc} = \frac{[Concentration\ à\ l'équilibre\ dans\ le\ carbone\ organique\ (moles/kg)]}{[Concentration\ à\ l'équilibre\ dans\ la\ phase\ aqueuse\ (moles/L)]}$$

Le K_{OC} est habituellement exprimé en kg/L. Il exprime la capacité d'une substance à être adsorbée. Plus le K_{OC} est élevé, plus cette substance est adsorbée par le carbone organique du sous-sol; ainsi, plus la mobilité d'une substance est faible, plus son transport dans le sous-sol est lent. Une règle empirique indique en outre que plus la solubilité dans l'eau est faible, plus le K_{OC} est élevé. Ce coefficient n'est pas lié significativement avec la température.

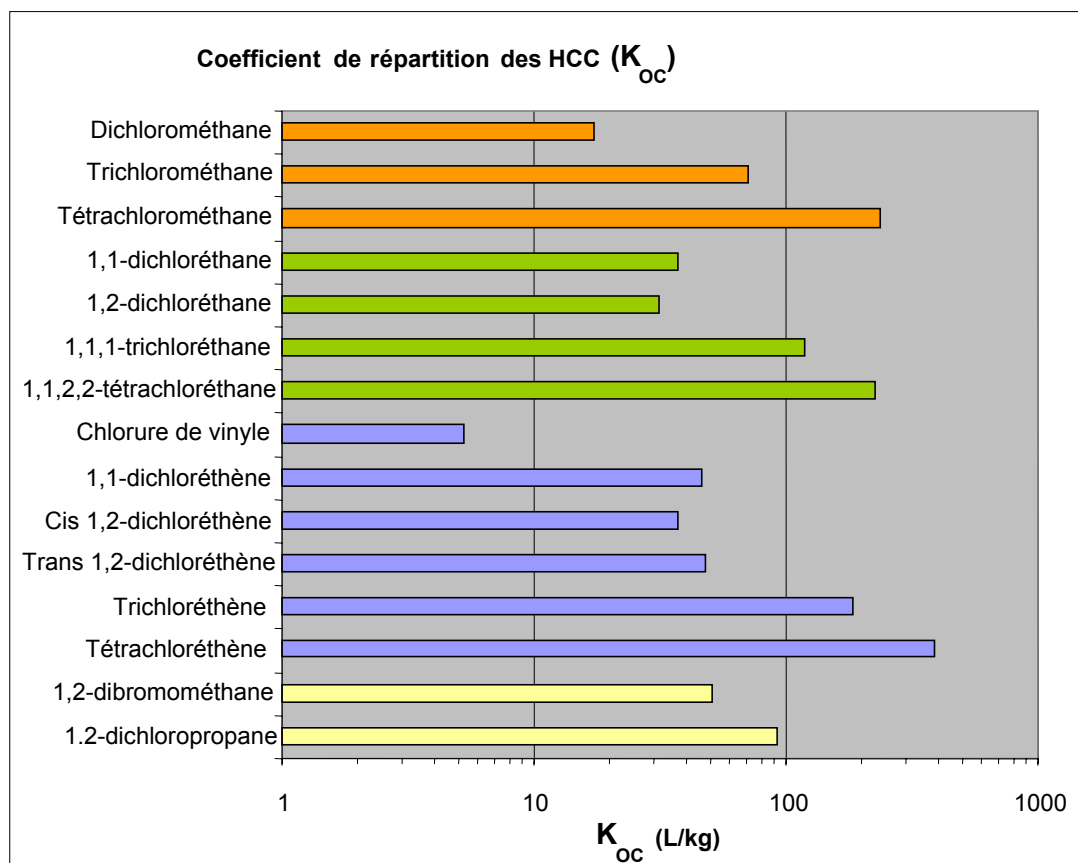
2.7 Diagrammes synoptiques des propriétés des substances

Les propriétés des hydrocarbures chlorés les plus importantes pour leur comportement dans l'environnement sont résumées dans les pages suivantes à l'aide de quatre figures. Les substances y sont rangées par classes (chlorométhane, chloréthane, chloréthène et autres). Ces figures indiquent sommairement les différences entre les classes et l'influence du nombre d'atomes de chlore sur les propriétés des substances.

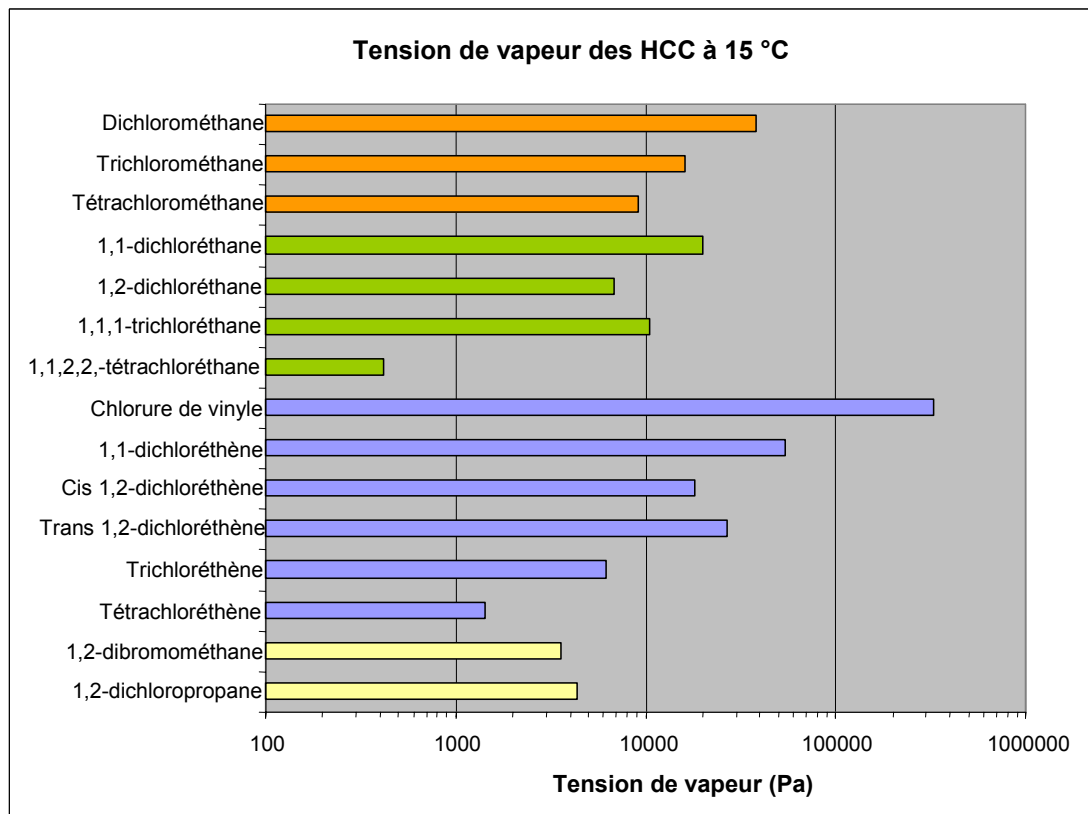
En règle générale, les composés contenant davantage d'atomes de chlore ont une tension de vapeur et une solubilité plus faibles et un coefficient K_{OC} plus élevé. Mais ces règles empiriques présentent des exceptions notables, car les propriétés des substances sont aussi étroitement tributaires des particularités structurales des molécules.



Ce sont les chlorométhane qui sont les plus solubles dans l'eau, suivis des chloréthane et des chloréthène. Les moins solubles sont les composés totalement chlorés tétrachloréthène et tétrachlorométhane.

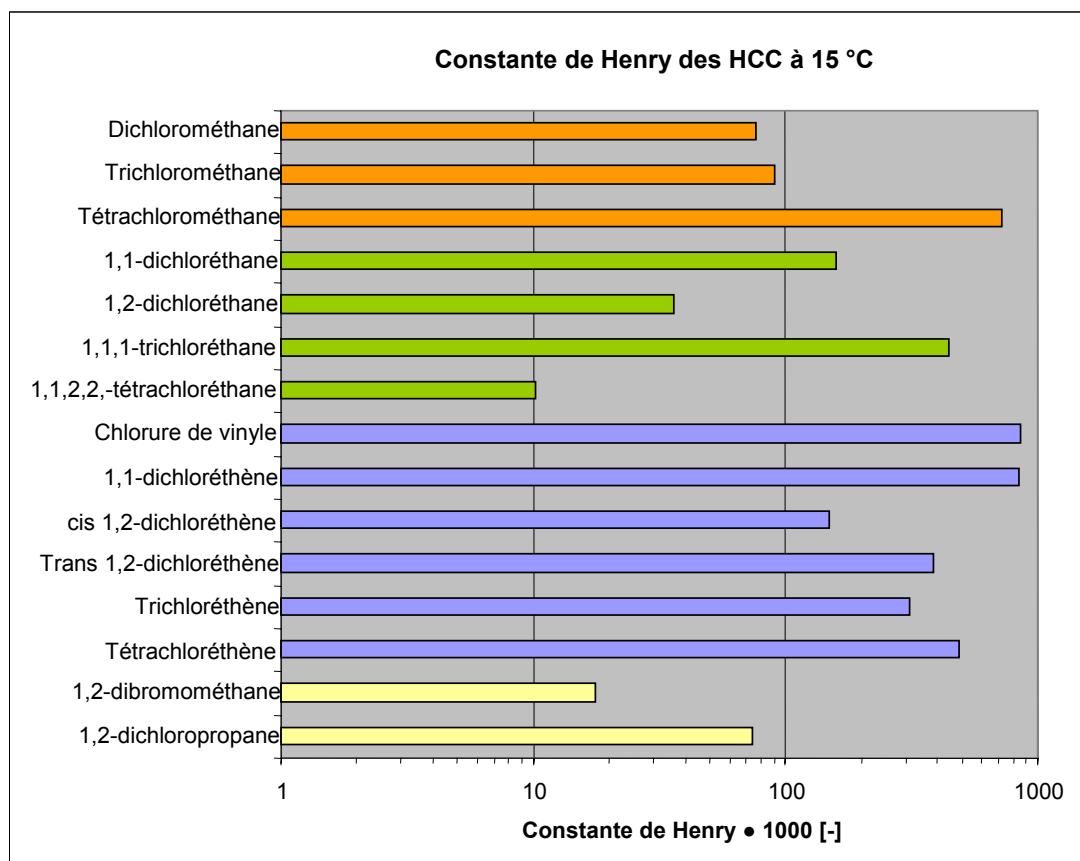


La taille de la molécule et le nombre d'atomes de chlore ont une grande influence sur le coefficient de répartition (solide/eau). Les K_{oc} les plus faibles sont ceux des substances qui ont un petit nombre d'atomes de chlore et donc une masse molaire faible.



La tension de vapeur est généralement élevée lorsque la masse molaire d'une substance et son nombre d'atomes de chlore sont faibles. Mais la structure moléculaire des différents composés joue aussi un rôle important dans ce paramètre.

Une comparaison entre le 1,1-dichloréthène, le cis-1,2-dichloréthène et le trans-1,2-dichloréthène, qui ont tous la même masse molaire et le même nombre d'atomes de chlore mais présentent des tensions de vapeur différentes, met en évidence l'influence des particularités structurales des hydrocarbures chlorés sur la tension de vapeur.



Parmi les quatre propriétés retenues, la constante de Henry est la plus complexe, parce qu'elle dépend tout à la fois de la tension de vapeur et de la solubilité. Les hydrocarbures chlorés peu solubles peuvent aussi avoir une tension de vapeur basse, ce qui réduit les différences entre les substances par comparaison avec plusieurs autres propriétés.

3 Comportement dans l'environnement

Le comportement d'un composé dans l'environnement est gouverné, ou peut l'être, par un grand nombre de processus. Il s'agit principalement de processus de répartition entre phases différentes (aqueuse, gazeuse, solide ou organique), de transport (substance dissoute dans l'eau, présente dans l'air interstitiel ou sous la forme de phase organique liquide pure [DNAPL]) ou de dégradation (biodégradation et/ou réactions chimiques). Les sujets suivants sont développés dans ce chapitre:

- Répartition d'un composé dans le sous-sol
- Transport
- Biodégradabilité
- Recommandations pour les investigations sur le terrain

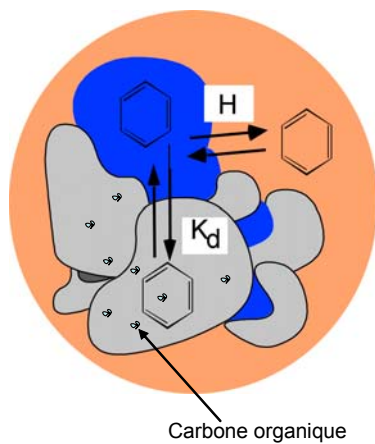
3.1 Répartition dans le sous-sol saturé et insaturé

Ce sous-chapitre donne des indications pour calculer la répartition d'une substance organique dans les zones saturée et insaturée du sous-sol. Il fournit ainsi des bases utiles, par exemple, pour estimer certains paramètres importants dans un système stationnaire ou évolutif (p. ex. la concentration dans un lixiviat selon l'OSites) à partir de la mesure d'un seul paramètre (p. ex. la teneur dans la phase solide ou dans l'air interstitiel) [source: Directive pour la lixiviation en colonne de matériaux de sites pollués, selon l'ordonnance sur les sites contaminés (OFEFP, 2000)].

Pour estimer le bilan massique d'un hydrocarbure chloré (par exemple dans un mètre cube de terrain) et calculer simultanément sa répartition dans les différentes phases du sous-sol (matériaux solides, eau, air interstitiel), on admet que la substance organique (HCC) et les trois phases sont à l'équilibre (voir schéma ci-dessous).

L'état d'équilibre de la substance considérée est défini par la constante de Henry H (air/eau) et par la valeur K_{OC} ou K_d (solide/eau). La phase solide (sous-sol) est caractérisée par sa densité ($\rho \sim 1,8-2,0$ kg/L), par sa porosité remplie d'air ou d'eau (Φ) et par la fraction de carbone organique qu'elle renferme f_{OC} .

Calcul de la répartition des HCC dans les phases d'un sous-sol insaturé



Lixiviat virtuel (voir l'aide à l'exécution Directive pour la lixiviation en colonne de matériaux de sites pollués, selon l'OSites; OFEFP, 2000)

Equilibre entre les phases

$$H = \frac{C_g}{C_w} \quad K_d = \frac{C_s}{C_w} = f_{oc} \cdot K_{oc}$$

Bilan massique

$$C_t = (C_s \cdot \rho + C_w \cdot \Phi_w + C_g \cdot \Phi_g) / \rho$$

- C_t = Teneur globale (mg/kg)
- C_s = Teneur dans la phase solide (mg/kg)
- C_w = Concentration dans l'eau interstitielle (mg/L)
- C_g = Concentration dans l'air interstitiel (mg/L)
- H = Constante de Henry (-)
- K_d = Coefficient de répartition phase solide/aqueuse (L/kg)
- ρ = Densité du sous-sol (kg/L)
- Φ_w = Porosité remplie d'eau (-)
- Φ_g = Porosité remplie d'air (-)
- K_{oc} = Coefficient de répartition carbone organique/eau (L/kg)
- f_{oc} = Fraction du carbone organique dans la phase solide (-)

Lorsqu'une phase organique (DNAPL) est présente, ces équations ne sont pas applicables, mais on peut toutefois les utiliser pour évaluer la probabilité d'occurrence de DNAPL.

La fraction de carbone organique (f_{oc}), qui peut en principe varier entre 0 % et 50 %, exerce une grande influence sur la répartition des HCC entre les phases présentes dans le sous-sol. Les matériaux grossiers (graveleux) ont habituellement des valeurs f_{oc} inférieures à celles des matériaux fins (limoneux ou argileux). En règle générale, f_{oc} diminue fortement en descendant d'un horizon à l'autre (A > B > C). Le tableau suivant fournit des valeurs empiriques de f_{oc} dans le sol et dans le sous-sol.

Valeurs typiques de la fraction de carbone organique f_{OC} dans les matériaux du sol et du sous-sol

Matériaux	Valeurs typiques f_{OC} (%)	Profondeurs typiques (m)	Remarques
Couche supérieure « horizon A »	1 - 10	0 - 0,2	Des valeurs supérieures sont possibles (p. ex. tourbe).
Couche inférieure « horizon B »	0,1 - 2,0	0,2 - 0,7	La teneur en carbone organique de l'horizon B est par définition inférieure à celle de l'horizon A.
Sous-sol « horizon C »	0,01 - 0,5	> 0,7	Bien que les valeurs absolues soient faibles, des différences d'un facteur 50 d'un site à l'autre ne sont pas rares.

Les valeurs mentionnées dans le tableau ci-dessus peuvent être utilisées pour estimer sommairement la répartition des substances. (Dans le cadre d'investigations techniques sur site, il serait préférable d'établir analytiquement la teneur en carbone organique effectivement présente dans les matériaux solides (TOC), voire de déterminer directement la valeur K_d effective au moyen d'essais de lixiviation neutres.) Notons en outre que l'adsorption à la surface des minéraux peut jouer un rôle important lorsque f_{OC} est inférieur à environ 0,001 (0,1 %). C'est pourquoi l'application de l'équation $K_d = f_{OC} \cdot K_{OC}$ à des systèmes ayant des valeurs f_{OC} très basses peut amener à sous-estimer K_d .

En première approximation, l'on peut raisonnablement appliquer une valeur f_{OC} de 0,1 % aux aquifères perméables, à granulométrie grossière, du Plateau et une valeur double à quintuple aux couches plus fines du sous-sol.

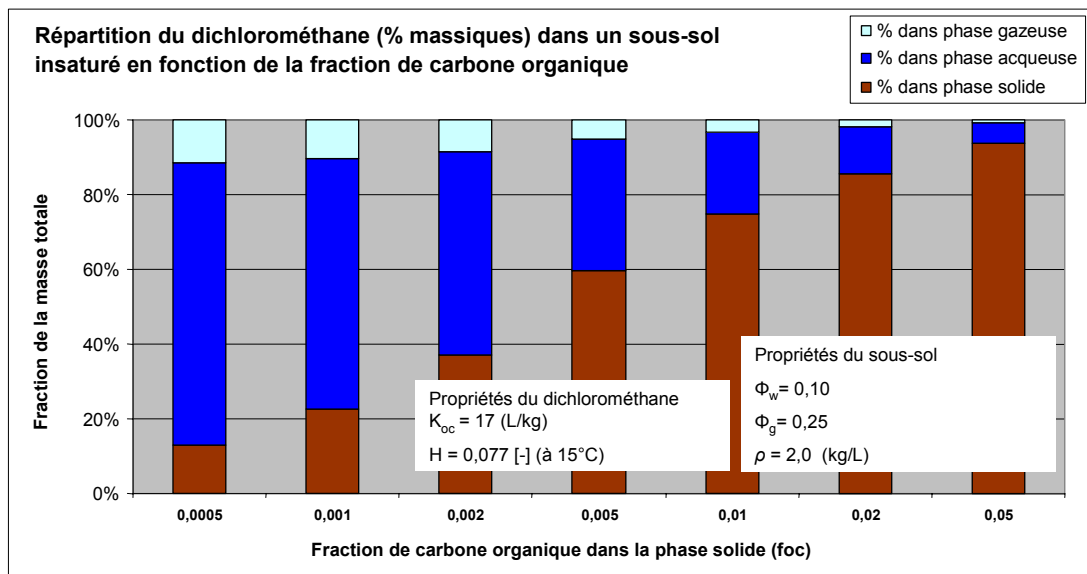
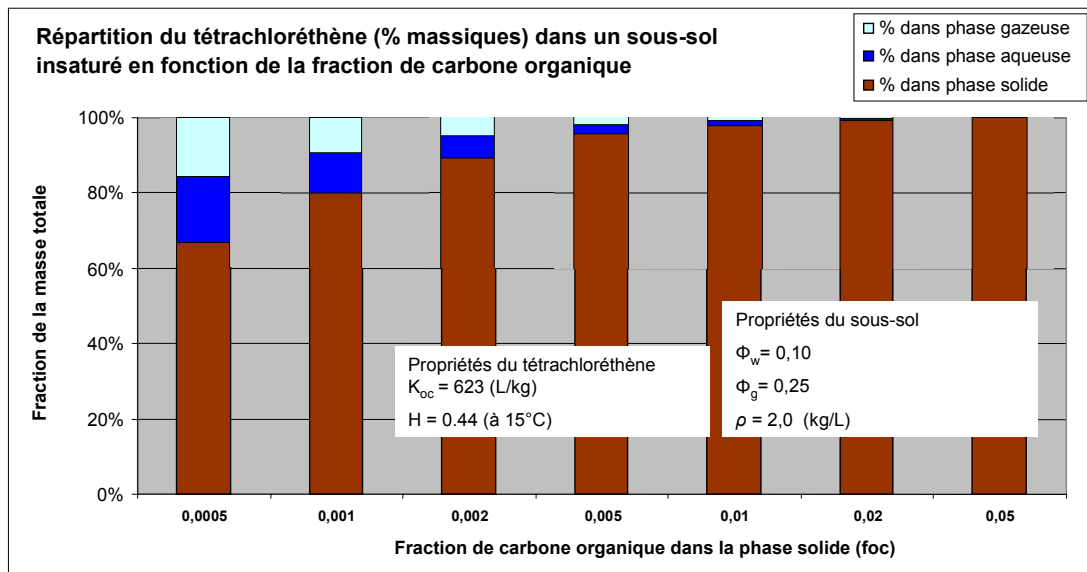
3.1.1 Zone insaturée

Ce paragraphe indique à titre d'exemple la répartition d'hydrocarbures chlorés en zone insaturée (sans biodégradation) qu'on obtient en appliquant les principes exposés au chapitre 3.1 et les propriétés pertinentes des substances et du sous-sol (f_{OC}).

Deux composés HCC aux propriétés dissemblables, le tétrachloréthène et le dichlorométhane, ont été choisis à cet effet. Les deux graphiques suivants présentent la répartition de leur masse dans les trois phases de la zone insaturée en fonction de la teneur en carbone organique du sous-sol. Les valeurs figurant tout à gauche ($f_{OC} = 0,0005$) correspondent à un terrain très grossier, tandis que les valeurs figurant tout à droite ($f_{OC} = 0,05$) correspondent à une couche supérieure (noire) très riche en substances nutritives.

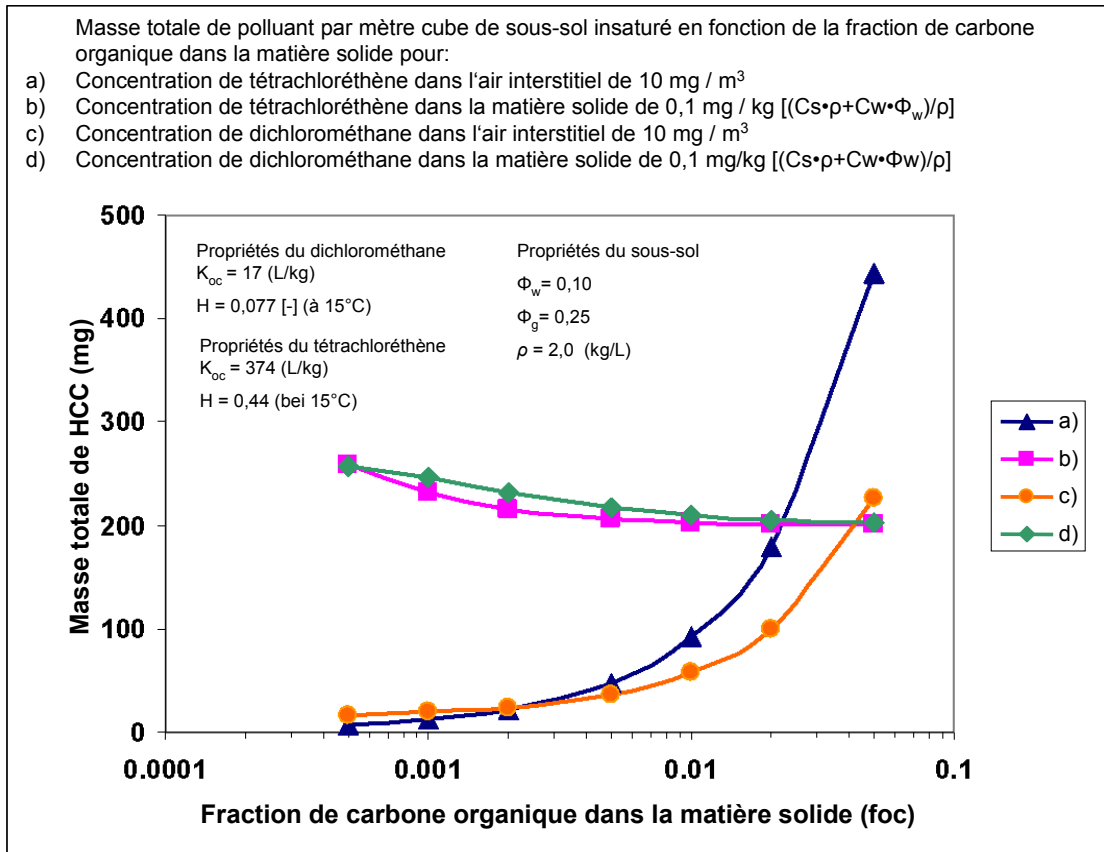
Les différences entre les propriétés du tétrachloréthène et du dichlorométhane, notamment la solubilité dans l'eau et le coefficient de répartition solide/eau, ressortent

particulièrement pour les valeurs f_{OC} basses: la fraction massique du tétrachloréthène présente dans la phase aqueuse est faible par rapport à celle du dichlorométhane.



Pour étudier un site pollué, on prélève parfois des échantillons de matière solide et parfois des échantillons de l'air interstitiel pour les analyser. Le graphique suivant indique, pour les deux mêmes composés tétrachloréthène et dichlorométhane, la masse de HCC prévisible dans un mètre cube de sous-sol insaturé en fonction de valeurs f_{OC} mesurées.

Remarquons que la « concentration dans la matière solide » recouvre la teneur dans la matière solide plus l'eau, car, dans la pratique, les échantillons de matière solide utilisés pour analyser les HCC ne doivent pas être séchés au préalable, si bien que leur humidité est comprise dans l'analyse. C'est la raison pour laquelle les courbes b) et d) du graphique divergent très peu.



3.1.2 Sous-sol saturé (nappe souterraine)

Ce paragraphe indique la répartition d'hydrocarbures chlorés dissous dans une nappe souterraine en équilibre avec la phase solide (sans biodégradation) que l'on estime en se basant sur les explications du chapitre 3.1. En l'absence de phase gazeuse, la relation entre la concentration d'un HCC dans la phase aqueuse C_w et sa teneur totale (dans la matière solide) C_t s'exprime comme suit:

$$C_w = \frac{C_t}{\left(K_d + \frac{E}{S}\right)}$$

où E/S est le rapport eau/solide (L/kg) du système considéré (p. ex. 1 m³ de sous-sol saturé). Dans un aquifère (saturé), le rapport E/S est approximativement égal à 0,25 L/kg.

Les valeurs K_d ($= f_{oc} \cdot K_{OC}$) des HCC étant généralement < 1 dans un sous-sol naturel saturé, le paramètre E/S joue aussi un rôle important dans l'estimation de l'équilibre entre les phases solide et aqueuse.

L'équation ci-dessus permet de déterminer le lixiviat virtuel selon l'OSites [source: Directive pour la lixiviation en colonne de matériaux de sites pollués, selon l'ordonnance sur les sites contaminés (OFEFP, 2000)]. Tous les HCC traités ici étant considérés comme des « substances organiques très solubles » (solubilité > 100 mg/L), il faut appliquer un quotient $E/S = 0,25$ L/kg pour estimer le lixiviat virtuel selon l'OSites.

En introduisant un rapport $E/S = 10$ L/kg, on peut aussi, par exemple, estimer la

concentration aqueuse prévalant lors d'un test de lixiviation (neutre) pratiqué selon l'ordonnance sur le traitement des déchets (OTD).

Le principe de l'équilibre régnant en tout temps et en tout point entre les phases aqueuse et solide (équation ci-dessus) est aussi appliqué aux systèmes dynamiques, soit notamment pour étudier le transport dans une nappe souterraine.

3.2 Transport

Ce sous-chapitre décrit les processus responsables de la dissémination des hydrocarbures chlorés dans le sous-sol insaturé et dans les nappes souterraines. Les principes de la répartition des substances dissoutes dans un sous-sol statique (l'équilibre thermodynamique régnant en tout temps et en tout point), décrits au sous-chapitre 3.1, s'appliquent aussi aux sous-sols « dynamiques », où des substances sont transportées par l'eau et/ou par l'air.

Les principaux processus de transport actifs dans la zone insaturée sont l'infiltration et la volatilisation. Après infiltration et répartition dans le sous-sol insaturé, les HCC atteignent la nappe souterraine qui va les transporter.

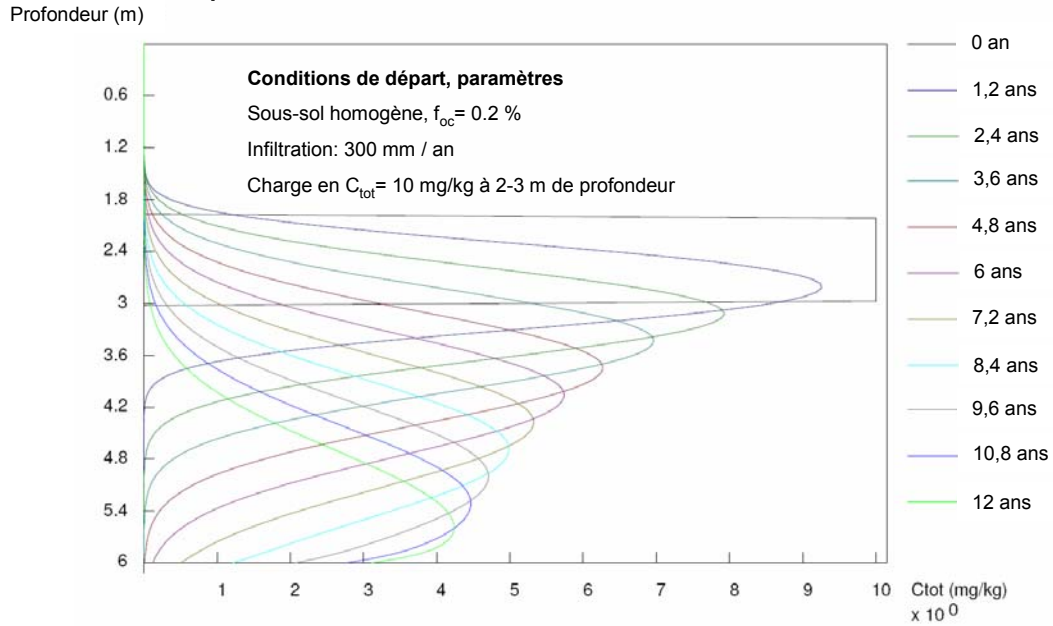
Lorsque de grandes quantités de HCC pénètrent soudainement dans le sous-sol ou que de faibles quantités y pénètrent continuellement au même endroit durant une longue période, il arrive souvent que ces HCC ne puissent pas se dissoudre ni se volatiliser assez rapidement. Il subsiste alors des phases résiduelles de HCC purs nommées DNAPL.

3.2.1 Infiltration et volatilisation (sous-sol insaturé)

L'apport d'hydrocarbures chlorés dissous aux nappes souterraines est principalement dû à l'infiltration d'eau (pluviale) dans le sous-sol insaturé. L'eau y percolant naturellement emporte des HCC adsorbés sur des matériaux solides et les transporte vers des niveaux inférieurs. Les figures ci-dessous portant sur le tétrachloréthène et le dichlorométhane exposent le déroulement de ce processus dynamique (sans biodégradation ni cheminement préférentiel) dans un sous-sol homogène. L'influence des différentes propriétés, en particulier de K_{OC} , est ici aussi clairement visible: alors que le tétrachloréthène est transporté dans les eaux souterraines après environ 5 ans, le dichlorométhane a déjà été pratiquement complètement « lavé » des eaux souterraines après 2 ans.

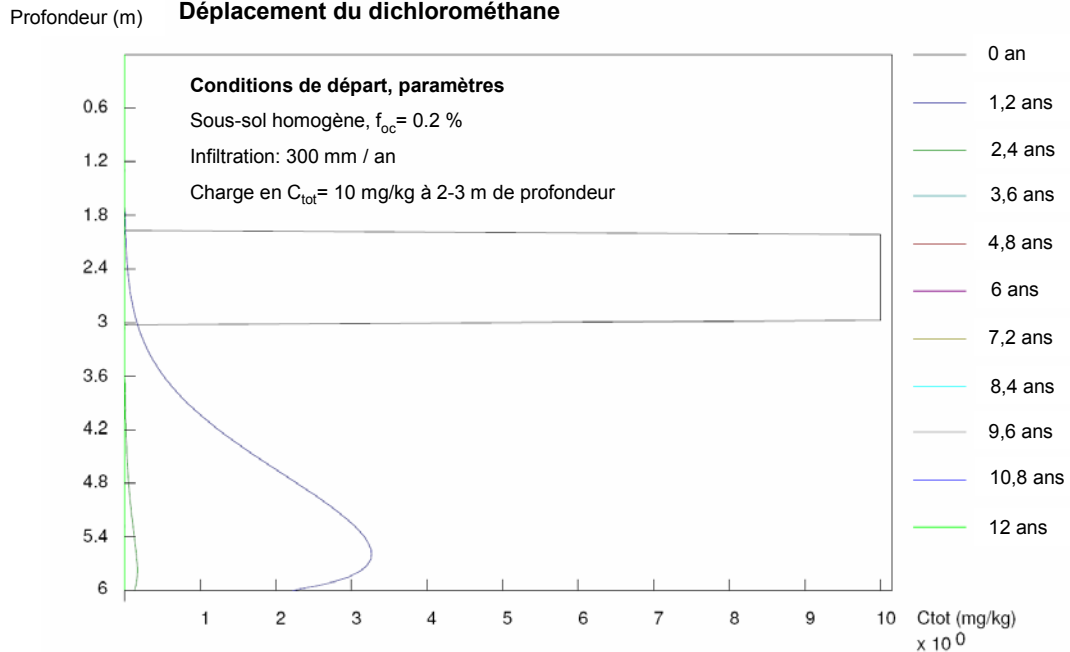
Transport par infiltration dans le sous-sol insaturé :

Déplacement du tétrachloréthène



Transport par infiltration dans le sous-sol insaturé :

Déplacement du dichlorométhane



De telles estimations sommaires peuvent être effectuées en appliquant le modèle mathématique TransSim [source: Sites contaminés – Estimation de la mise en danger: TransSim (OFEFP, 2002)]. Ce modèle permet de prendre en compte plusieurs couches de terrain dotées de caractéristiques différentes (f_{oc} , épaisseur, perméabilité) ainsi que des cheminements préférentiels simples et une activité de biodégradation (ces deux derniers paramètres devant être appliqués avec précaution).

Des HCC ne sont transportés activement vers l'atmosphère en quantités notables que dans la tranche supérieure d'un à deux mètres d'épaisseur. Cette volatilisation « active » est due aux variations naturelles de la pression atmosphérique. Lors-

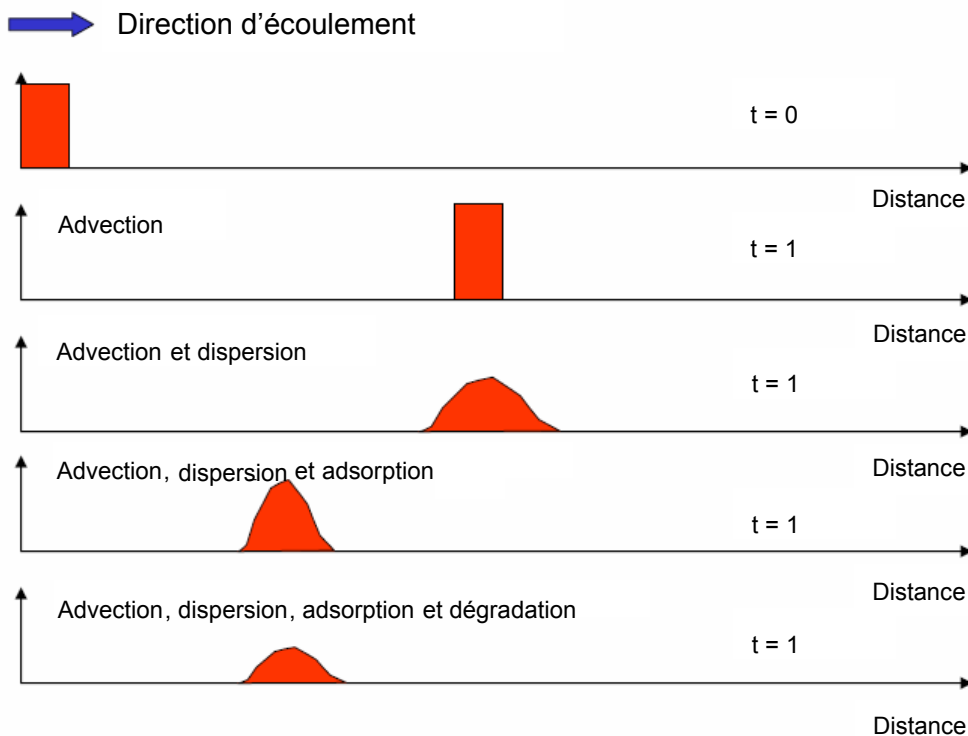
qu'elle augmente, de l'air frais pénètre dans le sous-sol insaturé. Lorsqu'elle baisse, cet air désormais légèrement chargé en HCC est restitué à l'atmosphère.

Lorsque des HCC se trouvent dans des couches profondes, leur transport par l'air se fait généralement uniquement par diffusion (p. ex. équilibrage de concentrations). Contrairement au transport par advection (p. ex. infiltration naturelle d'eau pluviale), ce mécanisme est généralement négligeable. Le transport par diffusion dans la phase gazeuse peut aussi être évalué au moyen de TransSim [source: Sites contaminés – Estimation de la mise en danger: TransSim (OFEFP, 2002)].

3.2.2 Transport dans les nappes souterraines

Les principaux mécanismes responsables du transport de substances dissoutes dans les nappes souterraines sont exposés dans le diagramme suivant (adapté à partir de supports de cours de W. Kinzelbach et F. Stauffer, EPF Zurich):

Processus de transport dans les nappes souterraines



Advection: Transport de substances dissoutes par écoulement d'eaux souterraines. La charge, proportionnelle à la vitesse d'écoulement de la nappe (v_w) et à la concentration des polluants, est transportée dans le sens d'écoulement de la nappe.

Dispersion: Transport de substances dissoutes par mélange d'eaux souterraines gouverné par l'écoulement. La charge d'une substance dissoute est proportionnelle à la vitesse d'écoulement de la nappe (v_w) et au gradient de concentration de cette substance. Celle-ci n'est pas transportée uniquement dans le sens d'écoulement, mais parfois aussi en di-

rection des concentrations inférieures.

Adsorption: Ce mode de transfert (généralement réversible) sur la phase solide de substances dissoutes dans les eaux souterraines ralentit le transport de ces substances par diminution de leur concentration dans l'eau.

Dégradation: Transformation ou destruction de polluants par des processus chimiques et/ou biologiques. La dégradation est le seul processus présenté ici qui occasionne une réduction de la masse de polluants.

L'advection et la dispersion décrivent le transport des eaux souterraines elles-mêmes, et par conséquent aussi celui d'une substance stable ou inerte qui n'est ni adsorbée (K_{OC} et $K_d = 0$) ni dégradée (traceur). La vitesse de propagation d'un HCC est retardée ou ralentie par son adsorption sur des matériaux solide par comparaison avec la vitesse d'écoulement de l'eau. Ce processus, décrit par le *facteur de retard* R , se calcule comme suit:

$$R = \frac{v_w}{v_{HCC,w}} = 1 + \frac{\rho \cdot K_d}{\Phi_w} [-]$$

Lorsqu'on introduit dans cette équation les propriétés pertinentes des hydrocarbures chlorés (K_{OC}) et les caractéristiques d'un aquifère typique (ρ , Φ_w , f_{OC}), le facteur de retard relatif à ces HCC varie approximativement entre 1,1 et 3. Cela signifie que les HCC se déplacent, selon la substance, 1,1 à 3 fois plus lentement que l'aquifère lui-même.

3.2.3 DNAPL

Un DNAPL (**D**ense **N**on-**A**queous **P**hase **L**iquid) est une phase liquide organique non aqueuse plus dense que l'eau. A l'exception du chlorure de vinyle (gazeux), tous les HCC considérés sont des liquides organiques de densité comprise entre 1,2 et 1,6 kg/L (2,5 kg/L pour le 1,2-dibromoéthane).

Lorsque de grandes quantités de HCC pénètrent soudainement dans le sous-sol sous la forme de phase purement organique ou que de faibles quantités y pénètrent continuellement au même endroit durant une longue période (des mois ou des années) sous cette même forme, il arrive souvent que ces HCC ne puissent pas se dissoudre ni se volatiliser assez rapidement. Des phases résiduelles de HCC purs nommées DNAPL subsistent alors.

Revêtant une densité supérieure à celle de l'eau, ainsi qu'une viscosité et une tension superficielle généralement inférieures, une partie des DNAPL se propage parfois rapidement dans le sous-sol, verticalement ou horizontalement, notamment en empruntant des cheminements préférentiels. En direction verticale, les phases de HCC sont arrêtées par des couches (intercalaires) peu perméables, sur lesquelles elles peuvent former des flaques de faible épaisseur (quelques cm à quelques dm au maximum). (Attention: en cas de soupçon de DNAPL, la prudence est de mise lorsqu'on réalise des forages au travers de couches peu perméables!) En direction horizontale, les DNAPL peuvent pénétrer dans des lentilles perméables. Ainsi, des phases HCC sont susceptibles de rester en chemin, dans les pores du sous-sol,

sous la forme de gouttes ou de ganglions plus ou moins dispersés.

Il est pratiquement impossible d'appréhender quantitativement le transport de DNAPL dans le sous-sol. Même l'estimation du potentiel de pollution (masse) d'une source de DNAPL située dans le terrain s'avère difficile.

Une règle empirique applicable pour établir la présence de DNAPL à proximité d'un point de mesure dans la nappe souterraine en se basant sur sa concentration observée dans l'eau c_w s'énonce comme suit:

- $c_w > 10$ % de la solubilité dans l'eau → présence de DNAPL presque certaine
- c_w entre 1 % et 10 % de la solubilité dans l'eau → présence de DNAPL probable
- c_w entre 0,1 % et 1 % de la solubilité dans l'eau → présence de DNAPL possible

Il est aussi possible de partir d'une concentration dans la matière solide pour évaluer si un DNAPL est présent ou non (chap. 3.1 et équation au chap. 3.1.2). Une teneur mesurée de 100 mg de tétrachloréthène par kg de matière solide signifie par exemple que sa concentration dans l'eau interstitielle correspond approximativement à 50 % de sa solubilité dans l'eau, pour une f_{oc} de 0,2 %.

Ces ganglions et/ou flaques de DNAPL généralement isolés, et ainsi sensiblement immobiles, sont susceptibles de polluer gravement les eaux souterraines pendant de très longues périodes (plusieurs années à plusieurs décennies). Cela est dû à la « disponibilité » souvent très restreinte des DNAPL, à leur dissolution très lente dans l'eau interstitielle et au transport très limité par diffusion des pores vers l'aquifère en mouvement.

Signalons qu'un panache de HCC – dissous dans l'eau selon une concentration de quelques centaines de $\mu\text{g/L}$ à quelques mg/L – n'est pas plus dense que l'eau, si bien qu'il ne descend pas jusqu'à l'aquiclude.

Lorsque des HCC dissous dans l'eau pénètrent dans le sous-sol saturé ou insaturé, aucun DNAPL ne peut se former par la suite dans le terrain naturel.

3.3 Biodégradabilité

L'on sait aujourd'hui que pratiquement tous les HCC (selon l'annexe 1 OSites) sont dégradables en conditions idéales. Ils peuvent aussi être dégradés sur le terrain, mais ce processus est généralement insignifiant parce que trop lent ou incomplet, ou parce que les conditions idéales sont rarement réunies sur le terrain.

Plusieurs substances ne se dégradent qu'en conditions anaérobies, c'est-à-dire en l'absence d'oxygène (O_2). D'autres HCC se dégradent plus rapidement en conditions aérobies (avec O_2). Certaines substances se dégradent dans les deux milieux.

Lors de leur dégradation biologique, ou biodégradation, certains HCC peuvent endosser le rôle de donneur d'électrons (DE) (source d'énergie et de carbone, à l'instar du sucre) ou d'accepteur d'électrons (AE) (oxydant, à l'instar de l'oxygène).

Dans certaines conditions, il peut aussi arriver occasionnellement que des HCC soient dégradés par des enzymes « produites » dans des bactéries par la dégrada-

tion d'autres composés, tel le toluène. Ce « cométabolisme » n'est généralement pas lié à la croissance des bactéries et il s'estompe à mesure que le substrat propre à l'enzyme concernée disparaît.

Le tableau suivant donne un aperçu de la biodégradabilité de plusieurs HCC en conditions aérobies et anaérobies.

Biodégradabilité des HCC

Substance	En conditions aérobies		En conditions anaérobies		
	DE	Com	DE	AE	Com
Dichlorométhane	++	++	++	?	?
Trichlorométhane	-	++	-	?	++
Tétrachlorométhane	-	-	-	?	++
1,1-dichloréthane	?	++	-	?	++
1,2-dichloréthane	++	++	-	++	++
1,1,1-trichloréthane	-	++	-	++	++
1,1,2,2-tétrachloréthane	-	+	-	?	++
Chlorure de vinyle	++	++	+/-	++	++
1,1-dichloréthène	?	++	-	++	++
Cis-1,2-dichloréthène	+	++	+/-	++	++
Trans-1,2-dichloréthène	?	++	-	+	++
Trichloréthène	-	++	-	++	++
Tétrachloréthène	-	+/-	-	++	++

DE = Croissance bactérienne liée à l'utilisation du composé comme donneur d'électrons

AE = Croissance bactérienne liée à l'utilisation du composé comme accepteur d'électrons

Com = Cométabolisme (sans croissance bactérienne)

(-) = Aucune biodégradation observée

(+/-) = Aucune biodégradation observée dans de nombreux cas

(+) = Biodégradation observée isolément

(++) = Biodégradation observée régulièrement

(?) = Aucune étude disponible

En règle générale, les composés riches en chlore sont presque uniquement dégradables en conditions anaérobies, tandis que les composés pauvres en chlore sont habituellement aussi dégradables en conditions aérobies.

Les paragraphes suivants décrivent la biodégradation des HCC, en indiquant notamment les conditions nécessaires pour qu'elle ait lieu et les limites auxquelles elle est soumise. Les voies de dégradation de quelques composés sont exposées à titre d'exemples.

3.3.1 Conditions requises

Pour que la biodégradation des HCC puisse avoir lieu, les conditions suivantes doivent être remplies sur le site:

- **Conditions géochimiques:** dans les processus réducteurs anaérobies, les HCC très oxydés, tels le tétrachloréthène, le trichloréthène et le cis-1,2-dichloréthène, agissent comme accepteurs d'électrons. Les électrons sont fournis par des composés organiques naturels (notamment des acides humiques) ou par une contamination superposée (p. ex. par des hydrocarbures). Avant

que les bactéries naturellement présentes puissent utiliser les HCC comme accepteurs d'électrons, il faut que les autres accepteurs d'électrons en présence, tels qu'oxygène, nitrates, sulfates et fer (III), soient épuisés. C'est pourquoi il est nécessaire de les inventorier et de les caractériser. Un site contaminé est donc occasionné quand il n'y a plus d'accepteurs d'électrons disponibles et que le substrat organique (source de carbone) est épuisé. Les microorganismes meurent ou se trouvent dans un état de latence. Lorsque les conditions se modifient, (par ex. arrivé d'oxygène) les microorganismes se reproduisent et croissent à nouveau.

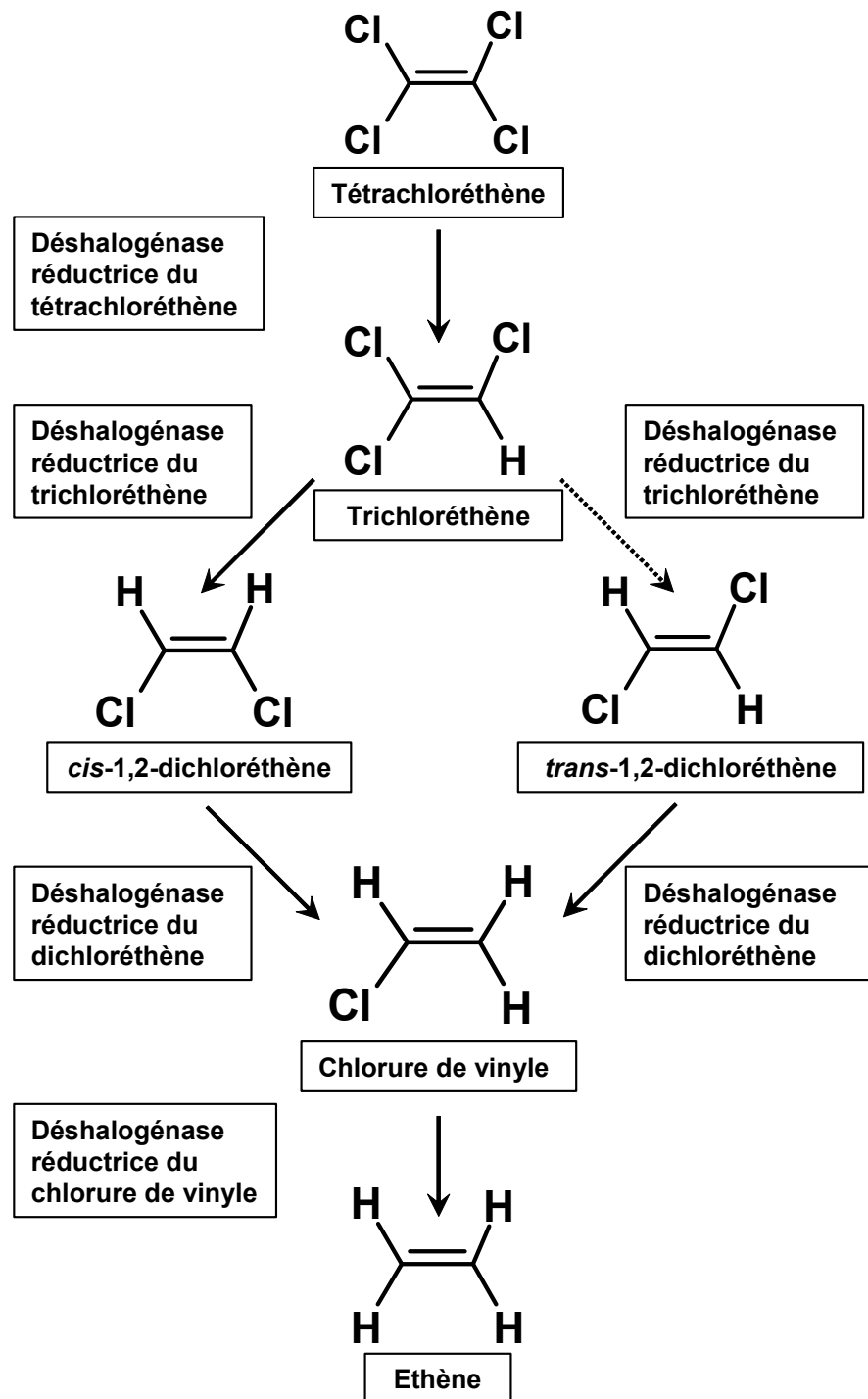
- Donneurs d'électrons (= substrat organique): la quantité de HCC détermine, conjointement avec les accepteurs d'électrons (encore) présents, la quantité de substrat organique nécessaire par assurer une déchloration réductrice complète. Il arrive souvent que les acides humiques naturels (mesurés sous la forme de carbone organique dissous, DOC) présentent des quantités insuffisantes, ce qui limite le potentiel de biodégradation anaérobie.
- La dégradation aérobie de quelques composés chlorés, comme le chlorure de vinyle, requiert la présence d'oxygène dissous.

3.3.2 Voies de dégradation

La biodégradation des HCC comprend généralement plusieurs étapes simples. Une étape peut souvent produire différentes substances, mais il existe généralement un produit de dégradation préférentiel. Le schéma ci-après montre par exemple comment du tétrachloréthène produit du trichloréthène, qui pourra donner à son tour soit du cis-1,2-dichloréthène, soit du trans-1,2-dichloréthène. Mais le trichloréthène se dégrade généralement dans le cis-isomère.

Du fait que la dégradation d'un hydrocarbure chloré produit généralement un autre HCC, la présence de plusieurs HCC peut signaler l'existence éventuelle d'une biodégradation, surtout si les différents HCC appartiennent à la même séquence de dégradation.

Voie de dégradation des éthènes chlorés en conditions anaérobies

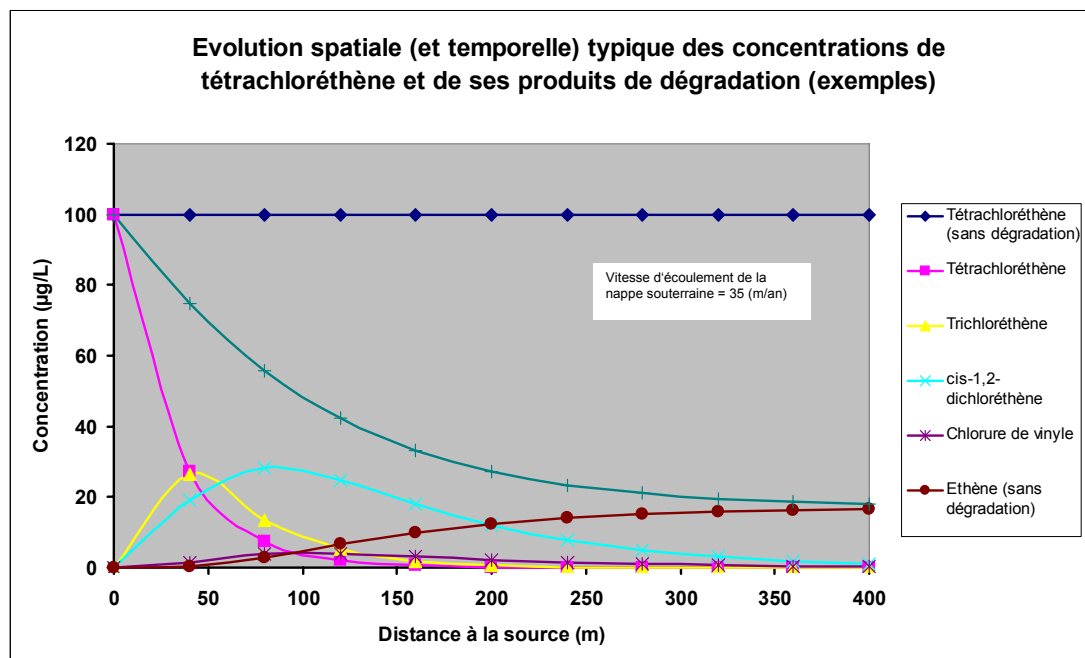


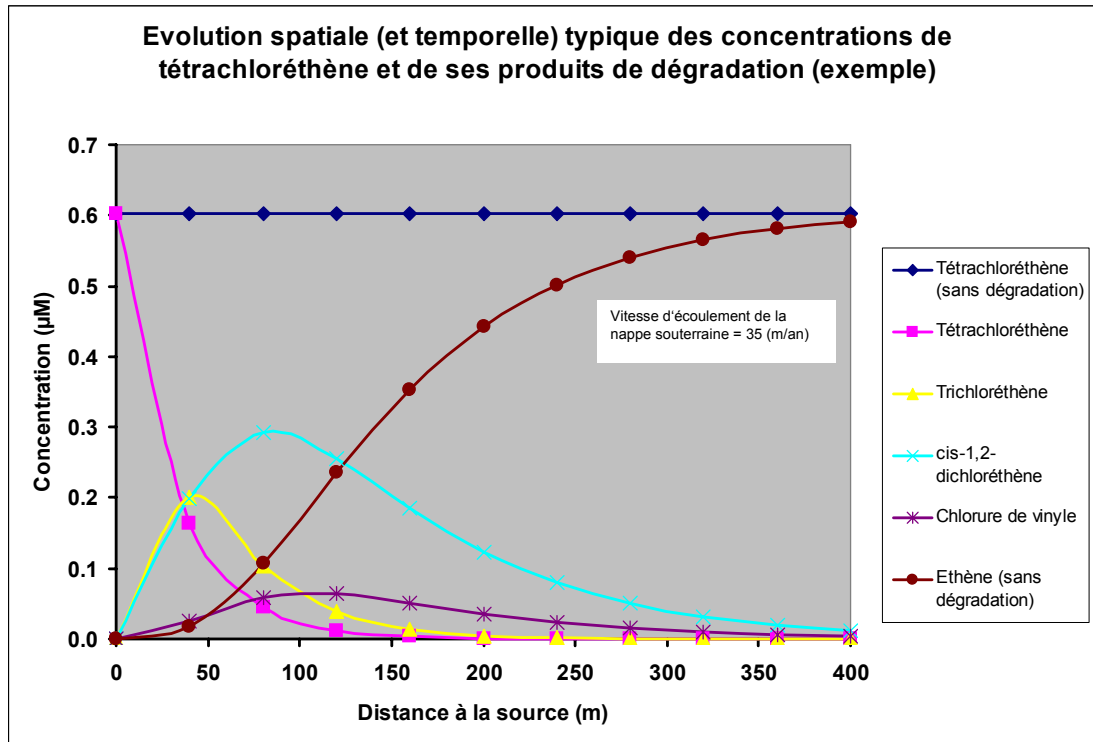
Une déchloration réductive jusqu'au chlorure de vinyle est possible. Le chlorure de vinyle peut également inhiber la transformation du tétrachloréthène. Une dégradation significative du chlorure de vinyle n'est possible principalement que dans des conditions aérobiques (déchloration oxydative).

3.3.3 Cinétique

Les processus de biodégradation se déroulent plus ou moins lentement selon les substances en présence, même sous des conditions semblables. Ce phénomène est particulièrement important, car la dégradation d'un hydrocarbure chloré peut produire d'autres HCC plus problématiques que la substance initiale. Cela concerne par exemple le tétrachloréthène. La dégradation anaérobie de tétrachloréthène en trichloréthène et de trichloréthène en *cis*-1,2-dichloréthène est généralement nettement plus rapide que le passage du *cis*-1,2-dichloréthène au chlorure de vinyle. Cette différence dans les vitesses de dégradation conduit parfois à une accumulation locale et/ou temporaire de *cis*-1,2-dichloréthène dans les eaux souterraines où du tétrachloréthène se dégrade en trichloréthène.

Les deux graphiques (identiques) suivants illustrent ces processus, exposés une fois en concentrations massiques ($\mu\text{g/l}$) et une fois en concentrations molaires ($\mu\text{M} = \mu\text{moles/L}$).





Ainsi que le montre l'exemple ci-dessus, la composition des HCC dissous dans les eaux souterraines peut varier fortement en fonction de l'éloignement de la source de tétrachloréthène et bien sûr de la cinétique de dégradation. Le tétrachloréthène prédomine encore à une quarantaine de mètres de la source de pollution, tandis que le cis-1,2-dichloréthène présente les concentrations les plus élevées à partir d'une septantaine de mètres.

Notons que la somme des concentrations molaires de la substance initiale tétrachloréthène et de ses produits de dégradation, y compris l'éthène (ou son produit de dégradation possible le CO_2), reste constante sur toute la distance de transport. Cette particularité ne s'applique pas lorsque l'on considère les concentrations massiques usuelles.

La biodégradation des HCC peut être stimulée, accélérée, par la mise en œuvre de mesures techniques (procédés d'assainissement).

3.4 Recommandations pour les investigations sur le terrain

Du fait des propriétés des HCC, et notamment de leur volatilité (tension de vapeur et constante de Henry élevées), il est important de prendre des précautions particulières lors du prélèvement d'échantillons sur le terrain et de leur préparation pour obtenir des résultats représentatifs:

- Les échantillons retirés (eau et matériaux solides) seront transférés aussi vite que possible dans un récipient approprié, qui sera rempli à ras-bord (sauf pour les « Headspace vials »). Le récipient, étanche, doit être stocké et transporté dans un environnement réfrigéré. Puis les échantillons seront analysés le plus tôt possible.
- Il est déconseillé de composer des échantillons mixtes à partir de différents échantillons de matière solide, car les HCC peuvent subir d'importantes pertes lors des manipulations. Cela s'applique aux préparatifs des essais de lixiviation, en particulier des essais sur colonnes selon l'OSites.

La détermination analytique de f_{OC} dans des horizons différents est par contre recommandable selon les cas. Elle peut être demandée *a posteriori* lors de la confirmation d'une pollution vraisemblablement importante.

A cause de la grande densité des HCC, si l'on soupçonne la présence d'un DNAPL, il faut éviter de faire des forages au travers de couches peu perméables ou seulement en prenant des mesures de précautions particulières. Ceci, afin d'éviter le transport des HCC dans des couches ou même dans un aquifère plus profonds.

4 Valeurs indicatives et valeurs limites

Le tableau suivant synthétise les valeurs de concentration importantes de l'OSites (annexes 1 et 2) ainsi que d'autres valeurs indicatives et valeurs limites applicables aux HCC contenus dans l'eau (potable) et l'air. Ces valeurs indicatives et limites se fondent sur la combinaison de données de base toxicologiques et de scénarios d'exposition de personnes. Plus une valeur est faible, plus la substance concernée est toxique.

Tableau synoptique des valeurs limites

Substance	Valeur de conc. OSites Eau (mg/L)	Valeur limite eau potable OSEC (mg/L)	Valeur limite eau potable OMS (mg/L)	Valeur limite eau potable US-EPA (mg/L)	Valeur de conc. OSites Air (mL/m ³)	Valeur MAK CH (mg/m ³)
1,2-dibromoéthane	0,00005	-	0,0004	-	-	0,8
1,1-dichloroéthane	3	-	-	-	100	400
1,2-dichloroéthane	0,003	0,003	0,03	0,005	5	20
1,1-dichloroéthène	0,03	0,03	-	0,007	2	8
Cis-1,2-dichloroéthène	0,05*	0,05*	0,05*	0,07	200	790*
Trans-1,2-dichloroéthène	0,05*	0,05*	0,05*	0,1	200	790*
Dichlorométhane	0,02	0,02	0,02	0,005	100	360
1,2-dichloropropane	0,005	-	0,04	0,005	75	350
1,1,2,2-tétrachloroéthane	0,001	-	-	-	1	7
Tétrachloroéthène	0,04	0,04	0,04	0,005	50	345
Tétrachlorométhane	0,002	0,002	-	0,005	5	3,2
1,1,1-trichloroéthane	2	2	-	0,2	200	1080
Trichloroéthène	0,07	0,07	0,02	0,005	50	260
Trichlorométhane	0,04	0,04	0,3	0,08**	10	2,5
Chlorure de vinyle (CV)	0,0001	-	0,0003	0,002	2	5,2

* Valeur limite se référant à la somme du cis- et du trans-1,2-dichloroéthène

** Valeur limite se référant à la somme de tous les trihalométhanes

Lorsque l'OSEC (ordonnance sur les substances étrangères et les composants) ou le MSDA (manuel suisse des denrées alimentaires) indique une valeur limite ou une valeur de tolérance pour une substance contenue dans l'eau potable, cette valeur est reprise comme valeur de concentration à l'annexe 1 de l'OSites. Quant à l'annexe 2 OSites, elle reprend les valeurs limites d'exposition au poste de travail (MAK/VME) comme valeurs de concentration pour l'évaluation de l'air interstitiel.

Le chapitre suivant « Bases et détermination » décrit et explique les bases toxicologiques nécessaires pour calculer de telles valeurs indicatives et valeurs limites.

4.1 Bases et détermination

La toxicologie humaine fait une distinction entre les effets toxiques chroniques et les effets cancérigènes. Les valeurs de concentration figurant à l'annexe 1 de l'OSites se fondent sur la toxicité des substances selon ces deux mécanismes. Pour une personne de 70 kg ingérant 2 litres d'eau (potable) par jour pendant toute sa vie, on a calculé pour chaque substance et chaque mode d'action la concentration à laquelle aucun effet nocif n'est à prévoir, soit la concentration à laquelle le risque de cancer majoré est tolérable. En Europe et en Amérique du Nord on admet habituellement que ce risque doit être $\leq 10^{-5}$. La plus petite des deux valeurs de concentration (arrondie) est intégrée comme valeur limite dans l'annexe 1 OSites. Pour les substances présentant tout à la fois des effets cancérigènes et non cancérigènes, l'effet cancérigène est généralement déterminant.

L'écotoxicologie recourt à plusieurs organismes tests comme indicateurs pour esti-

mer la toxicité des composés présents dans les écosystèmes naturels (en règle générale, toxicité sur les organismes aquatiques comme les algues, daphnies et poissons). Les concentrations considérées comme sans danger pour les eaux superficielles selon les études écotoxicologiques (Predicted No Effect Concentration, PNEC, soit concentration prévue sans effet) servent à vérifier que l'introduction des substances concernées dans des eaux ne générera aucun effet indésirable.

Les paragraphes suivants expliquent quelques termes toxicologiques et indiquent leur rôle dans la détermination des valeurs de concentration de l'OSites:

- Facteur de pente
- Dose de référence
- Concentration maximale au poste de travail
- Concentration prévue sans effet.

4.1.1 Facteur de pente

Facteur de pente (Slope Factor, SF), ingestion orale/inhalation: le produit de la dose moyenne absorbée quotidiennement et du facteur de pente d'un polluant fournit le risque statistique d'être atteint d'un cancer durant une période de 30 ans (scénario de l'autorité américaine en charge de l'environnement, US-EPA). Plus le facteur de pente d'une substance est élevé, plus le risque est grand pour une dose donnée. Ce paramètre est exprimé en $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{j}^{-1})^{-1}$. Il revêt différentes valeurs pour une seule et même substance selon le mode d'exposition (ingestion orale ou par inhalation).

Pour calculer un risque à partir d'un facteur de pente, il faut faire des hypothèses concernant la quantité d'air ou d'eau ingérée pendant une journée. Ce scénario d'exposition sera utilisé pour transformer les concentrations dans l'air ou l'eau en doses quotidiennes, qui fourniront le risque de cancer majoré après multiplication par le facteur de pente pertinent.

Le scénario d'exposition retenu par l'OFEV pour déterminer les valeurs de concentration figurant dans l'OSites tient uniquement compte de l'ingestion orale de 2 litres d'eau potable par jour, pendant 70 ans, par une personne de poids constant égal à 70 kg, pour un risque tolérable de 10^{-5} .

L'US-EPA indique par exemple un facteur de pente de $0,2 (\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{j}^{-1})^{-1}$ pour le 1,1,2,2-tétrachloréthane (aucune valeur concernant l'eau potable dans l'OSEC ni dans le MSDA).

La valeur de concentration applicable au 1,1,2,2-tétrachloréthane selon l'OSites vaut donc:

$$10^{-5} \cdot 70 \text{ kg} / [0,2 (\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{j}^{-1})^{-1} \cdot 2 \text{ L/d}] = 0,0018 \text{ mg/L};$$

→ valeur arrondie selon l'OFEV = 0,001 mg/L

(La valeur de concentration pour le 1,1,2,2-tétrachloréthane calculée en passant par la dose de référence est nettement supérieure, aussi applique-t-on la valeur ci-dessus de 0,001 mg/L.)

4.1.2 Dose de référence

Dose de référence (Reference Dose, RfD): la dose de référence est la dose d'un polluant qu'une personne peut absorber quotidiennement durant toute sa vie sans devoir en attendre des effets néfastes sur sa santé. Ce paramètre est exprimé en ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$), soit en milligrammes de polluant par kilogramme de poids corporel et par jour. Ainsi, plus la RfD d'un composé est faible, plus il est toxique.

La désignation RfD est utilisée par l'autorité américaine en charge de l'environnement (Environmental Protection Agency, US-EPA), tandis que l'Organisation mondiale de la santé (OMS) utilise la notation TDI (Tolerable Daily Intake) pour désigner la même valeur.

L'US-EPA indique par exemple une dose de référence de $0,06 \text{ (mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{j}^{-1})$ pour le 1,1,2,2-tétrachloréthane (aucune valeur concernant l'eau potable dans l'OSEC ni dans le MSDA).

La valeur de concentration applicable au 1,1,2,2-tétrachloréthane selon l'OSites vaut donc:

$$0,06 \text{ (mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{j}^{-1})\cdot 70 \text{ kg} / 2 \text{ (L/d)} = 2,1 \text{ mg/L}$$

(La valeur de concentration pour le 1,1,2,2-tétrachloréthane calculée en passant par le facteur de pente est nettement inférieure ($0,001 \text{ mg/L}$), aussi applique-t-on cette valeur inférieure en vertu de l'OSites.)

4.1.3 Concentration maximale au poste de travail

Concentration maximale au poste de travail en Suisse (Maximale Arbeitsplatz Konzentration Schweiz, MAK CH): la concentration maximale au poste de travail indique la concentration moyenne la plus élevée dans l'air des postes de travail en une substance donnée (sous forme de gaz, vapeur ou poussière) qui, en l'état actuel des connaissances, ne met pas en danger la santé de la très grande majorité des travailleurs sains qui y sont exposés pour une durée de 42 heures hebdomadaires, à raison de 8 heures par jour, pendant de longues périodes.

4.1.4 Concentration prévue sans effet

Concentration prévue sans effet (Predicted No Effect Concentration, PNEC): concentration en-deça de laquelle il n'y a lieu de s'attendre à aucun effet négatif sur l'écosystème aquatique.

La détermination de la PNEC est basée sur les résultats d'essais normés en laboratoire menés avec différents organismes tests aquatiques. Ces résultats sont fournis sous la forme de EC_{50} ou LC_{50} (concentration pour laquelle 50 % des organismes présentent des effets ou meurent) ou de NOEC (concentration pour laquelle aucun effet n'est observé). Afin de déterminer la PNEC, cette concentration ($L(E)C_{50}$, NOEC) est divisée par un facteur de sécurité, dépendant du nombre et de l'espèce des organismes tests, selon le tableau ci-dessous.

Facteurs de détermination de la PNEC en cas d'effets aquatiques ¹⁾

Informations disponibles	Facteurs appliqués pour déterminer la PNEC
L(E)C ₅₀ aiguë la plus basse dans une série de données concernant des algues, des daphnies et des poissons	1000
1 NOEC chronique (poissons ou daphnies)	100
2 NOEC chroniques dans une série de données concernant des poissons et/ou des daphnies et/ou des algues	50
Plusieurs NOEC chroniques dans une série de données concernant des poissons, des daphnies et des algues	10
Méthode de la « Species sensitivity distribution (SSD) » ²⁾	5-1 (justifiée seulement de cas en cas)
Données de terrain ou modèles d'écosystèmes	révision nécessaire de cas en cas

PNEC Predicted no effect concentration (concentration prévue sans effet)

NOEC No observed effect concentration (concentration ne provoquant aucun effet observé)

¹⁾ European Communities (2003). Technical guidance document in support of commission directive 93/67/EEC on risk assessment for new notified substances and commission regulation (EC) No. 1488/94 on risk assessment for existing substances and of Directive 98/8/EC of the European Parliament and of the Council concerning the placing of biocidal products on the market.

²⁾ Dans les courbes SSD, la distribution des données NOEC est reportée logarithmiquement en regard de la proportion d'espèces affectées. La PNEC usuellement tirée d'une telle courbe tolère une menace pour 5 % des espèces, ce qui revient à en protéger 95 %.

On a par exemple trouvé dans la littérature 14 études d'écotoxicité concernant le 1,1,2,2-tétrachloréthane, dont 2 portant sur des algues, 7 sur des poissons et 5 sur divers invertébrés/crustacés (y c. 3 sur des daphnies). Ces séries de données étant de bonne qualité pour les algues, les daphnies et les poissons, elles satisfont aux exigences posées au calcul des valeurs PNEC.

La valeur EC₅₀ la plus basse, de 0,84 mg/L (portant sur des invertébrés/crustacés *Artemia salina*), divisée par le facteur de sécurité de 1000, fournit la PNEC déterminante pour le 1,1,2,2-tétrachloréthane, de 0,00084 mg/L.

5 Sources d'informations recommandées

- [1] Eurochlor (2001): Chlorinated Solvents Digest n° 20.
<http://www.eurochlor.org/index.asp?page=358>
- [2] Eurochlor (2005): Chlorinated Solvents Digest n° 27.
<http://www.eurochlor.org/upload/documents/document201.pdf>
- [3] Stupp, H.D. (2001): DNAPL in Boden und Grundwasser Verhalten von LCKW und PAK Öle.
<http://www.dscweb.de/Publikationen/DNAPL%20in%20Boden/paper8.html>
- [4] Page d'accueil du magazine allemand « Altlasten Spektrum ».
<http://altlastendigital.de/homepage.html>
- [5] Wiedemeier, T.H. et al. (1999): Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface, ISBN 0-471-19749-1.
- [6] United States Environmental Protection Agency (US-EPA) (1998): Technical protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in groundwater, EPA/600/R-98/128.
http://www.epa.gov/correctiveaction/resource/guidance/rem_eval/protocol.pdf
- [7] Système d'information européen sur les substances chimiques (European chemical Substances Information System ESIS). <http://ecb.jrc.it/esis/>
- [8] UK Environment Agency (2003): An illustrated handbook of DNAPL fate and transport in the subsurface, ISBN 1-844-32066-9.
<http://publications.environment-agency.gov.uk/epages/eapublications.storefront/47e1410a00dc1ed2273fc0a80296065f/Search/Run>
- [9] U.S. EPA Region 9: Superfund, Preliminary Remediation Goals,
<http://www.epa.gov/region09/waste/sfund/prg/index.html>
- [10] Office fédéral de l'environnement (OFEV) (2000): Directive pour la lixiviation en colonne de matériaux de sites pollués, selon l'ordonnance sur les sites contaminés. VU-3409-F. http://www.bafu.admin.ch/publikationen/index.html?lang=fr&action=show_publ&id_thema=5&series=VU&nr_publ=3409
- [11] Page Internet sur les sites contaminés du land allemand de Saxe.
http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/abfall-altlasten_8446.html
- [12] Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) (2007): Evaluations globales de la cancérogénicité pour l'homme: liste de tous les agents évalués à ce jour. <http://monographs.iarc.fr/FR/Classification/crthall.php>
- [13] Rasmussen, K. (1997): Chlorinated solvents, health effects after long-term exposure, public health perspectives. Travail de doctorat à l'Université d'Aarhus (Danemark)
http://diggy.ruc.dk:8080/bitstream/1800/500/1/Chlorinated_solvents.pdf
- [14] Michels, J. Track, T. Gehrke, U. Sell, D., (2001) Leitfaden: Biologische Verfah-

ren zur Bodensanierung. Deutsches Umweltbundesamt, Förderkennzeichen 1491064 <http://www.ufz.de/index.php?de=15535>

6 Fiches techniques des substances

Les principales caractéristiques, désignations et valeurs limites en vigueur pour les quinze hydrocarbures chlorés énumérés sont synthétisées dans les fiches techniques suivantes:

- 1,2-dibromoéthane
- 1,1-dichloréthane
- 1,2-dichloréthane
- 1,1-dichloréthène
- Cis-1,2-dichloréthène
- Trans-1,2-dichloréthène
- Dichlorométhane
- 1,2-dichloropropane
- 1,1,2,2-tétrachloréthane
- Tétrachloréthène
- Tétrachlorométhane
- 1,1,1-trichloréthane
- Trichloréthène
- Trichlorméthane
- Chlorure de vinyle

Les chiffres indiqués ont été rassemblés en âme et conscience. Leur exactitude et leur plausibilité ont été vérifiées dans la mesure du possible. On ne peut toutefois pas exclure tout écart important avec les données de la littérature, notamment en ce qui concerne la solubilité dans l'eau, la constante de Henry et le coefficient K_{OC} de certaines substances. Notons que les données toxicologiques doivent être adaptées périodiquement aux nouvelles connaissances. Il en va de même pour les valeurs indicatives et les valeurs limites.

La classification des substances par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) ne fait que traduire la probabilité qu'une substance ait un effet cancérigène sur l'être humain, sans rendre compte de l'intensité de cet effet. Cette graduation dépend aussi étroitement de la quantité de données disponibles et validées.

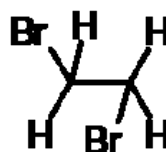
Les groupes selon le CIRC sont définis comme suit:

- 1 La substance est cancérogène pour l'homme.
- 2a La substance est probablement cancérogène pour l'homme.
- 2b La substance est peut-être cancérogène pour l'homme.
- 3 La substance est inclassable quant à sa cancérogénicité pour l'homme (faute de données).
- 4 La substance n'est probablement pas cancérogène pour l'homme.

Au vu du nombre restreint de données disponibles, de très nombreuses substances tombent dans le groupe 3.

1,2-dibromoéthane

Formule structurelle



Synonymes, abréviations

Bromure / dibromure d'éthylène (DBE)

Numéro CAS

106-93-4

Propriétés

Masse molaire (g/mole)	187,90
Densité à 20° C (kg/L)	2,50
Tension de vapeur à 25° C (Pa = kg m ⁻¹ s ⁻²)	1622
Solubilité dans l'eau à 25° C (mg/L)	4400
Constante de Henry à 25° C (-)	0,028
K _{OC} (L/kg)	51

Biodégradabilité

Aérobie (-,+,++)	+
Anaérobie (-,+,++)	+ (seulement cométabolique)

Toxicologie

Facteur de pente, ingestion orale (mg/kg/jour) ⁻¹	2,0
RfD (ou TDI), ingestion orale (mg/kg/jour)	0,009
Facteur de pente, inhalation (mg/kg/jour) ⁻¹	2,0
RfD (ou TDI), inhalation (mg/kg/jour)	0,0026
Groupe AIRC	2A
Ecotoxicologie: PNEC (mg/L)	0,004*

Valeurs indicatives et valeurs limites

Valeur de concentration OSites (mg/L _{eau})	0,00005	
Valeurs limites pour l'eau potable (mg/L)	OSEC: -	OMS: 0,0004
	UE: -	US-EPA: -
Exigences pour les eaux souterraines: OEaux (mg/L)	< 0,001 (pour chaque substance)	
Valeur de concentration OSites (mL/m ³ _{air interstitiel})	-	
Concentration maximale au poste de travail [valeur MAK CH (mg/m ³ _{air})]	0,8	

Applications

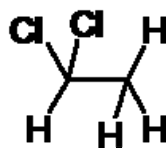
Utilisations (processus, branches)	Additif à l'essence avec plomb, insecticide, production chimique, solvant.
------------------------------------	--

Remarques

Composé en principe dégradable, mais tendant à persister dans le sous-sol et les eaux souterraines.
* Sous réserve, les données disponibles sur les daphnies ne répondent pas aux critères de qualité.

1,1-dichloréthane

Formule structurelle



Synonymes, abréviations

Chlorure / dichlorure d'éthylidène, 1,1-DCA

Numéro CAS

75-34-3

Propriétés

Masse molaire (g/mole)	98,96
Densité à 20° C (kg/L)	1,18
Tension de vapeur à 25° C (Pa = kg m ⁻¹ s ⁻²)	30900
Solubilité dans l'eau à 25° C (mg/L)	5080
Constante de Henry à 25° C (-)	0,245
K _{OC} (L/kg)	38

Biodégradabilité

Aérobic (-,+,,++)	+
Anaérobic (-,+,,++)	+

Toxicologie

Facteur de pente, ingestion orale (mg/kg/jour) ⁻¹	Aucun effet cancérigène connu
RfD (ou TDI), ingestion orale (mg/kg/jour)	0,1
Facteur de pente, inhalation (mg/kg/jour) ⁻¹	Aucun effet cancérigène connu
RfD (ou TDI), inhalation (mg/kg/jour)	0,14
Groupe AIRC	-
Ecotoxicologie: PNEC (mg/L)	0,20-0,02*

Valeurs indicatives et valeurs limites

Valeur de concentration OSites (mg/L _{eau})	3	
Valeurs limites pour l'eau potable (mg/L)	OSEC: -	OMS: -
	UE: -	US-EPA: -
Exigences pour les eaux souterraines: OEaux (mg/L)	< 0,001 (pour chaque substance)	
Valeur de concentration OSites (mL/m ³ _{air interstitiel})	100	
Concentration maximale au poste de travail [valeur MAK CH (mg/m ³ _{air})]	400	

Applications

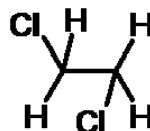
Utilisations (processus, branches)	Dégraissage et nettoyage, production chimique, insecticide, décapage de peinture.
------------------------------------	---

Remarques

* Les données disponibles concernent uniquement les poissons. Valeur estimée pour le mode d'action narcose / toxicité de base. Cette fourchette correspond à un facteur de sécurité additionnel de 10.

1,2-dichloréthane

Formule structurelle



Synonymes, abréviations

Chlorure / dichlorure d'éthylène (DCE), 1,2-DCA

Numéro CAS

107-06-2

Propriétés

Masse molaire (g/mole)	98,96
Densité à 20° C (kg/L)	1,25
Tension de vapeur à 25° C (Pa = kg m ⁻¹ s ⁻²)	11200
Solubilité dans l'eau à 25° C (mg/L)	8430
Constante de Henry à 25° C (-)	0,053
K _{OC} (L/kg)	31

Biodégradabilité

Aérobie (-,+,++)	+
Anaérobie (-,+,++)	+

Toxicologie

Facteur de pente, ingestion orale (mg/kg/jour) ⁻¹	0,091
RfD (ou TDI), ingestion orale (mg/kg/jour)	0,02
Facteur de pente, inhalation (mg/kg/jour) ⁻¹	0,091
RfD (ou TDI), inhalation (mg/kg/jour)	0,0014
Groupe AIRC	2B
Ecotoxicologie: PNEC (mg/L) [source: Eurochlor]	1,1

Valeurs indicatives et valeurs limites

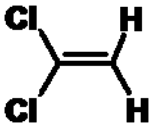
Valeur de concentration OSites (mg/L _{eau})	0,003	
Valeurs limites pour l'eau potable (mg/L)	OSEC: 0,003	OMS: 0,03
	UE: 0,003	US-EPA: 0,005
Exigences pour les eaux souterraines: OEaux (mg/L)	< 0,001 (pour chaque substance)	
Valeur de concentration OSites (mL/m ³ _{air interstitiel})	5	
Concentration maximale au poste de travail [valeur MAK CH (mg/m ³ _{air})]	20	

Applications

Utilisations (processus, branches)	Solvant, production chimique, additif à l'essence avec plomb, produit intermédiaire dans la fabrication de chlorure de vinyle.
------------------------------------	--

Remarques

1,1-dichloréthène

Formule structurelle	
Synonymes, abréviations	Chlorure de vinylidène
Numéro CAS	75-35-4

Propriétés

Masse molaire (g/mole)	96,94
Densité à 20° C (kg/L)	1,22
Tension de vapeur à 25° C (Pa = kg m ⁻¹ s ⁻²)	79400
Solubilité dans l'eau à 25° C (mg/L)	2490
Constante de Henry à 25° C (-)	1,25
K _{OC} (L/kg)	47

Biodégradabilité

Aérobie (-,+,++)	+ (seulement cométabolique)
Anaérobie (-,+,++)	+

Toxicologie

Facteur de pente, ingestion orale (mg/kg/jour) ⁻¹	Aucun effet cancérogène connu
RfD (ou TDI), ingestion orale (mg/kg/jour)	0,05
Facteur de pente, inhalation (mg/kg/jour) ⁻¹	Aucun effet cancérogène connu
RfD (ou TDI), inhalation (mg/kg/jour)	0,057
Groupe AIRC	3
Ecotoxicologie: PNEC (mg/L) [source: Eurochlor]	0,0009

Valeurs indicatives et valeurs limites

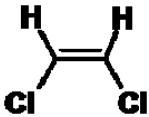
Valeur de concentration OSites (mg/L _{eau})	0,03
Valeurs limites pour l'eau potable (mg/L)	OSEC: 0,03 OMS: - UE: 0,003 US-EPA: 0,007
Exigences pour les eaux souterraines: OEaux (mg/L)	< 0,001 (pour chaque substance)
Valeur de concentration OSites (mL/m ³ _{air interstitiel})	2
Concentration maximale au poste de travail [valeur MAK CH (mg/m ³ _{air})]	8

Applications

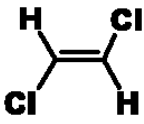
Utilisations (processus, branches)	Décapage de peinture, dégraissage et nettoyage, insecticide, production chimique, fabrication de plastiques (PVDC)
------------------------------------	--

Remarques

Cis-1,2-dichloréthène

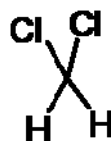
Formule structurelle		
Synonymes, abréviations	Cis-dichloroéthylène, cis-DCE	
Numéro CAS	156-59-2	
Propriétés		
Masse molaire (g/mole)	96,94	
Densité à 20° C (kg/L)	1,27	
Tension de vapeur à 25° C (Pa = kg m ⁻¹ s ⁻²)	28100	
Solubilité dans l'eau à 25° C (mg/L)	5090	
Constante de Henry à 25° C (-)	0,219	
K _{OC} (L/kg)	38	
Biodégradabilité		
Aérobic (-,+,++)	+ (lente**)	
Anaérobic (-,+,++)	+ (lente**)	
Toxicologie		
Facteur de pente, ingestion orale (mg/kg/jour) ⁻¹	Aucun effet cancérogène connu	
RfD (ou TDI), ingestion orale (mg/kg/jour)	0,01	
Facteur de pente, inhalation (mg/kg/jour) ⁻¹	Aucun effet cancérogène connu	
RfD (ou TDI), inhalation (mg/kg/jour)	0,01	
Groupe AIRC	-	
Ecotoxicologie: PNEC (mg/L)	Aucune indication: trop peu de données disponibles	
Valeurs indicatives et valeurs limites		
Valeur de concentration OSites	0,05*	
Valeurs limites pour l'eau potable (mg/L)	OSEC: 0,05*	OMS: 0,05*
	UE: -	US-EPA: 0,07
Exigences pour les eaux souterraines: OEaux (mg/L)	< 0,001 (pour chaque substance)	
Valeur de concentration OSites (mL/m ³ _{air interstitiel})	200	
Concentration maximale au poste de travail [valeur MAK CH (mg/m ³ _{air})]	790*	
Applications		
Utilisations (processus, branches)	Solvant de peintures, d'encres, d'extraction et de produits phytosanitaires, agent réfrigérant.	
Remarques		
	* Ces valeurs se rapportent à la somme du cis- et du trans-1,2-dichloréthène.	
	** Produit préférentiel de biodégradation du trichloréthène; comme le sous-sol ne présente pas toujours les conditions idéales, on en observe souvent une accumulation locale ou temporaire.	

Trans-1,2-dichloréthène

Formule structurelle		
Synonymes, abréviations	Trans-dichloroéthylène, trans-DCE	
Numéro CAS	156-60-5	
Propriétés		
Masse molaire (g/mole)	96,94	
Densité à 20° C (kg/L)	1,27	
Tension de vapeur à 25° C (Pa = kg m ⁻¹ s ⁻²)	40700	
Solubilité dans l'eau à 25° C (mg/L)	6260	
Constante de Henry à 25° C (-)	0,257	
K _{OC} (L/kg)	48	
Biodégradabilité		
Aérobic (-,+;++)	+	
Anaérobic (-,+;++)	+	
Toxicologie		
Facteur de pente, ingestion orale (mg/kg/jour) ⁻¹	Aucun effet cancérigène connu	
RfD (ou TDI), ingestion orale (mg/kg/jour)	0,02	
Facteur de pente, inhalation (mg/kg/jour) ⁻¹	Aucun effet cancérigène connu	
RfD (ou TDI), inhalation (mg/kg/jour)	0,02	
Groupe AIRC	-	
Ecotoxicologie: PNEC (mg/L)	Aucune indication: trop peu de données disponibles	
Valeurs indicatives et valeurs limites		
Valeur de concentration OSites	0,05*	
Valeurs limites pour l'eau potable (mg/L)	OSEC: 0,05*	OMS: 0,05*
	UE: -	US-EPA: 0,1
Exigences pour les eaux souterraines: OEaux (mg/L)	< 0,001 (pour chaque substance)	
Valeur de concentration OSites (mL/m ³ _{air interstitiel})	200	
Concentration maximale au poste de travail [valeur MAK CH (mg/m ³ _{air})]	790*	
Applications		
Utilisations (processus, branches)	Solvant de peintures, d'encre, d'extraction et de produits phytosanitaires, agent réfrigérant.	
Remarques		
	* Ces valeurs se rapportent à la somme du cis- et du trans-1,2-dichloréthène. Généralement produit mineur de biodégradation du trichloréthène.	

Dichlorométhane

Formule structurelle



Synonymes, abréviations

Chlorure / dichlorure de méthylène, DCM

Numéro CAS

75-09-2

Propriétés

Masse molaire (g/mole)	84,93
Densité à 20° C (kg/L)	1,33
Tension de vapeur à 25° C (Pa = kg m ⁻¹ s ⁻²)	57500
Solubilité dans l'eau à 25° C (mg/L)	16900
Constante de Henry à 25° C (-)	0,117
K _{oc} (L/kg)	17

Biodégradabilité

Aérobic (-,+,++)	++
Anaérobic (-,+,++)	+

Toxicologie

Facteur de pente, ingestion orale (mg/kg/jour) ⁻¹	0,0075
RfD (ou TDI), ingestion orale (mg/kg/jour)	0,06
Facteur de pente, inhalation (mg/kg/jour) ⁻¹	0,0016
RfD (ou TDI), inhalation (mg/kg/jour)	0,86
Groupe AIRC	2B
Ecotoxicologie: PNEC (mg/L) [source: Eurochlor]	0,830

Valeurs indicatives et valeurs limites

Valeur de concentration OSites (mg/L _{eau})	0,02
Valeurs limites pour l'eau potable (mg/L)	OSEC: 0,02 OMS: 0,02 UE: - US-EPA: 0,005
Exigences pour les eaux souterraines: OEaux (mg/L)	< 0,001 (pour chaque substance)
Valeur de concentration OSites (mL/m ³ _{air interstitiel})	100
Concentration maximale au poste de travail [valeur MAK CH (mg/m ³ _{air})]	360

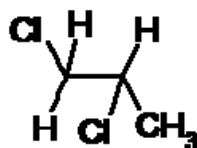
Applications

Utilisations (processus, branches)	Fabrication de plaquettes de circuits imprimés, de plaques d'impression et de films, traitement de films et d'images, production chimique, agent réfrigérant, insecticide.
------------------------------------	--

Remarques

1,2-dichloropropane

Formule structurelle



Synonymes, abréviations

Chlorure / dichlorure de propylène, 1,2-DCP

Numéro CAS

78-87-5

Propriétés

Masse molaire (g/mole)	113,00
Densité à 20° C (kg/L)	1,20
Tension de vapeur à 25° C (Pa = kg m ⁻¹ s ⁻²)	6900
Solubilité dans l'eau à 25° C (mg/L)	2800
Constante de Henry à 25° C (-)	0,114
K _{OC} (L/kg)	92

Biodégradabilité

Aérobie (-,+,++)	-
Anaérobie (-,+,++)	+

Toxicologie

Facteur de pente, ingestion orale (mg/kg/jour) ⁻¹	0,068
RfD (ou TDI), ingestion orale (mg/kg/jour)	0,0011
Facteur de pente, inhalation (mg/kg/jour) ⁻¹	0,068
RfD (ou TDI), inhalation (mg/kg/jour)	0,0011
Groupe AIRC	3
Ecotoxicologie: PNEC (mg/L)	0,041

Valeurs indicatives et valeurs limites

Valeur de concentration OSites (mg/L _{eau})	0,005	
Valeurs limites pour l'eau potable (mg/L)	OSEC: -	OMS: 0,04
	UE: -	US-EPA: 0,005
Exigences pour les eaux souterraines: OEaux (mg/L)	< 0,001 (pour chaque substance)	
Valeur de concentration OSites (mL/m ³ _{air interstitiel})	75	
Concentration maximale au poste de travail [valeur MAK CH (mg/m ³ _{air})]	350	

Applications

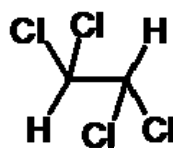
Utilisations (processus, branches)	Additif à l'essence avec plomb, insecticide, décapage de peinture.
------------------------------------	--

Remarques

Valeur limite OMS applicable à l'eau potable provisoire par manque d'informations sur ce composé.

1,1,2,2-tétrachloréthane

Formule structurelle



Synonymes, abréviations

Tétrachlorure d'acétylène, 1,1,2,2-TCA, R-130

Numéro CAS

79-34-5

Propriétés

Masse molaire (g/mole)	167,80
Densité à 20° C (kg/L)	1,60
Tension de vapeur à 25° C (Pa = kg m ⁻¹ s ⁻²)	794
Solubilité dans l'eau à 25° C (mg/L)	3270
Constante de Henry à 25° C (-)	0,0166
K _{OC} (L/kg)	225

Biodégradabilité

Aérobic (-,+,++)	-
Anaérobic (-,+,++)	+

Toxicologie

Facteur de pente, ingestion orale (mg/kg/jour) ⁻¹	0,2
RfD (ou TDI), ingestion orale (mg/kg/jour)	0,06
Facteur de pente, inhalation (mg/kg/jour) ⁻¹	0,2
RfD (ou TDI), inhalation (mg/kg/jour)	0,06
Groupe AIRC	3
Ecotoxicologie: PNEC (mg/L)	0,00084

Valeurs indicatives et valeurs limites

Valeur de concentration OSites (mg/L _{eau})	0,001	
Valeurs limites pour l'eau potable (mg/L)	OSEC: -	OMS: -
	UE: -	US-EPA: -
Exigences pour les eaux souterraines: OEaux (mg/L)	< 0,001 (pour chaque substance)	
Valeur de concentration OSites (mL/m ³ _{air interstitiel})	1	
Concentration maximale au poste de travail [valeur MAK CH (mg/m ³ _{air})]	7	

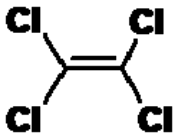
Applications

Utilisations (processus, branches)	Production chimique, décapage de peinture, fabrication de films et de plaques d'impression, solvant de peintures et d'encres.
------------------------------------	---

Remarques

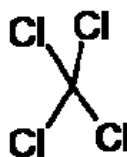
Produit intermédiaire dans la fabrication d'autres HCC; souvent impurité dans d'autres HCC.

Tétrachloréthène

Formule structurelle		
Synonymes, abréviations	Perchloroéthylène, perchloroéthène, tétrachloroéthylène, PCE, Per	
Numéro CAS	127-18-4	
Propriétés		
Masse molaire (g/mole)	165,80	
Densité à 20° C (kg/L)	1,62	
Tension de vapeur à 25° C (Pa = kg m ⁻¹ s ⁻²)	2500	
Solubilité dans l'eau à 25° C (mg/L)	141	
Constante de Henry à 25° C (-)	0,730	
K _{oc} (L/kg)	374	
Biodégradabilité		
Aérobic (-,+,++)	-	
Anaérobic (-,+,++)	++ (se dégrade en trichloréthène)	
Toxicologie		
Facteur de pente, ingestion orale (mg/kg/jour) ⁻¹	0,54	
RfD (ou TDI), ingestion orale (mg/kg/jour)	0,01	
Facteur de pente, inhalation (mg/kg/jour) ⁻¹	0,021	
RfD (ou TDI), inhalation (mg/kg/jour)	0,01	
Groupe AIRC	2A	
Ecotoxicologie: PNEC (mg/L) [source: rapport EUR 21680]	0,051	
Valeurs indicatives et valeurs limites		
Valeur de concentration OSites (mg/L _{eau})	0,04	
Valeurs limites pour l'eau potable (mg/L)	OSEC: 0,04	OMS: 0,04
	UE: 0,01*	US-EPA: 0,005
Exigences pour les eaux souterraines: OEaux (mg/L)	< 0,001 (pour chaque substance)	
Valeur de concentration OSites (mL/m ³ _{air interstitiel})	50	
Concentration maximale au poste de travail [valeur MAK CH (mg/m ³ _{air})]	345	
Applications		
Utilisations (processus, branches)	Dégraissant (traitement des métaux, ateliers d'horlogerie), détergent (nettoyage chimique), solvant (industrie chimique), fabrication de plaques d'impression et de films.	
Remarques	* Cette valeur se rapporte à la somme du tétrachloréthène et du trichloréthène.	

Tétrachlorométhane

Formule structurelle



Synonymes, abréviations

Tétrachlorure de carbone, R-10

Numéro CAS

56-23-5

Propriétés

Masse molaire (g/mole)	153,80
Densité à 20° C (kg/L)	1,59
Tension de vapeur à 25° C (Pa = kg m ⁻¹ s ⁻²)	14500
Solubilité dans l'eau à 25° C (mg/L)	826
Constante de Henry à 25° C (-)	1,10
K _{OC} (L/kg)	238

Biodégradabilité

Aérobic (-,+,,++)	-
Anaérobic (-,+,,++)	+ (seulement cométabolique)

Toxicologie

Facteur de pente, ingestion orale (mg/kg/jour) ⁻¹	0,013
RfD (ou TDI), ingestion orale (mg/kg/jour)	0,0007
Facteur de pente, inhalation (mg/kg/jour) ⁻¹	0,053
RfD (ou TDI), inhalation (mg/kg/jour)	0,0007
Groupe AIRC	2B
Ecotoxicologie: PNEC (mg/L) [source: Eurochlor]	0,007

Valeurs indicatives et valeurs limites

Valeur de concentration OSites (mg/L _{eau})	0,002	
Valeurs limites pour l'eau potable (mg/L)	OSEC: 0,002	OMS: -
	UE: -	US-EPA: 0,005
Exigences pour les eaux souterraines: OEaux (mg/L)	< 0,001 (pour chaque substance)	
Valeur de concentration OSites (mL/m ³ _{air interstitiel})	5	
Concentration maximale au poste de travail [valeur MAK CH (mg/m ³ _{air})]	3,2	

Applications

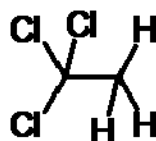
Utilisations (processus, branches)	Dans le passé: solvant, dégraissage de pièces métalliques; récemment: produit intermédiaire dans l'industrie chimique.
------------------------------------	--

Remarques

Interdit en Europe depuis 1996.

1,1,1-trichloréthane

Formule structurelle



Synonymes, abréviations

Chlorothène, méthylchloroforme, TCA, 1,1,1-TCA

Numéro CAS

71-55-6

Propriétés

Masse molaire (g/mole)	133,40
Densité à 20° C (kg/L)	1,34
Tension de vapeur à 25° C (Pa = kg m ⁻¹ s ⁻²)	16600
Solubilité dans l'eau à 25° C (mg/L)	1300
Constante de Henry à 25° C (-)	0,663
K _{oc} (L/kg)	119

Biodégradabilité

Aérobic (-,+,,++)	-
Anaérobic (-,+,,++)	+

Toxicologie

Facteur de pente, ingestion orale (mg/kg/jour) ⁻¹	0,057
RfD (ou TDI), ingestion orale (mg/kg/jour)	0,004
Facteur de pente, inhalation (mg/kg/jour) ⁻¹	0,056
RfD (ou TDI), inhalation (mg/kg/jour)	0,004
Groupe AIRC	3
Ecotoxicologie: PNEC (mg/L) [source: Eurochlor]	0,021

Valeurs indicatives et valeurs limites

Valeur de concentration OSites (mg/L _{eau})	2	
Valeurs limites pour l'eau potable (mg/L)	OSEC: 2	OMS: -
	UE: -	US-EPA: 0,2
Exigences pour les eaux souterraines: OEaux (mg/L)	< 0,001 (pour chaque substance)	
Valeur de concentration OSites (mL/m ³ _{air interstitiel})	200	
Concentration maximale au poste de travail [valeur MAK CH (mg/m ³ _{air})]	1080	

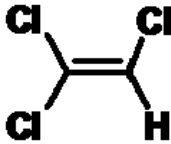
Applications

Utilisations (processus, branches)	Dégraissage de pièces métalliques, nettoyage chimique, fabrication de peintures et d'adhésifs, produit intermédiaire dans l'industrie chimique.
------------------------------------	---

Remarques

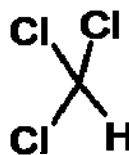
Utilisation fortement limitée depuis 1996 (Protocole de Montréal), car les émissions de TCA détruisent l'ozone stratosphérique.

Trichloréthène

Formule structurelle		
Synonymes, abréviations	Trichloroéthylène, éthylène trichloré, trichlorure d'éthylène, trichlorure d'acétylène, TCE, Tri	
Numéro CAS	79-01-6	
Propriétés		
Masse molaire (g/mole)	131,40	
Densité à 20° C (kg/L)	1,46	
Tension de vapeur à 25° C (Pa = kg m ⁻¹ s ⁻²)	10000	
Solubilité dans l'eau à 25° C (mg/L)	1090	
Constante de Henry à 25° C (-)	0,490	
K _{oc} (L/kg)	185	
Biodégradabilité		
Aérobic (-,+;++)	-	
Anaérobic (-,+;++)	+	
Toxicologie		
Facteur de pente, ingestion orale (mg/kg/jour) ⁻¹	0,4	
RfD (ou TDI), ingestion orale (mg/kg/jour)	0,0003	
Facteur de pente, inhalation (mg/kg/jour) ⁻¹	0,4	
RfD (ou TDI), inhalation (mg/kg/jour)	0,01	
Groupe AIRC	2A	
Ecotoxicologie: PNEC (mg/L) [source: rapport EUR 21057]	0,15	
Valeurs indicatives et valeurs limites		
Valeur de concentration OSites (mg/L _{eau})	0,07	
Valeurs limites pour l'eau potable (mg/L)	OSEC: 0,07 UE: 0,01*	OMS: 0,02 US-EPA: 0,005
Exigences pour les eaux souterraines: OEaux (mg/L)	< 0,001 (pour chaque substance)	
Valeur de concentration OSites (mL/m ³ _{air interstitiel})	50	
Concentration maximale au poste de travail [valeur MAK CH (mg/m ³ _{air})]	260	
Applications		
Utilisations (processus, branches)	Dégraissage de pièces métalliques, solvant de peintures et d'encres, production chimique, nettoyage chimique, fabrication d'adhésifs.	
Remarques	* Cette valeur se rapporte à la somme du tétrachloréthène et du trichloréthène.	

Trichlorméthane

Formule structurelle



Synonymes, abréviations

Chloroforme

Numéro CAS

67-66-3

Propriétés

Masse molaire (g/mole)	119,40
Densité à 20° C (kg/L)	1,48
Tension de vapeur à 25° C (Pa = kg m ⁻¹ s ⁻²)	25100
Solubilité dans l'eau à 25° C (mg/L)	8450
Constante de Henry à 25° C (-)	0,144
K _{oc} (L/kg)	71

Biodégradabilité

Aérobie (-,+,++)	-
Anaérobie (-,+,++)	+

Toxicologie

Facteur de pente, ingestion orale (mg/kg/jour) ⁻¹	-
RfD (ou TDI), ingestion orale (mg/kg/jour)	0,01
Facteur de pente, inhalation (mg/kg/jour) ⁻¹	0,081
RfD (ou TDI), inhalation (mg/kg/jour)	0,014
Groupe AIRC	2B
Ecotoxicologie: PNEC (mg/L) [source: Eurochlor]	0,072

Valeurs indicatives et valeurs limites

Valeur de concentration OSites (mg/L _{eau})	0,04	
Valeurs limites pour l'eau potable (mg/L)	OSEC: 0,04	OMS: 0,3
	UE: 0,1*	US-EPA: 0,08**
Exigences pour les eaux souterraines: OEaux (mg/L)	< 0,001 (pour chaque substance)	
Valeur de concentration OSites (mL/m ³ _{air interstitiel})	10	
Concentration maximale au poste de travail [valeur MAK CH (mg/m ³ _{air})]	2,5	

Applications

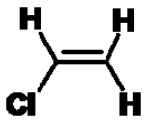
Utilisations (processus, branches)	Production chimique, solvant de produits phytosanitaires, d'arômes, de médicaments, etc., fabrication de plaquettes de circuits imprimés, etc., anesthésique, insecticide.
------------------------------------	--

Remarques

* Valeur limite pour la somme des trichlorométhane, tribromométhane, dibromochlorométhane et bromodichlorométhane.

** Pour la somme de tous les trihalométhanes.

Chlorure de vinyle

Formule structurelle		
Synonymes, abréviations	Chloroéthylène, CV	
Numéro CAS	75-01-4	
Propriétés		
Masse molaire (g/mole)	62,50	
Densité à 20° C (kg/L)	0,91	
Tension de vapeur à 25° C (Pa = kg m ⁻¹ s ⁻²)	4,00×10 ⁵	
Solubilité dans l'eau à 25° C (mg/L)	2800	
Constante de Henry à 25° C (-)	1,10	
K _{OC} (L/kg)	5	
Biodégradabilité		
Aérobie (-,+,++)	++	
Anaérobie (-,+,++)	+	
Toxicologie		
Facteur de pente, ingestion orale (mg/kg/jour) ⁻¹	1,5	
RfD (ou TDI), ingestion orale (mg/kg/jour)	0,003	
Facteur de pente, inhalation (mg/kg/jour) ⁻¹	0,031	
RfD (ou TDI), inhalation (mg/kg/jour)	0,029	
Groupe AIRC	1	
Ecotoxicologie: PNEC (mg/L) [source: Eurochlor]	0,210	
Valeurs indicatives et valeurs limites		
Valeur de concentration OSites (mg/L _{eau})	0,0001	
Valeurs limites pour l'eau potable (mg/L)	OSEC: -	OMS: 0,0003
	UE: 0,0005	US-EPA: 0,002
Exigences pour les eaux souterraines: OEaux (mg/L)	< 0,001 (pour chaque substance)	
Valeur de concentration OSites (mL/m ³ _{air interstitiel})	2	
Concentration maximale au poste de travail [valeur MAK CH (mg/m ³ _{air})]	5,2	
Applications		
Utilisations (processus, branches)	Fabrication de plastiques (PVC).	
Remarques		
	Produit de la biodégradation anaérobie du tétrachloréthène, du trichloréthène et du cis-/trans-1,2-dichloréthène.	