



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et Hydraulique
Filière : Hydraulique
Option : Ouvrage Hydraulique

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:
MASTER

Thème

*Etude expérimentale de l'infiltration
d'un polluant dans un sol sableux*

Présenté par :

BENGOUGA RIMA

Soutenu le :/...../.....

Devant le jury composé de :

Mr. LABADI ABDALLAH

Mr. DJEDRI TOUFIK

Mr. MESSAMEH ABDELHAMID

Président

Encadreur

Examinateur

Année universitaire 2019 / 2020

RESUME

Dans ce travail on s'intéresse au cas de transfert vertical d'un polluant à travers un sol sableux. L'étude est faite au labo à l'aide d'un perméamètre. Le polluant utilisé est le gazole ou communément appelé mazout. Il s'agit de suivre l'infiltration de ce polluant en fonction du temps et déduire les relations qui régissent ce phénomène.

ملخص

تهتم هذه الدراسة بظاهرة ترشيح مادة ملوثة (مازوت) عبر عينة رملية. تتم التجارب بمتابعة ترشيح الملوث بدلالة الزمن و بعد تحليل النتائج نحصل على العلاقات المفسرة لهذه الظاهرة.

LISTE DES SYMBOLES

symbole	Définition	unité
W	humidité pondérale	%
M_w	la masse d'eau	kg
M_S	la masse du solide	kg
0	teneur en eau volumique	%
V_w	volume d'eau	m ³
V_t	volume total	m ³
V_s	volume du solide	m ³
V_a	volume de l'air	m ³
U	Le coefficient d'uniformité	—
n_e	la porosité efficace	%
V_e	volume d'eau gravitaire	m ³
K	la perméabilité	m/ s
q	Est le flux	
H	la charge hydraulique totale.	m
Z	La distance verticale à partir de la surface de sol	m
A	La surface du sol.	m ²
U	la vitesse d'écoulement	m/ s
q= i	Est le régime d'infiltration.	
p_w	la pression du fluide dit mouillant	m
Z	hauteur d'eau infiltrée	mm
h_f	Potentiel de succion au niveau du front	mm
h_0	Hauteur d'eau au niveau de la surface du sol	mm
0_i	Teneur en eau initiale du sol	%
0_f	Teneur en eau finale du sol (à saturation)	%
H_f	Charge hydraulique (potentiel total)	mm
i(t)	la vitesse d'infiltration	mm/ h
ρ_w	la masse volumique de l'eau	(kg/m ³)

LISTE DES FIGURES

<i>Fig. I.1 – Le sol interface d'échange et de transfert</i>	
<i>Fig. I.2- Propriétés des argiles</i>	
<i>Fig. I.3- Modèle de structure d'un composé humique</i>	
<i>Fig. I.4- Comportement des minéraux à charge variable en fonction du pH</i>	
<i>Fig. I.5- Diagramme triangulaire (USDA)</i>	
<i>Fig. I.6 : L'expérience de DARCY</i>	
<i>Fig.I.7 Exemple d'une Courbe granulométriques</i>	
<i>Fig. II .1 - différents modes de transfert des pesticides</i>	
<i>Fig. III.1 – Courbe granulométrique du sable</i>	
<i>Fig.III.2 - Perméamètre (Labo bloc C)</i>	
<i>Fig. III.3 – Evolution des volumes filtrés et retenus au cours des essais</i>	
<i>Fig. III.4 – Courbes de la profondeur d'infiltration en fonction du temps</i>	
<i>Fig. III.5 – Courbes des taux d'infiltration en fonction du temps</i>	

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau n° I.1 : Porosité de quelques roches (Castany G.)</i>	
<i>Tableau n° I.2 Classification granulométrique (Castany G.)</i>	
<i>Tableau n° II.1- Conséquences des propriétés intrinsèques du polluant sur son comportement</i>	
<i>Tableau II.2- Produits pétroliers selon nombre d'atomes de C</i>	
<i>Tableau III.1 : Quelques propriétés du gazole</i>	
<i>Tableau III.2 : Résultat du tamisage</i>	
<i>Tableau n° III.3 : Mesure de la perméabilité du sable</i>	

SOMMAIRE

Introduction	1
Chapitre I : propriétés des sols.	2
I.1- Définition d'un sol	2
I.2- Origine du sol	2
I.3- Organisation du sol	3
I.4- Constituants du sol	3
I.5- Les propriétés physiques et chimiques du sol	4
I.5.1- Propriétés physiques	4
Conclusion	9
Chapitre II Transfert de polluant dans les sols	
II.1- Définition d'un polluant	10
II.2- Les différentes propriétés d'un polluant	10
II.3- Les différents types des polluants	13
II.3.1 - Les hydrocarbures ou huiles minérales	13
II.3.2 - Les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques substitués non ou peu polaires	14
II.3.3 - Les hydrocarbures aromatiques monocycliques (CAV ou BTEX)	16
II.4 - Différents types de transfert :	17
II.4.1 - Le transfert vertical	17
II.4.2 -Le transfert latéral	19
II.5- Les défenses naturelles contre les pollutions :	19
II.5.1 - Rôle du sol :	19
II.5.2 - Rôle du couvert végétal :	20
II.5.3 - Rôle protecteur des berges des cours d'eau	20
II.5.4 - Autoépuration biologique des eaux souterraines	20
II.6- Protection des nappes contre les pollutions :	21
Conclusion	21
Chapitre III Essais expérimentaux	
Introduction	22
III.1- Les caractéristiques physico- chimiques du gazole :	22
III.2- Matériau utilisé	22
III.2.1 – granulométrie du sable	22
III.2.2 – Mesure de la perméabilité du sable utilisé	24
III.3 - Essai d'infiltration	25
III.3 - Interprétation des résultats	26
III.3.2 - Courbes de la profondeur d'infiltration en fonction du temps	27
III.3.3 - Courbes du taux d'infiltration en fonction du temps	27
Conclusion	28

Introduction

La pollution des sols et des eaux est devenu le problème majeur des écosystèmes. Dans ce travail on s'intéresse au phénomène de l'infiltration dans le sol, par l'analyse et l'interprétation d'essais expérimentaux simulant le processus. Il faut d'abord situer le travail dans un contexte plus large, incluant, le sol, avec ses propriétés physicochimiques et hydrauliques, ainsi que les polluants dans toute leur diversité.

On présente donc dans un premier chapitre les propriétés des sols, et milieux poreux en général. Le milieu poreux est caractérisé par un ensemble de paramètres, qui interagissent et déterminent son comportement. Le sol est l'interface qui interfère avec l'hydrosphère, la biosphère et les activités anthropiques.

La connaissance de ces paramètres est nécessaire pour comprendre, analyser et trouver des solutions pour les problèmes de pollution.

Dans deuxième chapitre, on expose quelques aspects des polluants, surtout les hydrocarbures. Les polluants diffèrent aussi bien par leur nature que par leurs effets sur le milieu. On présente donc, dans ce chapitre les paramètres utilisés dans la caractérisation des polluants et ceux intervenants dans leur migration à travers les différents milieux naturels.

L'expérimentation réalisée fait l'objet du troisième et dernier chapitre. On y reproduit les conditions des essais, le matériel et matériaux utilisés. Les essais expérimentaux réalisés consistent à suivre l'infiltration d'un polluant (gazole) dans un échantillon d'un sol (colonne de sol), et déduire une relation qui lie la vitesse d'infiltration au temps et au type de sol.

L'interprétation des résultats se fera par le traçage des courbes de l'infiltration en fonction du temps, et de l'état hydrique du sol utilisé. On déduira de ces essais la manière avec laquelle le polluant utilisé s'infiltré dans le sol.

CHAPITRE I

PROPRIETES DES SOLS

Introduction :

Le milieu poreux est caractérisé par un ensemble de paramètres, qui interagissent et déterminent son comportement. Le sol est l'interface qui interfère avec l'hydrosphère, la biosphère et les activités anthropiques. La connaissance de ces paramètres est nécessaire Pour comprendre, analyser et trouver des solutions pour les problèmes de pollution.

I.1- Définition d'un sol :

Le sol représente une interface entre la lithosphère dont il est la partie la plus superficielle, l'atmosphère, la biosphère, les activités humaines et l'hydrosphère (eaux superficielles ou de nappes) (figure II.1) Robert 1994. Le rôle du sol vis à vis des polluants est complexe : il peut représenter "une source ou un puits", un lieu de dégradation ou de simple transfert. Le rôle du sol comme réacteur biologique ne sera pas traité (Robert 1992, Robert et al 1994) ; par contre nous évoquerons brièvement la présence de constituants spécifiques, que l'on peut dénommer colloïdes : argiles, composés organiques, oxydes et hydroxydes de fer ou d'aluminium, qui expliquent les propriétés physicochimiques des sols.

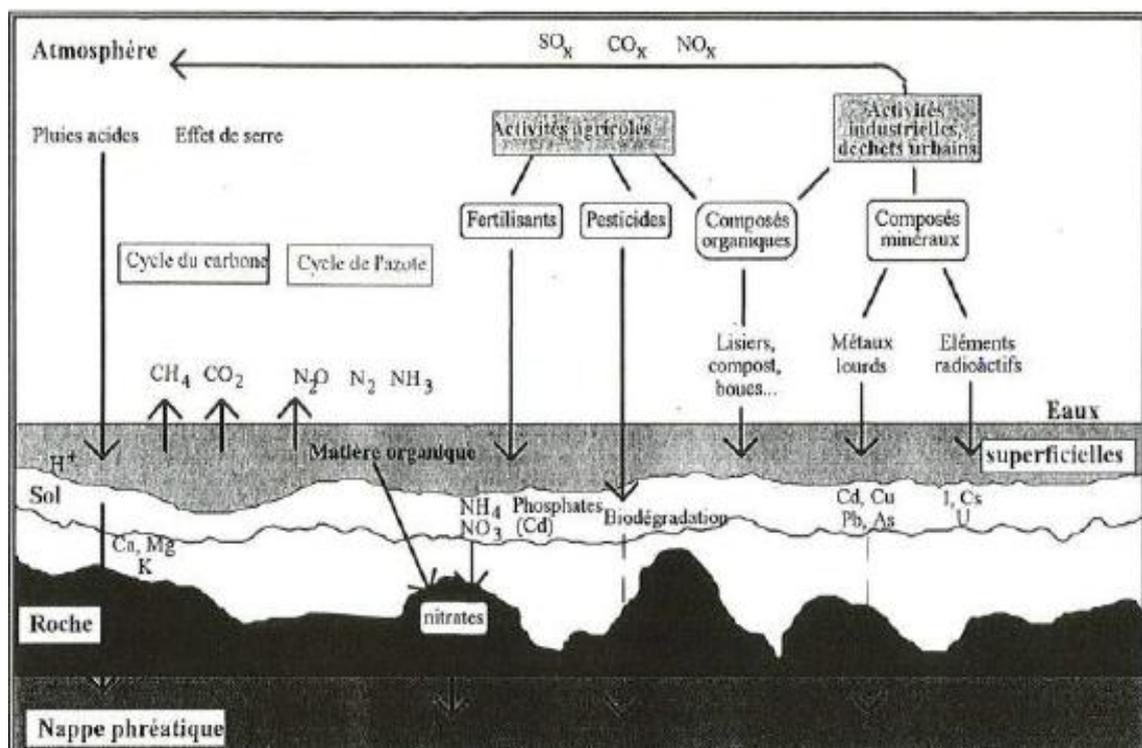


Fig. I.1 – Le sol interface d'échange et de transfert

I.2- Origine du sol :

Le sol provient des formations naturelles de surface, meuble, résultant de la transformation, au contact de l'atmosphère, de la roche mère sous-jacente, sous l'influence des processus physiques, chimiques et biologique. La partie superficielle du sol correspond à la couche arable des agronomes, souvent profondément influencée par l'action de l'homme.

I.3- Organisation du sol :

Le sol est caractérisé par la grande diversité de ses constituants. Arrangement de ses constituants se traduit par l'individualisation d'agrégats élémentaires qui laissent entre eux des vides. En même temps qu'ils favorisent la circulation de l'eau et de l'air. Ces vides servent également d'habitat et de galeries de déplacement pour les organismes qui vivent dans le sol.

Donc un volume de sol est caractérisé par la présence des trois phases naturelles : solide, liquide, gazeuse. (Galla li, 2004)

- a- La phase solide :** la plus importante par sa masse, est composée de particules minérales qui proviennent du complexe d'altération (Sable, limon, argile) et de particules organiques qui proviennent de restitution et de synthèse microbienne
- b- la phase liquide :** est représentée par l'eau du sol qui contient les substances dissoutes et parfois des particules fines en suspension (argile et oxydes de fer)
- c- la phase gazeuse :** lorsque le sol est bien aéré, il est constitué par le même gaz que ceux de l'atmosphère ambiante (carbone, oxygène, dioxyde, azote) (robert, 1996).

I.4- Constituants du sol :

- a- Les argiles des sols :** sont constituées de particules de petite taille (μm) ayant une structure phylliteuse : elles ont donc une grande surface spécifique (10 à 800 m^2/g). Les argiles les plus fréquentes dans les sols des régions tempérées ont une charge électrique généralement négative, ce qui explique la rétention et l'échange des cations (figure II.2)

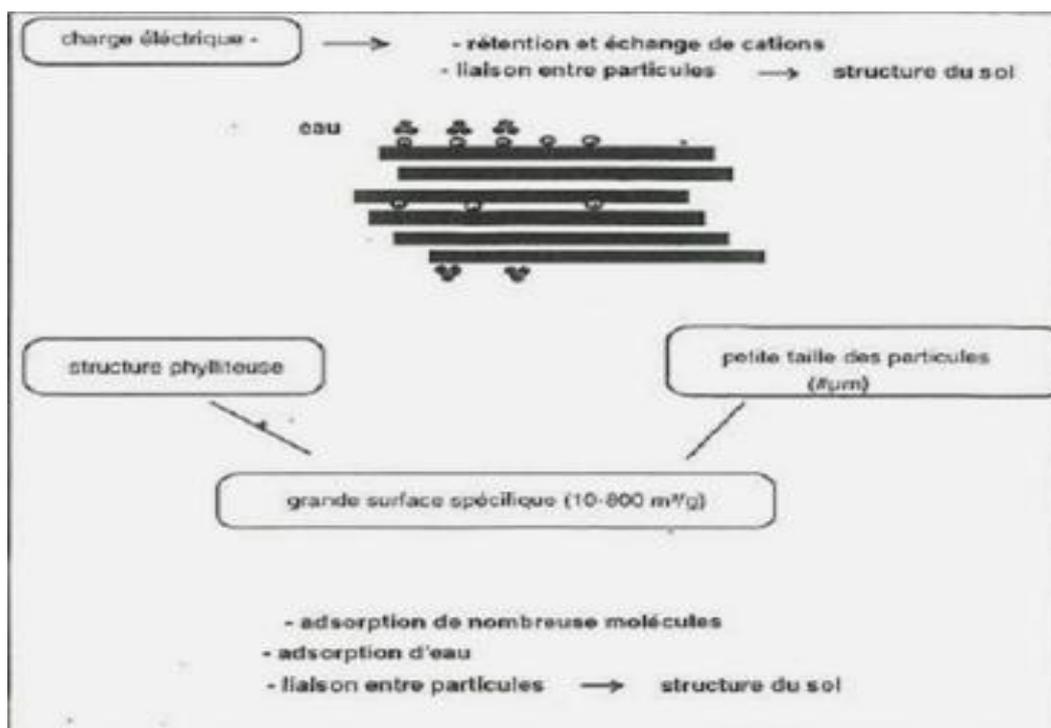


Fig. I.2- Propriétés des argiles (

b- Les composés organiques : spécifiques des sols (acides fulviques, humiques, humine) ont une structure complexe (figure 3), dont la structure primaire comprend des radicaux COOH ou OH dissociables, qui, là encore, sont la source de charges négatives capables de retenir les cations.

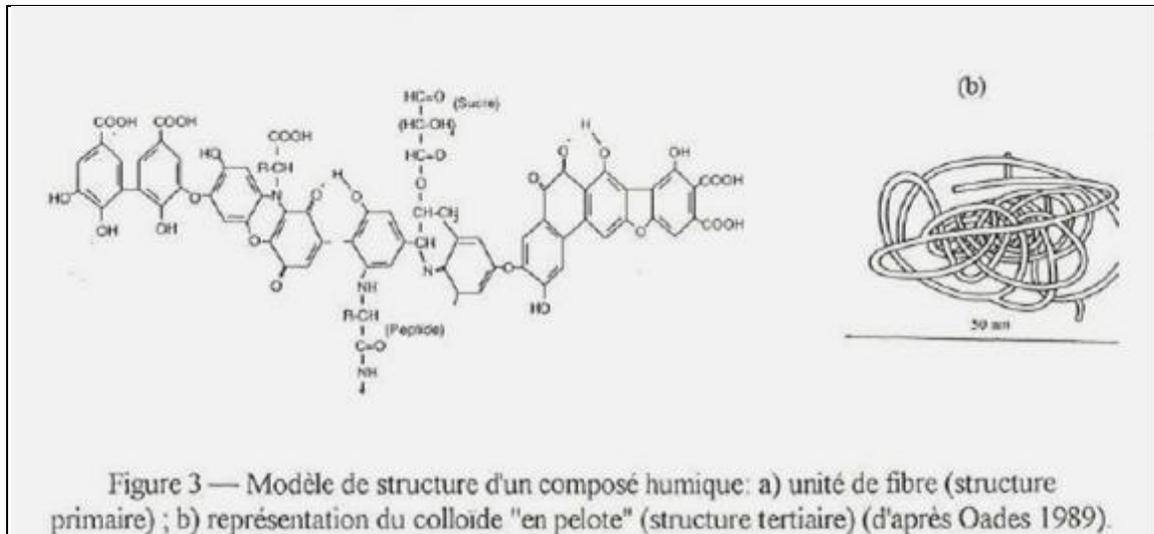


Fig. I.3- Modèle de structure d'un composé humique

c- Les oxydes et hydroxydes : de fer et d'aluminium et certains phyllosilicates neutres (Kaolinites) ont pour leur part des charges variables avec le pH (figure I.4) : positives au-dessous du ZPC (point de charge nulle), négatives au dessus. Les conditions de pH réalisées dans les sols font que le plus souvent ces constituants ont une charge positive.

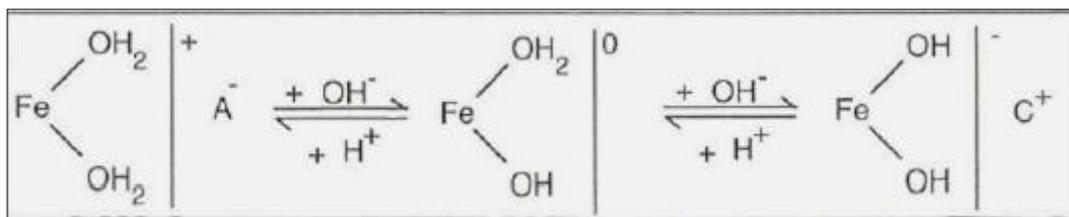


Fig. I.4- Comportement des minéraux à charge variable en fonction du pH

Les solutions qui vont traverser le sol vont donc réagir avec les différents constituants du sol. Les réactions seront dépendantes de la nature des surfaces de ces constituants, mais aussi de la nature des composés présents dans la solution.

I.5- Les propriétés physiques et chimiques du sol :

I.5.1- Propriétés physiques :

a- Texture du sol : Ce sont les éléments minéraux du sol (sable, limon et argile) déterminent la texture du sol. La texture influe sur le comportement d'un sol, en particulier sa capacité de rétention des éléments nutritifs et de l'eau. Les constituants du sol de plus de 2,0 mm sont considérés comme des roches et des graviers et peuvent être inclus dans la classe texturale.

Pour définir la texture de la fraction de terre fine, on s'est servi du diagramme triangulaire représenté ci-dessous (Figure I.5).

La méthode du triangle textural se fonde sur la classification granulométrique de l'USDA, qui répartit les particules de la façon suivante :

- Le limon regroupe toutes les particules dont le calibre est compris entre 0,002 et 0,05 mm.
- L'argile comprend toute les particules dont le calibre est inférieur à 0,002 mm. (BONNEAU ET SOUCHIER, 1994).

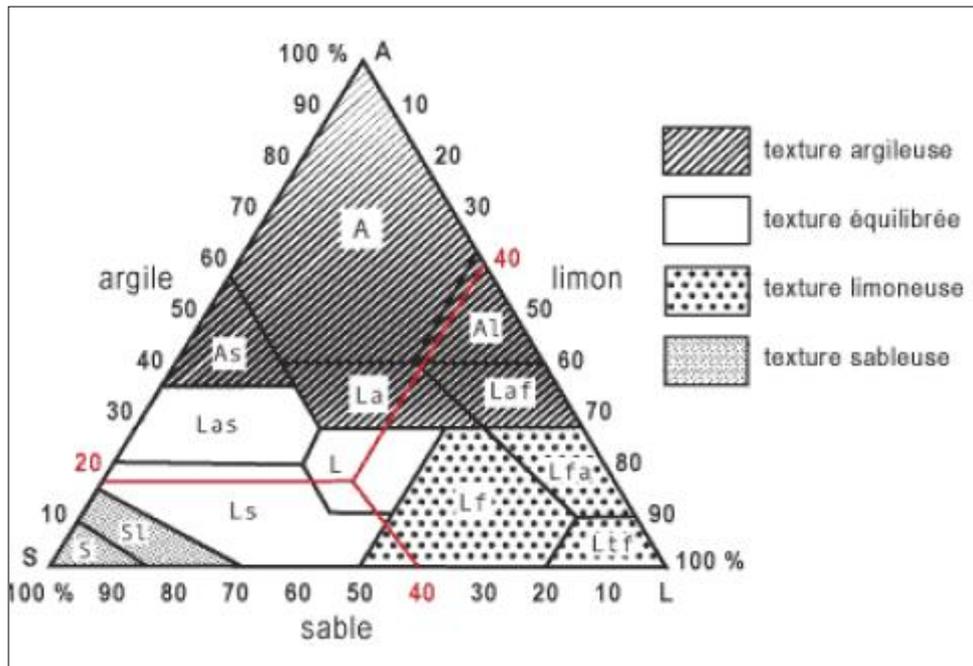


Fig. I.5- Diagramme triangulaire (USDA)

A. : argileux	Al : argilo-limoneux
As : argilo-sableux	La : limono-argileux
Laf : limono-argileux fins	Las : Limono-argileux sableux
L : limoneux	Ls : limono-sableux
Lfa : limoneux fins argileux	Lf : limoneux fins
Ltf : limoneux très fins	Sl : sablo-limoneux
S : sableux	

La connaissance de la texture permet d'indiquer les tendances du sol quant à ses qualités physiques. Par exemple :

- ✓ les sols riches en sables sont perméables, filtrants, ce d'autant plus que le sable est grossier.
- ✓ si aux éléments grossiers, s'adjoignent beaucoup de sable fin et de limon, ceux-ci tendent à colmater les interstices entre les éléments grossiers, rendant le sol plus ou moins imperméable.
- ✓ si des proportions suffisantes d'argile s'ajoutent aux limons et aux sables, surtout en présence d'humus, une structure fragmentaire peut prendre naissance, garantissant, à la fois, une perméabilité tout en retenant assez d'eau pour la végétation.

b- Structure :

La structure du sol se définit par le mode assemblage des constituants solide. Elle est due à la cimentation des grains grossiers (limon, sable) par éléments colloïdaux, argile et humus associés en complexes argilo-humiques. Donc la structure est un état susceptible de modifications dans le temps, sous l'influence des facteurs, favorables ou défavorables.

c- Couleur :

De façon général, la couleur du sol est déterminée par le contenu en matière organique, les conditions de drainage et le degré d'oxydation.

d- Consistance :

C'est la capacité du sol à rester cohérent et résister à la fragmentation. La consistance est mesurée à trois niveaux d'humidité : sol séché à l'air, humide et mouillé.

e- Porosité :

C'est l'espace poral occupé par de l'air ou de l'eau. La porosité totale (pt) se définit de la façon suivante: $Pt (\%) = \text{Volume des vides} / \text{volume total de la roche} \times 100$

Cette porosité totale peut se décomposer en :

- *pe (porosité efficace)* : C'est la quantité d'eau de gravité contenue dans une roche, ou quantité d'eau mobile.

- *cr (capacité de rétention)* : C'est la quantité d'eau liée aux particules et/ou capillaire.

La porosité totale est la somme de ces deux composantes ;

$$pt = pe \text{ (porosité efficace)} + cr \text{ (capacité de rétention)}.$$

Plus la particule est de petite dimension, plus la composante "pe" diminue et, donc, plus la composante "cr" augmente.

Roches poreuses	pt (%)	pe (%)
Sable et gravier	25 à 40	15 à 25
Sable fin	30 à 35	10 à 15
Argile	40 à 50	1 à 2
Craie	10 à 40	1 à 5
Calcaire (fissuré)	1 à 10	10 à 50

Tableau n° I.1 : Porosité de quelques roches (Castany G.)

f- la perméabilité :

La perméabilité exprime la quantité d'eau qui traverse un sol à l'état saturé en une unité de temps. Elle traduit la facilité de l'eau à se déplacer, à ne pas confondre avec la porosité qui est le volume dans lequel l'eau peut se déplacer. Elle est mesurée par la loi de Darcy.

DARCY (1856) a proposé, pour décrire les écoulements unidirectionnels, la relation suivante :

$$(Q/S) = K (H_1 - H_2) / l$$

Où H_1 et H_2 sont les hauteurs piézométriques mesurées aux deux extrémités de l'échantillon (Figure I.6).

Il constate que le débit par unité d'aire Q est proportionnel à $(H_1 - H_2)$ et inversement proportionnel à la longueur l de l'écoulement, tant que $(H_1 - H_2)/l$ n'est pas trop fort. C'est cette relation qui a permis d'exprimer la loi de DARCY :

$$v = -ki \quad (I.2)$$

Avec v : Vitesse de décharge (c'est le débit traversant une section unité) ;

i : Gradient hydraulique ou perte de charge par unité de longueur dans le sens de l'écoulement ;

K : Coefficient de perméabilité du sol qui a la dimension d'une vitesse. Il caractérise à la fois le sol et le liquide filtrant.

Soit Q le débit à travers la section S . Par définition, la vitesse de l'eau est

$$V = Q/S \quad (I.3)$$

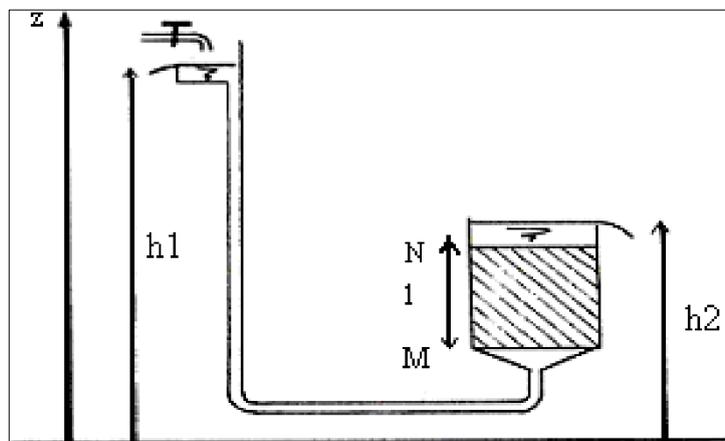


Figure I.6 : L'expérience de DARCY

Il s'agit d'une vitesse apparente car, d'une part, l'eau ne circule que dans les pores et la section réelle disponible n'est que $S.n$ (n : la porosité) ; d'autre part, les pores ne sont pas rectilignes et l'eau fait de nombreux détours, c'est ce qu'on appelle la tortuosité du milieu.

g- La granulométrie :

L'analyse granulométrique d'un sol, consiste à déterminer la proportion des diverses classes de grosseur des particules. On sépare par les analyses de sol, les particules en trois classes distinctes: soit sable (de 2 à 0,05 mm), le limon (de 0,05 à 0,02 mm) et l'argile (inférieure à 0,02 mm).

Cette courbe granulométrique donne pour chaque diamètre, la masse des particules de cette taille ou de taille inférieure. La masse est indiquée en % de la masse totale de la matière sèche de l'échantillon. La courbe est dressée sur un repère en ordonné logarithmique. La forme générale et la pente de la courbe peuvent être décrites en fonction du coefficient d'uniformité (Cu) dit aussi coefficient de HAZEN (1930) ou bien le facteur de pente (coefficient de courbure

D_{10} , D_{30} et D_{60} sont les diamètres correspondants à 10, 30 et 60% respectivement, tirés à partir de la courbe granulométrique.

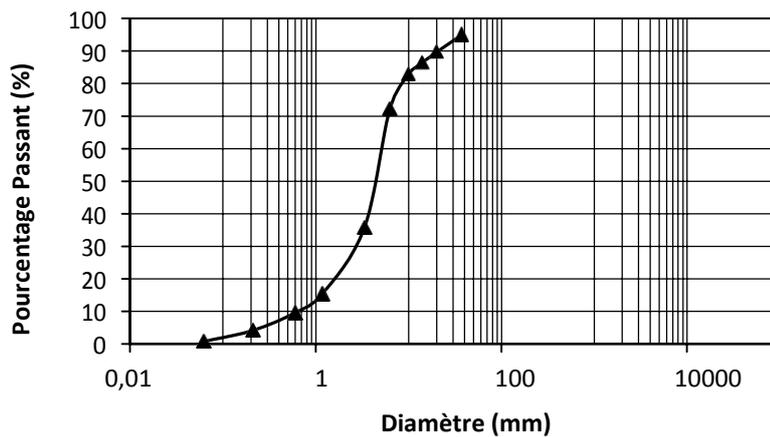


Fig.I.7 Exemple d'une Courbe granulométriques

D'après le coefficient d'uniformité, les sols sont classés en cinq catégories :

Coefficient d'uniformité	Description du sol	
	Granulométrie très serrée	Très peu gradué
	Granulométrie serrée	Peu gradué
	Granulométrie semi-étalée	gradué
	Granulométrie étalée	Bien gradué
	Granulométrie très étalée	Très bien gradué

Tableau n°I.2 Classification granulométrique (Castany G.)

h- La densité :

On dit une densité particulaire est la densité des particules minérales qui composent un sol, c'est-à-dire, qu'elle exclut l'espace poral et la matière organique. La densité particulaire est d'environ $2,65 \text{ g/cm}^3$. Une densité apparente élevée indique soit le compactage du sol soit une forte teneur en sable.

Elle exprime la densité des éléments constituant la phase solide du sol, la « DR » représente la masse du solide / le volume du solide, elle est généralement entre $2,5 \text{ g/cm}^3$ et $2,6 \text{ g/cm}^3$. (MOREL, 1989).

i- L'humidité hygroscopique (H) :

L'humidité hygroscopique représente la quantité d'eau que peut retenir un sol soumis aux conditions d'assèchement naturel. C'est la quantité d'eau retenue à la surface externe des particules du sol et en équilibre avec la pression et l'humidité atmosphérique.

Conclusion :

Le sol représente une interface entre les différents milieux et il est un lieu de transfert de particules et de polluants vers les hydrosystèmes. Le type de transfert (dissous ou particulier) dépend du type de polluant et de sa réaction avec les constituants du sol.

Le transfert vertical peut être plus ou moins rapide en fonction de la perméabilité du sol. Les études récentes privilégient le rôle du transfert rapide, préférentiel, s'effectuant par la macroporosité ou les fissures qui assurent le transport des polluants vers les nappes. Le transfert latéral a lieu dès que l'infiltration de l'eau est insuffisante.

CHAPITRE II

TRANSFERT DE POLLUANTS DANS LES SOLS

Introduction :

Les polluants diffèrent aussi bien par leur nature que par leurs effets sur le milieu. On présente dans ce chapitre les paramètres utilisés dans la caractérisation des polluants et ceux intervenant dans leur migration à travers les différents milieux naturels.

II.1- Définition d'un polluant :

Un polluant désigne un agent physique, chimique ou biologique qui provoque une gêne ou une nuisance dans le milieu liquide ou gazeux. Au sens large, le terme désigne des agents qui sont à l'origine d'une altération des qualités du milieu, même s'ils y sont présents à des niveaux inférieurs au seuil de nocivité. Pour les polluants qui ont un effet nocif sur les organismes vivants, on réserve le terme de contaminants. Des conventions internationales réglementent le rejet des polluants selon leur toxicité. Un polluant est dit altéragène. On peut désigner sous le terme de polluant toute substance artificielle produite par l'homme et dispersée dans l'environnement, mais aussi toute modification d'origine anthropogène affectant le taux ou (et) les critères de répartition dans la biosphère d'une substance naturelle propre à tel ou tel milieu.

II.2- Les différentes propriétés d'un polluant :***a- solubilité dans l'eau ou hydro solubilité :***

La solubilité définit la concentration d'une substance se dissolvant dans l'eau lorsque l'eau et la substance sont à l'équilibre. Cette propriété indique la tendance à la mobilisation de la substance par lessivage lors d'épisodes pluvieux ou par ruissellement ou inondation. On notera qu'une solubilité faible peut être significative en terme de risque lorsqu'elle affecte un composé qui est toxique à faible dose.

b- La densité :

La densité d'un liquide affecte généralement peu son infiltration dans la tranche de sol située au-dessus de la nappe. Par contre, elle contrôle fortement son comportement dans la zone saturée. Si le liquide est immiscible (cas des hydrocarbures, par exemple), le contaminant s'accumulera de préférence en surface de la nappe si sa densité est inférieure à 1, et au plancher de celle-ci si elle est supérieure à 1.

Il convient de tenir compte de la densité des polluants lors des investigations : les piézomètres utilisés doivent atteindre le plancher de l'aquifère si des polluants de densité > 1 sont suspectés.

La densité de vapeur des produits volatils : est exprimée par rapport à l'air, si elle est supérieure à 1, la fraction volatile s'accumulera au toit de la nappe. Si elle est inférieure à 1 cette fraction tendra à se disperser vers l'atmosphère via la zone non saturée.

En principe on ne tient pas compte de la densité pour un polluant soluble dans l'eau ($d=1$). Toutefois, il faut tenir compte de la densité des saumures (Na Cl, CaCl₂), éventuellement

chargées en polluants organiques et/ou métaux lourds, car leur densité est supérieure à l'eau et l'ensemble aura tendance à migrer vers le fond de la nappe.

c- Stabilité :

La dégradation d'un polluant est souvent représentée, en première approximation, par une réaction cinétique de premier ordre. La vitesse de dégradation est caractérisé par un temps de demi-vie. Ce temps représente le temps durant lequel une fraction représentant 50% de la quantité initiale de substance est dégradée, plus ce temps est important, plus le composé montre des potentialités de persistance dans l'environnement.

d- Le Kow (polarité ou hydro phobicité) :

La polarité est directement reliée au coefficient de partage n-octanol/eau (Kow). Le Kow est le rapport de concentration à l'équilibre d'un composé entre une phase eau et une phase n- octanol. Un composé est dit non polaire ou apolaire si $\log Kow > 4$, polaire si $\log Kow < 1.5$ et moyennement polaire si son $\log Kow$ est compris entre ces deux valeurs.

La polarité d'un polluant va influencer sur la manière dont il se fixe dans les sols, et notamment sur la matière organique. Elle va influencer sur la manière dont il est mobilisé par l'eau de pluie ou dont il en est extrait lors des opérations de dépollution. Elle influence aussi sur sa biodisponibilité et sur son potentiel de bioaccumulation.

e- Le Koc :

Le Koc, ou coefficient d'adsorption au carbone organique des sols, plus le Koc est élevé, plus le composé ne tend à quitter l'eau pour se fixer sur la matière organique qui est présente en proportions variables dans tous les sols.

f- Volatilité :

La volatilité d'un composé organique est définie par sa constante de tension de vapeur à 20°C. La tension de vapeur est la pression partielle d'un composé dans la phase gazeuse, en équilibre avec le solide pur ou le liquide pur. Elle est fonction de la température et s'exprime en Pa. Il existe une relation entre la tension de vapeur et le point d'ébullition d'un composé organique, plus sa tension de vapeur est faible, plus son point d'ébullition est élevé. La constante de Henry (ou Kh) s'exprime en $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mole}$.

Les constantes de tension de vapeur n'étant connues que pour un nombre limité de composés, la classification de la volatilité s'effectue, pour des raisons pratiques, sur la base du point d'ébullition des composés à une pression de 1010 hPa.

Un composé est considéré comme volatil si son point d'ébullition est inférieur à 300°C (exemples : hydrocarbures aromatiques, et halogénés volatils, naphthalène, certains chlorophénols). Les valeurs de Kh correspondantes sont supérieures à 100.

Un composé est considéré comme semi-volatil si son point d'ébullition est supérieur à 300°C (exemples : HAP, PCB et pesticides). Les valeurs de K_h correspondantes sont inférieures à 100, dans ce cas, les phénomènes d'adsorption dans les sols jouent un rôle important.

La volatilité d'un polluant influe sur la manière dont il s'infiltré dans les sols, dont il s'en libère par évaporation naturelle ou dont il peut en être éliminé lors des opérations de dépollution, cette propriété est importante pour le choix d'une technique de dépollution.

g- pKa :

Le pKa ou constante d'ionisation acide-base définit la tendance à l'ionisation des composés dans les sols de pH compris entre 5 et 8. Plus cette valeur de pKa est élevée, plus faible est le caractère acide du composé et plus faible également sa tendance à être ionisé. Les composés acides ayant un pKa inférieur à 3-4 seront mobiles dans les sols tandis que les composés basiques ayant un pKa supérieur à 10 seront retenus. Cette donnée est également utile pour définir les conditions d'extraction des polluants, notamment la définition du pH d'extraction.

h- Viscosité :

La viscosité dynamique d'un fluide (μ) influe sur son aptitude à l'écoulement, à l'infiltration et à la circulation dans le sol. Elle exprime en poise (Kg.s/cm² ou Pa.s). Ce paramètre influe donc sur la vitesse de déplacement du contaminant en phase pure (huile), plus la viscosité est élevée, plus le déplacement sera lent.

Propriété	Signification	Incidence
Solubilité dans l'eau ou hydrosolubilité	Tendance à la mobilisation de la substance par lessivage lors d'épisodes pluviométriques ou par ruissellement	Une forte solubilité constitue un facteur aggravant des pollutions. En revanche, les polluants organiques très solubles sont plus facilement biodégradables
Densité liquide Vapeur		Comportement vis-à-vis de la nappe superficielle ou sous-jacente
Temps de demi-vie	Stabilité	Persistance dans l'environnement
Kow (polarité ou hydrophobicité) - Koc coefficient d'adsorption au carbone organique des sols - pKa	Rétention	Influe sur la rétention d'un composé par la matière organique des sols, sur sa mobilisation par de l'eau d'infiltration, ou sur son extraction lors des opérations de dépollution Influe aussi sur la biodisponibilité et le potentiel de bioaccumulation. Tendance d'un composé à être retenu par les sites neutralisables des minéraux des sols, argile notamment.
Tension de vapeur à 20°C Point d'ébullition Constante de Henry	Volatilité	Influe sur la manière dont le polluant s'infiltré dans les sols, dont il s'en libère par évaporation naturelle ou dont il en est éliminé lors des opérations de dépollution ; cette propriété est importante pour le choix d'une technique de dépollution.
Viscosité	Vitesse de déplacement	Cinétique du modèle

Tableau n° II.1- Conséquences des propriétés intrinsèques du polluant sur son comportement

II.3- Les différents types des polluants :

II.3.1 - Les hydrocarbures ou huiles minérales :

a- Définition :

Les hydrocarbures, ou huiles minérales selon AFNOR *31410, regroupent différents produits pétroliers (pétrole brut, pétrole raffiné, kérosène, essences, fuel, lubrifiants, huiles à moteurs). On peut employer aussi le terme « hydrocarbures paraffiniques ».

Cette famille comprend principalement des alcanes (hydrocarbures, aliphatiques) constitués de chaînes linéaires ou ramifiées comprenant au minimum cinq atomes de carbone, caractérisé par un point d'ébullition compris dans l'intervalle 35°C – 490°C.

Elle contient en proportion parfois significative des hydrocarbures aliphatiques cycliques (cyclanes), des hydrocarbures aromatiques monocycliques (benzène, toluène, xylènes...) ou polycycliques (HAP : ex. benzo (a) pyrène), qui sont traités ci-dessous.

On définit les hydrocarbures des familles de dérivés en fonction de leur utilisation ; ces familles sont basées sur des coupes de raffinage pétrolier ; il est possible de préciser le nombre d'atomes des molécules les composant.

Nombre de carbone	Volatil	Nom	Utilisation actuelle
C1	Gaz	Méthane	Gazier distribué (chauffage, énergie, chimie)
C2	Gaz	Ethane	Gazier distribué (chauffage, énergie, chimie)
C3	Gaz	Propane	GPL
C4	Gaz	Butane	GPL
C5-C7	Oui	Naphtas	Pétrochimie
C5-C10 (1)	Liquide	Essence	Carburants : solvant
C9-C20 (1)	Liquide	Kérosène Gas-oil	Carburants : chauffage
C12-C20 (1)	Liquide	Huiles	Lubrifiants
C14-C26 (1)	Non	Gas-oil lourd	Chauffage, production électrique, moteur industriel
C20-C40 (2)	Non	Goudron	Revêtement routier et couverture étanchéité, protection

Tableau II.2- Produits pétroliers selon nombre d'atomes de C
 1) : (présence d'aromatique) 2) : (présence de HAP)

b- Origine :

Les hydrocarbures sont les constituants de la plupart des mélanges combustibles, carburants et lubrifiants. Leur présence dans un sol contaminé est liée aux industries de raffinage et de transformation, à leur transport, leur stockage et leur distribution. On note des pollutions par les sous-produits rejetés (notamment les huiles usagées).

c- Principales propriétés physico-chimiques :

✓ La solubilité :

La solubilité des hydrocarbures aliphatiques dans l'eau est variable mais jamais élevée. On note des valeurs de 3 à 30 mg/l (C5-C7), qui chutent (0.07 sur C9 jusqu'à 0.007 pour C12). La plupart des hydrocarbures sont peu miscibles avec l'eau. Ils tendent à former des couches distinctes lorsqu'ils atteignent les nappes phréatiques.

✓ **La densité :**

La densité des hydrocarbures varie avec la longueur des chaînes carbonées. La plupart des hydrocarbures (C5 à C26), s'accumuleront sélectivement en surface de la nappe (densité inférieure à 1) et les hydrocarbures les plus lourds (fuel lourd) s'accumuleront au plancher de celle-ci (densité supérieure à 1).

✓ **La stabilité :**

La stabilité des hydrocarbures aliphatiques est assez élevée, leur dégradation dans l'environnement, sous l'effet de la lumière ou des bactéries, étant lente.

Les hydrocarbures aliphatiques sont généralement peu polaires (log Kow de l'ordre de 3.5 à 5).

Des valeurs de log Koc proches de 3 sont obtenues pour les n-pentane, heptane, hexane.

La plupart des hydrocarbures légers (C5 à C12) sont volatils (point d'ébullition de 40 à 200°C), les plus lourds (C12 à C26) sont volatils ou semi-volatils (point d'ébullition de 200 à 300 °C).

Les hydrocarbures légers (C5 à C10) ont une viscosité inférieure à 1 (0.2 à 0.9), les plus lourds (C12 à C26) ont une viscosité croit avec la masse (1 à 6).

II.3.2 - Les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques substitués non ou peu polaires (DNAPL et COV) :

a- Définition :

Ce groupe défini par sa faible polarité et sa grande stabilité. les hydrocarbures aliphatiques halogénés (chlorés, fluorés, bromés, iodes) diffèrent des hydrocarbures non substitués par nombre des propriétés physiques, qui influent sur leur comportement polluant. Ils sont d'ailleurs souvent désignés sous les dénominations de DNPL (Dense Non- Aqueous Phase Liquide) ou les hydrocarbures halogénés volatils (COV), basés sur ces propriétés plutôt que sur leur structure chimique ; on note que ces dénominations comprennent quelques hydrocarbures aromatiques halogénosubstitués, et d'autre types de substituant.

b- Origine :

On retrouve ces différentes familles dans nombre de produit industriels : carburants peintures et vernis, diluants et solvant (travail des métaux et industries mécaniques, traitement de surfaces, industrie du cuir, textile, imprimerie, industrie chimique de base, des colorants et des plastiques, activité utilisant des réfrigérants). Ces composés sont employés sous forme liquide mais diffusent largement vers l'environnement sous forme vapeur. De ce fait, les pollutions ponctuelles (fuites, déversements...) peuvent être accompagnées de pollutions diffuses des sols et/ ou des eaux souterraines par infiltration (précipitation, ruissellement, collecte d'eaux pluviales contaminées).

c- Forme dans le sol et sous- sol :

Quatre phases peuvent être vectrices de COV :

- 1- Phase gazeuse : Les COV sont présents sous forme de vapeur dans la zone non saturée.
- 2- Phase solide : les COV sont adsorbés sur les particules des sols, que ce soit en zone saturée ou non saturée.
- 3- Phase aqueuse : les COV sont dissous dans l'eau interstitielle, que ce soit en zone saturée ou non saturée.

- 4- Phase immiscible : les COV sont présents sous forme d'une phase liquide individualisée (NAPL, en général LNAPL), principalement en zone non saturée.

d- Principales propriétés physico-chimiques :

✓ **La solubilité :**

Les variations de solubilité sont suffisamment importantes pour ce groupe :

- La solubilité des hydrocarbures aliphatiques halogénés dans l'eau est plus élevée que celle des équivalents non halogénés (100 à 10 000 mg/l). La solubilité des hydrocarbures aromatiques halogénés est plus faible, de l'ordre de 1 à 1000 mg/l.
- Les hydrocarbures volatils polaires (alcool, cétones...) et semi- volatils polaires (phénols, notamment) sont souvent très solubles.

✓ **La densité :**

La densité des COV/VOC et des SVOC est une autre propriété essentielle. Elle peut être supérieure à 1. Les composés les plus volatils sont généralement les moins denses. Les composés halogénés ont généralement une densité supérieure à 1. C'est pourquoi ce groupe est fréquemment assimilé aux DNAPL.

L'importance de cette propriété pour le comportement des polluants peut amener à subdiviser le groupe dans son ensemble en fonction de la seule densité : < 1 (LNAPL) et > 1 (DNAPL).

Ces composés sont généralement stable, ce qui accroît leur nocivité vis- à - vis de l'environnement. Les composés polaires sont moins stables et plus facilement dégradés.

Les composés de ce groupe sont apolaires (aromatique non substitués), peu ou moyennement polaires pour les halogénés (log Kow de 1 à 3 pour les aliphatiques halogénés, de 2 à 4 pour la plupart des aromatiques halogénés).

✓ **La viscosité dynamique :**

La viscosité dynamique de la plupart des hydrocarbures halogénés est de l'ordre de 0.3 à 1.3cP (très peu visqueux), ces composés seront donc souvent fortement mobiles.

✓ **Comportement :**

La migration des COV dans le domaine des eaux souterraines se produit principalement selon deux mécanismes :

- Leur volatilisation dans la porosité interstitielle au sein de la zone non saturée y produit un panache de COV en phase gazeuse. La migration de ce panache est indépendante du mouvement des eaux souterraines. Elle peut se produire en réponse à l'advection et / ou la diffusion, la migration par advection se produit lorsque l'air présent dans le sol est mis en mouvement sous l'effet de différentiels de pression ou de densité de gaz. La migration par diffusion se produit lorsque les contaminants sont présents dans des zones à forte concentration de vapeur. La volatilisation direct à partir d'une nappe polluée est également susceptible de former un panache de vapeur de composés à fortes tentions de vapeur, et à forte solubilités dans l'eau.
- Leur dissolution dans l'eau souterraine peut se produire aussi bien en zone non saturée qu'en zone saturée, et permettre ensuite leur migration au sein de l'aquifère. les COV insolubles sont des NAPL (DNAPL ou LNAPL).
- Les COV insoluble migrent sous forme de phases séparées à la surface des nappes ou des eaux de surface (COV légers ou LNAPL), ou au fond des nappes (COV de densité > 1 ou DNAPL). Ils peuvent tous se fixer aux particules du sol par leur frange capillaire.

II.3.3 - Les hydrocarbures aromatiques monocycliques (CAV ou BTEX) :

a- Définition :

Les hydrocarbures aromatiques volatils constituent une famille de composés contenant un cycle benzénique C₆, sur lequel se branche une large variété de substituant. On distingue les substituants suivants :

- Radicaux hydrocarbures aliphatiques (méthyle, éthyle,...), qui forment l'essentiel de ce groupe. exemple : le toluène, figure ci- dessous.
- Chlore et autres halogénures, donnant notamment la famille des chlorobenzènes.
- Alcool OH, qui forment le groupe des phénols.
- Nitrate, qui confère des propriétés explosives

b- Origine :

Les dérivés pétroliers contiennent naturellement une petite proportion de dérivés benzéniques. Toutefois, les sources les plus importantes d'hydrocarbures aromatiques sont la carbochimie (cokéfaction et carbochimie de synthèse), et la chimie organique de base, les dérivés benzéniques sont très fréquents dans toute l'industrie chimique de synthèse, l'industrie des plastiques et celle de colorants. Les propriétés sol vantes des ces composés expliquent leur utilisation abondante dans l'industrie mécanique, le traitement de surface, la plasturgie...

c- Principales propriétés physico-chimiques :

✓ *La solubilité :*

La solubilité des hydrocarbures aromatiques non substitués ou substitués par des radicaux aliphatiques est faible. Les hydrocarbures substitués par des radicaux oxygénés, sont plus importants. Ceci entraîne de notables différences de comportement et justifie le traitement des phénols.

✓ *La densité :*

La densité des hydrocarbures aromatiques est en général inférieure à 1, mais elle peut être supérieure à 1 pour les composés les plus substitués.

II.3.4 - Les composés phénoliques (phénols et chlorophénols) :

a- Définition :

Les phénols sont des composés aromatiques hydroxylés comprenant le phénol et ses substitués tels les chlorophénols (mono-, di-, tri-, tétra-, penta-), les nitrophénols les crésols, les diméthylphénols ou xylols, d'après les informations disponibles actuellement, la future norme internationale pour les sols non devrait prendre en considération que les chlorophénols.

b- Origine :

Les phénols font partie de nombreux procédés industriels comme la fabrication du papier, des plastiques, des colorants ou des produits pharmaceutiques et agrochimiques, ils sont également présents dans les effluents de raffineries, de cokeries, de pétrochimie ...les phénols proviennent également à la dégradation des insecticides organophosphorés et des herbicides chlorophénoxyacides ainsi que de transformation de composés organiques naturels, comme les lignines, les tanins et les acides humiques. Dans le groupe des chlorophénols, le pentachlorophénol est considéré comme un polluant prioritaire car il a été longtemps utilisé dans le traitement des bois.

c- Principales propriétés physico-chimiques :✓ **La solubilité :**

La solubilité des phénols est importante : 10 à 100g/l ainsi que celle des dichlorophénols. Le pentachlorophénol est peu soluble 14g/l.

✓ **La densité :**

La densité des phénols varia de 1,018 (para-crésol) à près de 2 (pentachlorophénol). Les plus légers peuvent se rencontrer surnageant sur les eaux de surface ou les nappes, en fonction de leur charge et des effets de tension superficielle.

✓ **Stabilité :** La stabilité des phénols est variable.

✓ **Polarité :** Les phénols sont plus polaires que les autres dérivés aromatiques (log Kow de 1,5 à 2, et de 2 à 5 pour les chlorophénols, peu polaires). Ils sont moins polaires que les alcools, aldéhydes et cétones.

✓ **Koc :** les phénols présentent des log Koc de 1 à 3, les chlorophénols de 2 à 5.

✓ **Volatilité :** les phénols et chlorophénols sont des composés volatils : point d'ébullition de l'ordre de 180 à 200° C, sauf le pentachlorophénol, pE = 310 °C.

✓ **Viscosité :** la viscosité des phénols et chlorophénols est plutôt faibles (2 à 25 cP).

II.4 - Différents types de transfert :

Il y a deux types de transfert :

II.4.1 - Le transfert vertical

Les modalités du transfert vertical de l'eau dans les sols sont très importantes à prendre en compte mais elles sont également très complexes du fait de l'extrême variabilité et hétérogénéité des sols. Si les transferts d'eau se font dans un sol non saturé ou dans des petits pores (< 2 µm) où l'eau est très retenue, la perméabilité K ou vitesse de filtration est très faible (voisine de 10⁻⁹ cm/s pour une argile).

Les phénomènes d'adsorption sur la phase solide ou de minéralisation par les microorganismes auront le temps de se produire et le sol peut jouer pleinement son rôle de filtre ou de système épurateur. Lorsque la circulation se fait sous forme gravitaire dans des pores de taille supérieure à $100\mu\text{m}$, les vitesses de filtration deviennent plus importantes (10^{-5} à 10^{-1} cm/s) : c'est le cas des sols sableux ou des sols ayant une bonne structure agrégée. De même les travaux récents (SSSA 1992) accordent une grande importance aux voies de circulation préférentielle dans le transfert des pollutions.

D'autres pratiques agricoles accentuent les risques de transfert des polluants: c'est le cas de l'irrigation et du drainage. L'augmentation du volume d'eau percolé dans des sols à bonne perméabilité représente un risque supplémentaire de pollution des nappes. Le drainage concerne au contraire des sols hydromorphes (où l'eau s'accumule) ou à mauvaise perméabilité. Là encore il y a une augmentation importante de la perméabilité qui se traduit à l'automne ou pendant l'hiver par l'évacuation de volumes d'eau très importants : les nitrates, les pesticides et même des particules fines pouvant être porteuses de polluants sont évacuées vers les drains et les cours d'eau. La figure II.1 représente les différents modes de transfert pour les pesticides : si les transferts sont rapides ce qui est le cas des sols sableux, des sols irrigués ou drainés, de tous les cas de circulation préférentielle, les prévisions que l'on peut faire sur l'adsorption ou la biodégradation des molécules dans les sols ne sont plus valables, ce qui explique en grande partie les teneurs importantes retrouvées actuellement dans les principales nappes ou eaux superficielles. Ce qui est valable pour les pesticides, l'est plus encore pour les nitrates et peut l'être pour les phosphates sous forme organique (lisiers, purins) ou certains éléments traces toxiques.

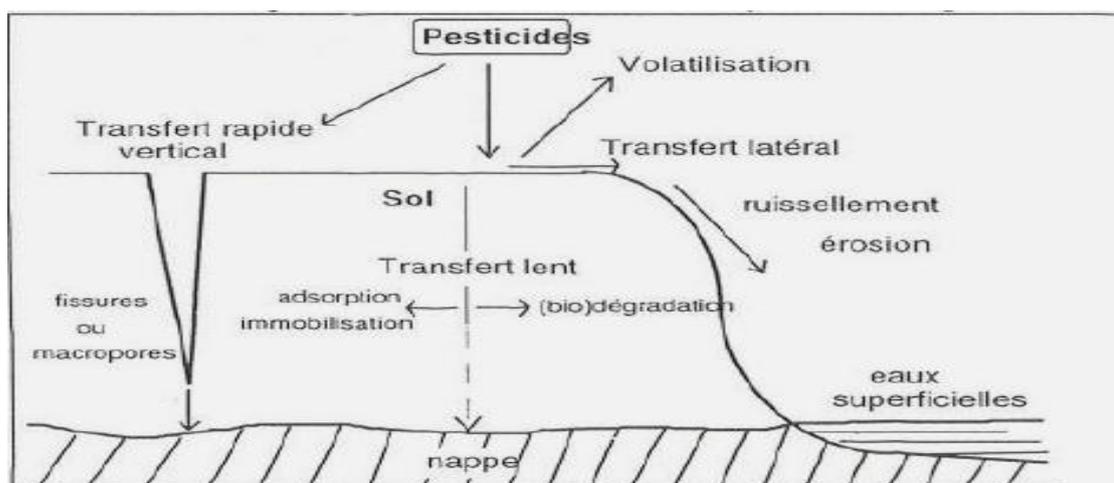


Fig. II.1 - différents modes de transfert des pesticides

II.4.2 -Le transfert latéral :

L'autre cas de transfert important et rapide de polluants vers les eaux superficielles concerne le transfert latéral par ruissellement (flux liquide) et érosion (flux liquide et solide) . Le ruissellement intervient dès que l'intensité de la pluie est plus forte que la vitesse d'infiltration dans le sol. On distingue en général deux cas de ruissellement et d'érosion, le premier est lié à la pente (WISCHMEIER et al 1971) le deuxième à une érosion dite diffuse.

Le deuxième type est l'érosion diffuse. Ce type d'érosion se révèle pour des sols où la pente (< 5 %) n'est pas le facteur essentiel mais qui par leur texture (sols limoneux avec moins de 15% d'argile).

II.5- Les défenses naturelles contre les pollutions :

II.5.1 - Rôle du sol :

Les sols constituent un puissant moyen d'épurations et de recyclage des eaux. Le complexe argilo humique confère des propriétés d'adsorption et d'échange : le sol constitue un système accumulateur de substances très diverses. L'adsorption moléculaire et la rétention du micro polluant organique dans les sols sont plus ou moins forte et plus ou moins réversible. La nature de la molécule détermine son pouvoir de rétention, par son poids moléculaire, par sa charge, par la conformation de la molécule et son affinité à établir des liaisons covalentes, par sa charge, par dans l'eau. La capacité d'adsorption ionique et la rétention des cations (Ca, Mg, K, Na) du sol varient essentiellement en fonction de son épaisseur, de sa teneur en argile et en matières organiques. Les anions tels que Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} ne sont pas retenus et migrent par convection ou par diffusion alors que certaines molécules sont fortement retenues dans le sol, come par exemple les phosphates.

La microfaune et la microflore du sol lui confère une importante capacité d'épuration biologique. Un gramme de sol renferme environ 10^8 à 10^9 bactéries essentiellement non pathogènes. L'azote organique protéinique et l'azote minéral sont métabolisés avec alternance de phases aérobies de minéralisation et de phases anaérobies de dénitrification. Les différentes voies de catabolisme des micropolluants organiques, via des enzymes, aboutissent à la production de déchets (dégradation totale de la matière organique), que sont le dioxyde de carbone et le méthane, ou à des métabolites secondaires (dégradation partielle) parfois plus toxiques que la molécule d'origine En revanche, les solvants chlorés, l'acétone et le benzène sont très peu retenus par les sols et peuvent atteindre rapidement les nappes avec une grande persistance en entraînant avec eux d'autres molécules polluantes adsorbées. Le sol peut être un réservoir pour les germes pathogènes introduits accidentellement. Les bactéries circulent relativement peu dans les et sont retenues dans les premiers centimètres, à la différence u des virus qui sont facilement entraînés et peuvent contaminer la nappe sous-jacente.

II.5.2 - Rôle du couvert végétal :

Le couvert végétal agricole ou forestier agit par ses prélèvements cycliques dans la couche occupée par les racines stockage dans la biomasse puis restitution au sol par dégradation. Les changements d'occupation des sols peuvent rompre cet équilibre : libération importante d'azote liée à la déforestation et la mise en culture, pollution azotée par les jachères travaillées dégradation accélérée de la matière organique par le retournement des prairies,...

II.5.3 - Rôle protecteur des berges des cours d'eau :

Les dépôts vaseux situés au fond des cours d'eau et latéralement à proximité de la berge, riches en bactéries, sont le siège du processus de biodégradation des hydrocarbures, par exemple, et de l'accumulation des métaux lourds (Zn, Pb, Cd, As, Mn) qui se fixent sur les particules argileuses des alluvions.

II.5.4 - Autoépuration biologique des eaux souterraines :

Les organismes vivants et non toxiques (Bactéries et Invertébrés) présents dans les eaux souterraines peuvent jouer un rôle essentiel dans les processus d'autoépuration des polluants des eaux souterraines. Les Invertébrés sont capables de métaboliser et de transformer certains polluants (hydrocarbures, métaux lourds) en des composés à toxicité moindre. La bioaccumulation de polluants, c'est -à-dire l'assimilation et la concentration de substances toxiques par l'organisme, permet de stocker temporairement dans les tissus vivant des polluants et de contribuer à la restauration des milieux. La biotransformation, processus important chez les animaux qui ingèrent de grande quantité de sédiments, réduit également la concentration en éléments toxiques dans la chaîne trophique considérée.

Les bactéries sont les acteurs fondamentaux de la dégradation directe ou indirecte et de l'immobilisation des polluants minéraux ou organiques, ainsi que de la remobilisation des molécules toxiques ou indésirables. Les transformations biotiques sont moins importantes dans les eaux souterraines que dans le sol en raison de la plus faible activité biologique et sont réalisées par des bactéries libres et par des bactéries fixées sur un substratum (sédiments, fraction, argileuse, silt). Cependant, les bactéries libres susceptibles d'être entraînées avec l'écoulement des eaux souterraines et par conséquent avec le flux de polluant, ont un rôle important dans la transformation de ces substances indésirables. Généralement, plus une molécule organique est substituée plus elle est résistante à la biodégradation. Le remplacement du carbone par d'autres atomes comme les branchements multiples sur un atome de carbone, augmente la résistance à la biotransformation des produits organiques. Des polluants organiques toxiques comme les HAP et les PCB sont peu biodégradés. L'activité biologique de bactéries dénitrifiantes se déclenche lors du passage du régime libre au régime captif d'une nappe, c'est-à-dire lorsque l'eau s'appauvrit en oxygène dissous. La teneur en nitrates de l'eau diminue sensiblement.

II.6- Protection des nappes contre les pollutions :

II.6.1 - Le périmètre de protection immédiate :

Ce premier périmètre contient le captage lui-même .sa surface est limitée à quelques centaines de mètre carrés (environ 30 mètres sur 30). La collectivité locale est propriétaire du terrain qu'elle doit clôturer, sauf en cas d'impossibilité. Toutes les activités y sont interdites, sauf celles consacrées à l'exploitation et l'entretien des équipements. Son rôle est d'empêcher la dégradation des ouvrages ou l'introduction directe de substances polluantes dans l'eau.

II.6.2 - Le périmètre de protection rapprochée :

Le périmètre de protection rapproché doit protéger le captage de la migration de substances polluantes. Sa surface dépend des caractéristiques locales, elle varie entre 1 et 10 hectares toutes les activités, installations et dépôts susceptibles de nuire directement ou indirectement à la qualité des eaux sont interdits ou réglementés, il s'agit généralement de :

- La réalisation de forages et puits autres que ceux nécessaires à l'extension ou à la surveillance du champ captant.
- L'exploitation des carrières, le remblaiement d'excavations
- Le dépôt de déchets et de tous produits et matières susceptibles d'altérer la qualité des eaux.
- L'installation de canalisations, réservoirs ou dépôt d'hydrocarbures, de produits chimiques et d'eaux usées.
- L'épandage ou l'infiltration des lisiers et d'eaux usées d'origine domestique ou industrielle.

II.6.3 - Le périmètre de protection éloignée :

Le dernier périmètre n'est pas obligatoire. Il renforce le précédent. Sa surface est très variable. Sont réglementés les activités, dépôts ou installations qui présentent un danger de pollution pour les eaux prélevées, par la nature et la quantité de produits mis en jeu ou par l'étendue des surfaces qu'ils affectent.

Conclusion :

Un polluant désigne un agent physique, chimique ou biologique qui provoque une gêne ou une nuisance dans le milieu liquide ou gazeux. Un polluant est caractérisé par sa solubilité, sa densité, sa viscosité et d'autres propriétés liées à sa nature. Malgré les défenses naturelles des sols, les polluants peuvent arriver aux eaux souterraines, si certaines conditions hydrogéologiques sont présentes. La protection du milieu a incité à établir des politiques de gestion des déchets, de contrôle et suivi de la qualité des eaux et des sols, et de protection des ressources souterraines par l'établissement de périmètres de protection délimités selon les conditions hydrogéologiques des systèmes.

CHAPITRE III

ESSAIS EXPERIMENTAUX

Introduction :

Les essais expérimentaux réalisés consistent à suivre l'infiltration d'un polluant (gazole) dans un échantillon d'un sol (colonne de sol), et déduire une relation qui lie la vitesse d'infiltration au temps et au type de sol.

III.1- Les caractéristiques physico- chimiques du gazole :

Ce tableau récapitule quelques données importantes, et notamment la viscosité, du gazole.

Tableau III.1 : Quelques propriétés du gazole

Caractéristiques	Diesel
Masse volumique (kg/m^{-3})	830
Viscosité 40°C ($\text{mm}^2/\text{s}^{-1}$)	3-5
Indice de cétane	49-52
PCI Massique à 20°C	42 300
PCI Volumique à 20°C	35 000
Point de trouble en °C	-5
Teneur	350

- a- **PCI massique** : il s'agit de la quantité d'énergie libérée lors de la combustion d'un Kilogramme de carburant.
- b- **PCI volumique** : c'est la quantité d'énergie libérée lors de la combustion d'un litre de carburant.
- c- **La viscosité** : La viscosité est une propriété importante des fluides qui décrit une résistance des liquides à l'écoulement et qui est liée à la friction interne qui a lieu dans le fluide. Le type de comportement d'écoulement le plus courant est l'écoulement en cisaillement où les couches de fluide se déplacent les unes par rapport aux autres en réponse à une force de cisaillement. Cette force externe prend la forme d'une contrainte de cisaillement définie comme étant la force agissant sur une unité de surface de fluide.
- d- **Indice de cétane** : L'indice de cétane évalue la capacité d'un carburant à s'enflammer sur une échelle de 0 à 100.

III.2- Matériau utilisé :

Le matériau utilisé est un sable, lavé abondamment pour éliminer les particules fines. Pour le caractériser, on procède à une analyse granulométrique et à la mesure de la perméabilité.

III.2.1 – granulométrie du sable :

La courbe granulométrique est l'outil recommandé pour caractériser un matériau meuble. On a fait l'essai de tamisage au labo, avec un échantillon de 100 g, à cause de la balance disponible. Toutes les données de cet essai sont récapitulées dans le tableau suivant.

Tableau III.2 : Résultat du tamisage

Poids de l'échantillon = 100 g			
Mailles (mm)	Poids retenus (g)	Refus (%)	Tamisats (%)
1.25	0.00	0.00	100.00
1.00	1.90	1.90	98.10
0.8	3.00	3.00	95.10
0.63	19.30	19.30	75.78
0.5	36.50	36.50	39.24
0.4	25.40	25.40	13.81
0.315	11.70	11.70	2.10
0.250	2.00	2.00	0.10
0.200	0.10	0.10	0.00
0.160	0.00	0.00	0.00
Total = 99.90			
Perte = 0.10 %			
TE = 0.37		C.U = 1.54	

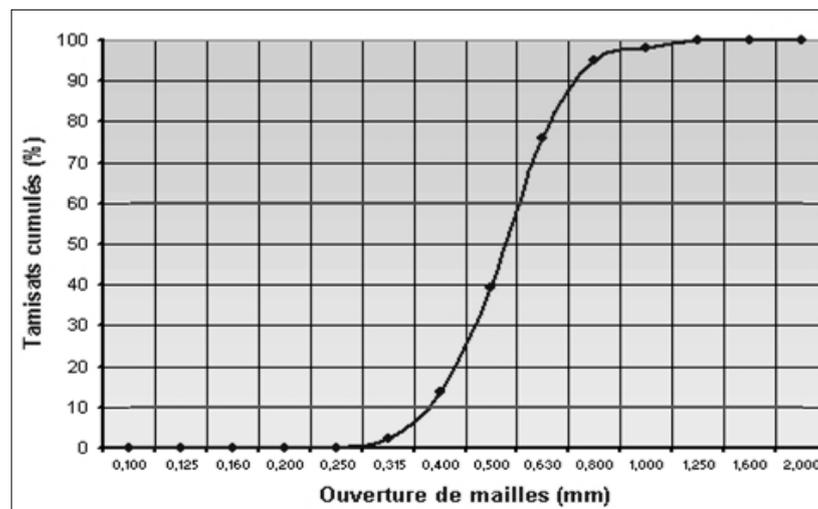


Fig. III.1 – Courbe granulométrique du sable

La courbe des tamisats cumulés est encore appelée courbe granulométrique directe. Elle permet donc de déterminer deux paramètres fondamentaux dans la caractérisation granulométrique des matériaux filtrants, soit :

1. la taille effective TE ou diamètre efficace d_{10} ,
2. le coefficient d'uniformité, CU

La taille effective, exprimée en mm (ou μm) et notée TE, correspond à l'ouverture de maille laissant passer 10% en poids de l'échantillon soumis à l'analyse. Elle donne une indication sur les particules les plus fines. La *diversité* 60 %, exprimée en mm (ou μm), est donnée par l'ouverture de maille laissant passer 60 % en poids de l'échantillon soumis à l'analyse.

Le coefficient d'uniformité, nombre sans dimension, est égal au quotient de la diversité 60 % ou d_{60} par la taille effective. Ce coefficient donne une indication quant à l'homogénéité granulométrique de la masse filtrante. Un coefficient d'uniformité égal à 1 est représentatif d'un sable homogène.

Remarque:

Le *diamètre spécifique* d_s et le *diamètre moyen* d_{50} (ou diamètre 50 percentiles) sont parfois utilisés dans les équations d'écoulement.

Ils peuvent être obtenus à partir de la taille effective et du coefficient d'uniformité par les relations suivantes :

- Diamètre spécifique $d_s = TE (1 + 2 \log CU)$
- Diamètre $d_{50} = TE \times CU^{0.834}$

III.2.2 – Mesure de la perméabilité du sable utilisé :

On détermine la perméabilité du sable en utilisant la loi de Darcy

$$Q = K \cdot i \cdot S$$

Q : est le débit filtré à travers l'échantillon ou volume recueilli par unité de temps.

i : est le gradient hydraulique.

l : est la longueur de l'échantillon = 600 mm.

H : est la charge hydraulique imposée = 640 mm.

S : est la section de l'échantillon = 78.5 cm²

K : est le coefficient de perméabilité du sable.

Les résultats des essais sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau n° III.3 : Mesure de la perméabilité du sable

	H (cm)	i	Temps (s)	Volume filtré (cm ³)	Q (cm ³ /s)	K (cm/s)
Essai N°1	64	1,06	60	180	3	0,036
Essai N°2	64	1,06	60	177	2,95	0,0354
Essai N°3	64	1,06	60	176	2,93	0,0352

Le dispositif utilisé est un perméamètre à charge constante, comme illustré dans la figure ci-dessous. Un béccher est utilisé pour les mesures de volume. Un chronomètre sert à mesurer les durées.

On a effectué trois essais. Les volumes filtrés sont respectivement 176, 177 et 180 cm³ a filtré en 60 secondes, ce qui équivaut à un débit moyen $Q = 2.16 \text{ cm}^3/\text{s}$. Le gradient hydraulique étant égal à 1,06, la perméabilité de ce sable est prise égale à $K = 0,0354 \text{ cm/s}$

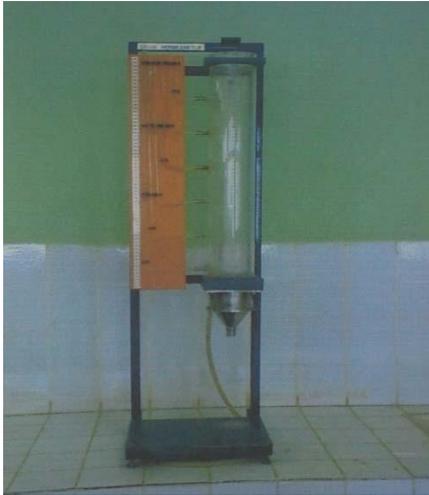


Fig.III.2 - Perméamètre (Labo bloc C)

III.3 - Essai d'infiltration :

L'essai consiste à verser 1 litre de gazole à la surface de l'échantillon et observer l'écoulement vertical du fluide à travers le perméamètre. On relève donc la profondeur du front d'infiltration toutes les minutes. La longueur de l'échantillon étant de 600 mm, la perméabilité du sable étant appréciable, et la quantité de polluant utilisée (1l), font que la durée d'un essai ne peut dépasser une vingtaine de minutes.

Quatre essais, en tout, ont été effectués. Le premier essai, sur le sable sec. On recueille et on mesure les volumes filtrés. Le volume initial de polluant est un litre. Le deuxième essai a concerné le sable humide. Après vingt quatre heures on a procédé au troisième essai. Une fois tout le volume filtré recueilli, on a effectué le quatrième essai.

III.2.1 - Essai numéro 1 : cas de sable sec

Longueur de l'échantillon 600mm

Volume de polluant 1 litre

Volume filtré 0 ml

Volume retenu 1000 ml

Temps (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Profondeur (mm)	0	140	200	240	260	300	330	360	379	387	410	425

III.2.2 - Essai numéro 2 : sable humide (retenant une fraction de polluant) :

Longueur de l'échantillon 600 mm

Volume de polluant 1 litre

Volume filtré 460 ml

Volume retenu 540 ml

Temps (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
Profondeur (mm)	0	136	158	176	192	222	253	282	306

III.2.3 - Essai numéro 3 : sable humide (3^{ème} passage de polluant) :
 Longueur de l'échantillon 600 mm
 Volume de polluant 1 litre
 Volume filtré 530 ml
 Volume retenu 470ml

Temps (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
Profondeur (mm)	0	105	120	135	165	187	198	215	230

III.2.3 - Essai numéro 4 : sable humide
 Longueur de l'échantillon 600 mm
 Volume de polluant 1 litre
 Volume filtré 714 ml
 Volume retenu 286 ml

Temps (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
Profondeur (mm)	0	120	153	172	186	210	235	248	263

Ces résultats montrent de grandes différences entre le sable à l'état sec et à l'état humide.

III.3 - Interprétation des résultats :

Pour le même volume de polluant le comportement du sol est différent au cours de l'expérience. Pour comprendre les forces mises en jeu dans la migration du polluant, l'analyse des fractions filtrés/retenus, introduisent des notions liées aussi bien au fluide qu'au squelette du milieu.

III.3.1 - Analyse quantitative :

On remarque d'emblée qu'à l'état sec, le sable a pratiquement absorbé l'ensemble du polluant, puisqu'aucun volume n'a filtré. Ceci montre l'effet des forces de rétention (adsorption et capillarité) du squelette, ajoutée aux propriétés du fluide (viscosité, densité, volatilité, etc...)

La densité d'un liquide affecte généralement peu son infiltration dans la tranche de sol non saturée. Par contre, elle contrôle fortement son comportement dans la zone saturée. Si le liquide est immiscible (cas des hydrocarbures, par exemple), le contaminant s'accumulera de préférence en surface de la zone saturée si sa densité est inférieure à 1, et au plancher de celle-ci si elle est supérieure à 1.

La volatilité d'un polluant influe sur la manière dont il s'infiltré dans les sols, dont il s'en libère par évaporation naturelle ou dont il peut en être éliminé lors des opérations de dépollution.

La viscosité dynamique d'un fluide influe sur son aptitude à l'écoulement, à l'infiltration et à la circulation dans le sol. Ce paramètre influe donc sur la vitesse de déplacement du contaminant en phase pure (huile) : plus la viscosité est élevée, plus le déplacement sera lent.

Au cours des essais, on constate que le volume filtré augmente et concomitamment le volume retenu diminue, comme illustré sur la figure suivante :

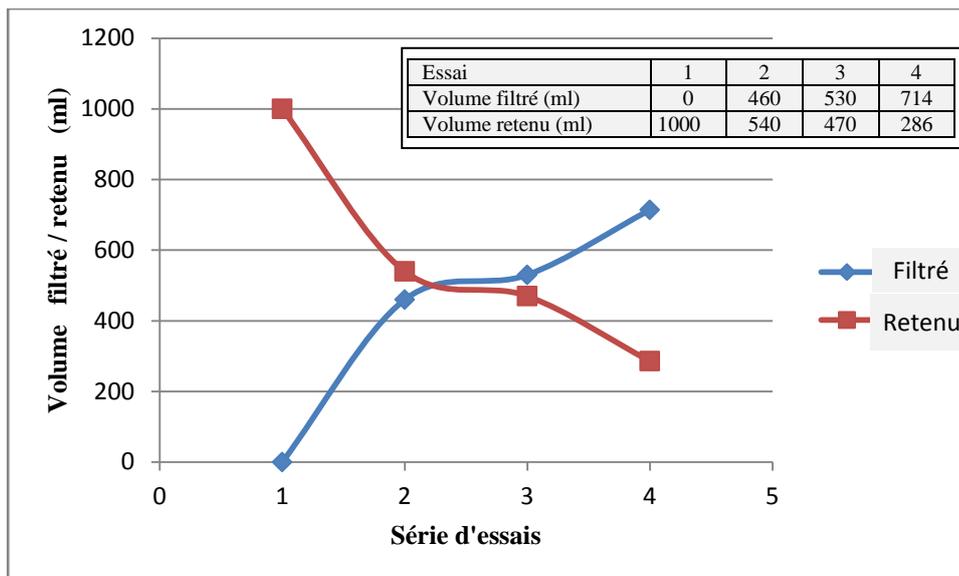


Fig. III.3 – Evolution des volumes filtrés et retenus au cours des essais

Une fois que le polluant a imbibé le squelette la capacité de rétention commence à diminuer, le fluide devient plus libre, malgré l’effet de la viscosité. L’écoulement gravitaire prend le dessus au fur et à mesure que le taux de saturation en gazole augmente.

III.3.2 - Courbes de la profondeur d’infiltration en fonction du temps

Les observations de la profondeur d’infiltration en fonction du temps sont reportées sous forme de courbes $h = f(t)$.

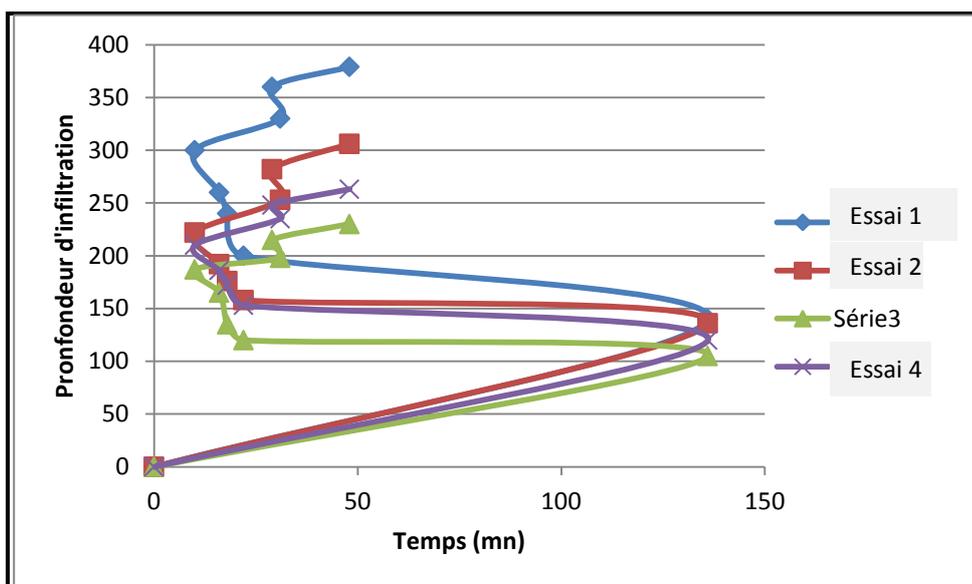


Fig. III.4 – Courbes de la profondeur d’infiltration en fonction du temps

On remarque bien que toutes ces courbes ont quasiment la même allure. Celle du sable à l'état initial sec se détache largement des autres, traduisant l'effet des forces d'absorption et de gravité conjuguées et qui agissent dans le même sens.

Pour les essais suivants, puisque le sable est humide, les forces d'entraînement s'amenuisent, seules la gravité, la viscosité et le gradient hydraulique persistent.

III.3.3 - Courbes du taux d'infiltration en fonction du temps

Sur ces courbes sont représentés les taux d'infiltration en fonction du temps. Comme pour l'eau, les taux d'infiltration suivent la même allure. Un taux maximal, au début du processus, et qui s'infléchit rapidement, après saturation du milieu. Les taux semblent se stabiliser au fur et à mesure que l'échantillon se sature. En comparaison avec l'eau, les vitesses sont plus faibles, vu la que la viscosité du gazole est plus grande.

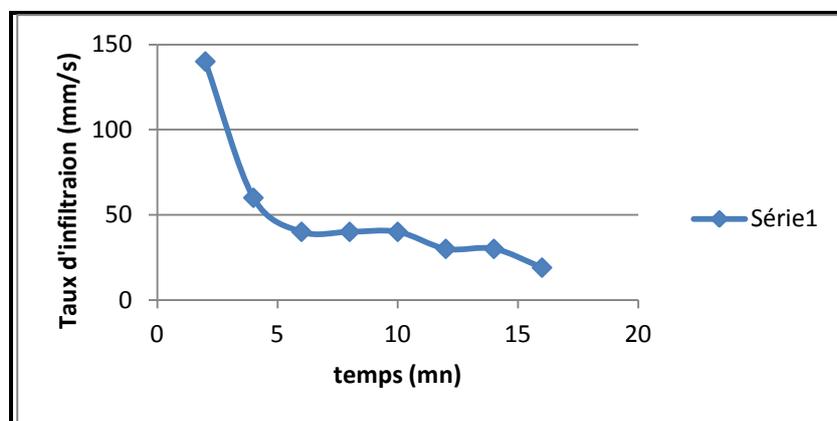


Fig. III.5 – Courbes des taux d'infiltration en fonction du temps (Echantillon initialement sec)

Le polluant continue donc à s'infiltrer, mais avec une vitesse plus faible, relativement aux dimensions de l'échantillon et au volume de gazole utilisé.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les essais expérimentaux réalisés, au laboratoire du bloc C. Après préparation du matériel, nous avons fait une analyse granulométrique du sable utilisé et mesuré sa perméabilité. La deuxième étape a consisté à effectuer des essais d'infiltration, en versant un litre de gazole, (polluant choisi), sur la surface de l'échantillon. Les observations effectuées ont permis de tracer les courbes de l'infiltration en fonction du temps et celles des taux d'infiltration en fonction du temps. L'échantillon initialement sec se distingue par les taux les plus élevés. Même si les courbes ont presque la même allure, l'infiltration à travers l'échantillon humide atteint rapidement sa limite dictée par la perméabilité à saturation du matériau.

Malheureusement, les conditions sanitaires, suite à la pandémie, ne nous ont pas permis de continuer les essais en variant le type de sol, comme initialement programmé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] HILLEL.D « *l'eau et sol*, CABAY, 1984, 288 P *principe et processus physique* ».

[2] CASTANY, G.(1998) : *hydrogéologie « principes et méthodes*
»Edition-DUNOD.

[3] DJEDRI, T. « *Cours d'hydrogéologie*, 1994 »

[4] KHAMOULI AMOR, HAMZA ABDENNACER, « *Etude expérimentale de l'infiltration efficace dans une nappe en pompage* ».

[5] Nasir Khalifa : *Etude expérimentale et numérique de la migration de polluants non miscibles dans un milieu poreux saturé à l'échelle de darcy*, thèse de doctorat, 2009, Université de Strasbourg.