

Table des matières

Introduction générale	1
<u>Chapitre I : Eau et milieux souterrain</u>	
I-Milieu poreux	3
I-1 Description d'un milieu poreux saturé	4
I-1.1 Porosité connectée et porosité occluse.....	4
I.1.2 L'hypothèse de continuité	5
I. 2-Morphologie et intercommunication des vides	5
I.2.1Morphologie des pores et milieu poreux	5
I.2.2Interconnection des pores et milieu continu	5
II L'alimentation du réservoir	5
II.1 Le ruissellement(R)	6
II.2 L'infiltration (I)	6
III. Caractéristiques physiques du milieu perméable	6
III.1.Continuité et discontinuité	6
III.2.Isotropie et anisotropie	7
III.3.Homogénéité et hétérogénéités	7
<u>Chapitre II : Capacité-conductivité et transport en suspension dans un milieu poreux</u>	
I Etude de la fonction capacitive du réservoir	8
I.1La masse volumique sèche	8
I.2La porosité	8
I.3Le volume poreux (V_p)	9
I.4Teneur en eau volumique(θ)	9
I.5Teneur en eau massique(W)	9
I.6 Coefficient d'emménagement (S)	10
II Etude de la fonction conductrice du réservoir	10
II.1Charge hydraulique et piézométrie	10
II.2 Gradient hydraulique (i)	11
II.2.1 La loi de Darcy et la conductivité hydraulique	11
II.2.2 La perméabilité	13
II.2.3Coefficient de perméabilité de Darcy	13
II.2.4La perméabilité intrinsèque (K)	14
II.2.5 La transmissivité (T)	15
II.2.6 La diffusivité(T/S)	15

CHAPITRE III : Mécanismes du transport solide en milieu poreux

I. Impact du transport solide	16
I.1 Le transport facilite les contaminants	16
I.2 L'érosion interne.....	18
I.3 Le colmatage	18
II. Les particules en suspension	19
III. Mobilisation des particules en suspensions.....	21
IV Les forces en présence	23
IV.1 Les forces hydrodynamiques	23
IV.1.1 Force de décantation (gravitationnelle)	23
IV.1.2 Force de traînée.....	24
IV.1.3 Force résultante	25
IV.1.4 Force d'inertie	25
IV.2. Force physicochimiques	25
IV.2.1 Les forces de van der Waals	25
IV.2.2 Les forces de la double couche (forces électrostatiques).....	26
IV.2.3 Répulsion de Born	26
IV.2.4 La théorie D.L.V.O	27
V Capture et dépôt des particules	28
V.1 Capture des particules	28
V.2 Blocage mécanique	28
V.3 Le mouvement et la diffusion brownienne	29
V.4 L'interception directe	30
V.5 La vitesse de décantation (Sédimentation)	29
VI Dépôt des particules	30
VII Adsorption et désorption : processus réversibles	30
VIII. Caractéristique d'une courbe de restitution	33
<u>Chapitre IV : Processus du transport dans les milieux poreux</u>	
I. La convection	36
II. La Dispersion	37
II.1 La dispersion mécanique	39
II.1.1 La dispersion de Taylor- Iris	39
II.1.2 La dispersion associée aux différentes vitesses d'écoulement.....	39

II.1.3La dispersion cinématique	40
III La diffusion moléculaire	41
IV La dispersion hydrodynamique	41
V Equation de transport dans une colonne au laboratoire.....	42
<u>CHAPITRE V : Description et étude des paramètres physique</u>	
I. Description du modèle expérimental.....	46
II. Description du milieu poreux utilisé	47
II.1Etude granulométrique	47
II.2Calcul des paramètres physiques du milieu	49
II.2.1La densité	49
II.2.2La porosité	50
III. La perméabilité.....	50
III.1Détermination de la perméabilité à partir de la courbe granulométrique	50
III.2Détermination de la perméabilité à partir du perméamètre.....	50
III.3Détermination de la perméabilité à partir de la colonne expérimentale.....	51
IV. Le remplissage de la colonne.....	52
V.1Les matériaux en suspension	52
V.1.1 La sédimentométrie des matériaux en suspension	53
<u>CHAPITRE VI : Mode opératoire et expérimentation</u>	
I.Application de la loi de Darcy pour les paramètres de montage	55
I.1Variation de (h_1-h_2) en fonction du débit	55
I.2Variation du gradient hydraulique en fonction de la vitesse d'écoulement.....	57
II.L'Injection des particules en suspension	58
III. Courbes de restitutions.....	59
IV. Interprétation des courbes de restitution	64
V. Calcul de la dispersion par la méthode dite « Ecart-type » (Fried et Combarous, 1971)	67
<u>CHAPITRE 7 : ETUDE DES PARAMETRES HYDRODISPERSIVES</u>	
I. Identification des paramètres de transport et de traçage.....	69
I.1Méthode des moments.....	72
I.2Méthode graphique linéaire (MGL)	72
II.RESOLUTION DE L'EQUATION CONVECTION-DISPERSION.....	74
II.1Résolution avec la méthode des moments.....	74
II.2 Résolution par la méthode graphique linéaire (WANG 2001).....	74
III. Interprétation et comparaison des résultats	77
Conclusion générale	80

LISTE DES FIGURES

FIGURE(I.1) : Description d'un milieu poreux (O.Cousy 1991).....	4
FIGURE(II.1) Montage expérimental de Darcy (Bear, 1972).....	12
FIGURE(II.2) : Conditions générales d'écoulement en milieux poreux.....	12
FIGURE(II.3) : La conductivité hydraulique K en tant que pente de la relation entre le flux q et le gradient hydraulique i	13
FIGURE(III.1) : Mécanisme a echelle microscopique du Transport des particules dans un milieu poreux saturé (s. Stephanie 2010).....	16
FIGURE(III.2):(A) Transport de colloïdes dans les eaux souterraines (MacCarty&Zachara 1989). (B) Double couche d'une particule colloïdale (Dejardins).....	17
FIGURE(III.3) : Comparaison de deux systèmes généraux de transport dans les milieux poreux (a) Systèmes de transport biphasé (contaminant dissous+attachement) (b) Système de transport triphasé (contaminant dissous+attachement + les microparticules colloïdales, montrée ici avec des molécules de contaminant adsorbées à elle, de ce fait les rendant mobiles) (Tushar 2006).....	17
FIGURE(III.4) : Le dépôt des particules fines va obstruer les pores et réduire la perméabilité.....	19
FIGURE (III.5) : Spectre de taille des particules dans les eaux naturelles (Martin 2000)...	20
FIGURE(III.6) : Equilibre des moments sur des particules sphériques attachées à des surfaces réceptrices (d'après Ryan et Elimelech, 1996).(a), Particule déformable.(b), surface déformable.(c), surface rugueuse.....	21
FIGURE(III.6) : Forces qui agissent sur une particule qui chute(Dejardins 1990).....	23
FIGURE(III.7) : Energie d'interaction totale pour le système sphère/plan, en fonction de l'écart h entre les surfaces.....	27
FIGURE(III.8) : Transport vers la surface d'un collecteur (Yao et al 1971 in Ahfir 2006)...	28
FIGURE(III.10) : Vue conceptuelle des processus de dépôt des particules en deux étapes (D'après Kretzschmar et al 1999).....	28
FIG III.11 : Adsorption et désorption. L'eau gravitaire en écoulement subit des échanges avec l'eau de rétention	31
FIGURE (III.12) : Courbe de restitution (évolution de la concentration en fonction du temps a distance fixe).....	31

FIGURE(IV.1) : Phénomènes de dispersion (1) Trajectoires réelles des particules d'eau (2) Cones de dépression (3) Tracages par bouffées (4) Tracages par injection continue (Castany 1982).....	37
FIGURE(IV.2) : Dispersion de Taylor- Iris (Morel 2004).....	38
FIGURE(IV.3) : La différence d'ouverture des pores est responsable des vitesses différenciées selon le canal emprunté par le fluide.....	38
FIGURE(IV.4) : Illustration de la dispersion cinématique.....	39
FIGURE(IV.5) : Evolution de la concentration en fonction de la distance parcourue (Porel 1988).....	42
FIGURE IV.6 : Mesure en laboratoire du coefficient D_L Pour les milieux poreux granulés.....	43
FIGURE IV.7 : Mise en évidence des régimes d'écoulement.....	44
FIGURE(V.1) : Schéma de la colonne expérimentale.....	46
FIGURE (V.2) : Courbe granulométrique des deux sables.....	47
FIGURE(VI.1) : Différence de charge en fonction du débit.....	54
FIGURE (VI.2) : Vitesse de Darcy en fonction du gradient hydraulique.....	55
FIGURE (VI.3) : Concentration en (mg/l) en fonction de la turbidité en (NTU).....	56
FIGURE(VI.4) : Courbes des restitutions d'injection instantanée des argiles dans le sable1.....	58
FIGURE (VI.5) : Courbes des restitutions d'injection instantanée des argiles dans le sable2.....	59
FIGURE (VI.6):Courbes des restitutions d'injection instantanée de la chaux dans le sable1.....	60
FIGURE (VI.7):Courbes des restitutions d'injection instantanée de la chaux dans le sable2.....	61
FIGURE (VI.8) : Concentrations cumulées en fonction du temps.....	64
FIGURE (VI.9) : Représentation graphique de la fonction de répartition de la loi de Gauss. Avec m : moyenne et σ l'écart- type.....	66
FIGURE (VII.1) : Représentation graphique des droites de (WANG 2001) :(A,B,C) Injection des argiles Sable1; (D,E,F) Injection des argiles Sable2.....	73
FIGURE (VII.2) : Représentation graphique des droites de (WANG 2001) :(G,H,I) Injection de la chaux Sable1; (J,K,L) Injection de la chaux Sable2.....	74
FIGURE (VII.3): Comparaison schématique du coefficient de dispersion obtenue par les trois méthodes en fonction du débit d'alimentation.....	75

FIGURE (VII.4): Comparaison schématique du temps de transfert obtenue par les trois méthodes en fonction du débit d'alimentation.....76

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU (III.1) : Quelques diamètres en suspension étudié.....	20
TABLEAU (V.1) : Résultats de l'analyse granulométrique	47
TABLEAU (V.2) : Valeurs des coefficients d'uniformité des deux formations et de leurs diamètres.....	48
TABLEAU (V.3) : Calcul de la perméabilité à partir de la loi de Hazen pour les deux sables.....	49
TABLEAU (V.4) : Résultats des perméabilité donnée par le perméamètre.....	49
TABLEAU (V.5) : Valeurs de la perméabilité calculées a partir de la colonne expérimentale.....	50
TABLEAU (V.6) : Propriétés physiques et hydrauliques des deux milieux poreux.....	50
TABLEAU (V.7) : Résultats d'analyse granulométriques par sédimentométrie.....	53
TABLEAU (VI.1) : Volume injectée par-rapport au volume de pore du milieu.....	57
TABLEAU (VI.2) : Temps caractéristiques des courbes de restitutions d'injection des argiles pour les deux milieux poreux.....	62
TABLEAU (VI.3) : Temps caractéristiques des courbes de restitutions d'injection de la chaux pour les deux milieux poreux.....	62
TABLEAU (VI.4) : Taux de restitution obtenue par la courbe des concentrations cumulées en fonction du temps.....	63
TABLEAU (VI.5) : Détermination du coefficient de dispersion à partir de la méthode dite Ecart-type.....	66
TABLEAU (VII.1) : Description des paramètres hydrodispersives à partir de la méthode des moments.....	72
TABLEAU (VII.2) : Description des paramètres hydro dispersives a partir de la méthode graphique linéaire.....	75

Rapport-Gratuit.com

Introduction générale

La pollution des sols menace le bon fonctionnement des écosystèmes et la santé humaine, en fait certains polluants particulièrement toxique et persistants risquent d'être transférés ou de migrer sur de longues distances, et de contaminer les nappes. En effet au fil du temps notre façon de vivre n'a fait que contribuer à l'augmentation des rejets de produits chimiques au sein de l'environnement et aux déchets humains. Le vaste réservoir en eau douce que constituent les eaux souterraines est ainsi graduellement contaminé par les activités humaines. Le transport des polluants résulte du couplage entre le transport des fluides vecteurs (eau, gaz) et les interactions bio-physico-chimiques entre les polluants et les phases solides du sol (minéraux, matière organique, organismes), l'étude du transport et de la rétention colloïdale constitue une part importante des recherches effectuées dans le domaine de l'hydrogéologie. En effet, de nombreuses particules colloïdales sont présentes dans les milieux naturels, et plus particulièrement dans les eaux souterraines. Les colloïdes peuvent être contaminants (composés organiques, fibres d'amiante, bactéries,...) ou bien vecteur de contaminants. C'est le cas des argiles (présentes de manière naturelle dans les eaux souterraines), leur forte capacité d'adsorption sont fréquemment associées au transport de particules polluantes de divers types.

Les matières en suspension jouent un rôle déterminant dans la contamination des sols et des aquifères, elles peuvent jouer un rôle de véhicule si elles sont transportées facilement dans l'écoulement ou au contraire devenir un frein à la migration des polluants dans le cas où leur présence colmate rapidement les pores dans le cas où la dimension des particules en suspension est importante. Les accidents dus à l'érosion interne des ouvrages hydrauliques, et la chute de perméabilité qui est due au dépôt dans les puits pétrolier, ou dans les puits d'alimentation en eau potable, ont fait des grands objectifs de recherches ces dernières années.

Vu la complexité du milieu, qui est due notamment à la présence d'hétérogénéités dans le milieu géologique qui perturbent les champs de vitesse et de concentration du polluant, rendant ainsi l'analyse très difficile de mettre en œuvre des expérimentations en vraie grandeur pour comprendre et prévoir ce transport. La plupart des expérimentations sont effectuées à l'échelle du laboratoire, l'expérimentation en colonne a pour objectif la modélisation du comportement de transport et la cinétique de dépôt des particules.

Les conditions de transport ou de rétention des matières en suspension dans un milieu poreux, dépendent de l'interaction écoulement-particules-grains. Plusieurs restrictions peuvent s'imposer au transport des particules en suspension : l'obstruction des pores, la sédimentation dans le milieu poreux lorsque les forces de gravités deviennent dominantes.

Le présent mémoire est divisé en deux parties :

La première partie essentiellement bibliographique, contient des définitions et généralités sur les colloïdes et les milieux poreux ainsi que la définition des formules de base utilisées pour connaître les caractéristiques des milieux poreux, et des équations utilisées dans le domaine du transport et de la rétention colloïdale (simples équations de convection /dispersion).

La deuxième partie s'intéresse aux expérimentations réalisées dans le cadre de cette étude,

à savoir dans un premier temps, la préparation de deux types de sol et la détermination de leurs caractéristiques physiques, ainsi que la préparation des suspensions à introduire dans les milieux poreux utilisés. Dans un deuxième temps nous nous pencherons sur l'analyse des résultats expérimentaux par l'observation des courbes de restitution et le calcul des paramètres hydro-dispersifs selon différentes approches. Nous finirons notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

Partie 1

Chapitre I

Eau et milieux souterrain

Une formation hydrogéologique perméable permet l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine et le captage de quantité d'eau appréciable, elle est alimentée par l'infiltration efficace (la quantité d'eau qui parvient à la surface de la nappe). L'aquifère est un système hydrologique, hydrodynamique. Il est donc identifié par une caractéristique de réservoir qui est un domaine d'espace fini, décrit par ces conditions aux limites et ses dimensions ou configurations, la première fonction est l'emménagement souterrain réglant le stockage et la libération de l'eau gravitaire. Le réservoir est identifié par les caractéristiques et la genèse de ses vides, pores et fissures, qui permettent de distinguer le milieu poreux et le milieu fissuré ; ou l'eau souterraine constitue un milieu continu dans le réservoir dont seule une fraction, l'eau gravitaire, est mobile dans l'aquifère ceci est due à la formation hydrogéologique perméable.

La deuxième fonction est la fonction conduite du réservoir elle permet le transport de quantité d'eau et la transmission d'influences. Elle est imposée par la structure de l'aquifère les paramètres géométriques et hydrodynamiques. L'écoulement de l'eau souterraine est déterminé par trois groupes de paramètres hydrodynamiques : Coefficient de perméabilité, gradient et charge hydraulique, débit d'une nappe et vitesse de l'écoulement des eaux souterraines.

I-Milieus poreux :

Le milieu poreux est un milieu bi phasique dont une phase est constituée de la matrice solide et l'autre phase de vides interconnectés ou non, appelés pores (Dormieux 2002). La matrice solide peut soit être rigide, soit être soumise à des faibles déformations. Une caractéristique commune des milieux poreux naturels est la distribution irrégulière en forme et en taille des pores constituant ces milieux.

L'étude de la phase solide s'articule autour de deux aspects fondamentaux La composition et L'organisation

1) La composition de la phase solide se trouve à l'origine des diverses propriétés du milieu poreux soit par ces qualités propres ; soit par les limitations qu'elle impose sur les modes d'organisations possibles de la phase solide. L'étude de la composition de la phase solide conduit à distinguer les particules minérales des particules organiques. La fraction minérale est décrite à l'aide d'une analyse granulométrique que l'on rencontre dans toutes descriptions des milieux poreux. Son objectif consiste à différencier par taille

les éléments minéraux du milieu poreux et à quantifier leur répartition pondérale dans des classes de diamètres prédéfinies. Le résultat d'une analyse granulométrique se présente sous la forme d'une courbe granulométrique, on y trouve en abscisses le diamètre apparent et en ordonnée la proportion pondérale cumulée.

2) L'étude de l'organisation ou de la structure de la phase solide d'un milieu poreux s'avère plus délicate car les critères de la nature géométrique ne peuvent être évalués que par des méthodes non destructives. Pour répondre à ce manque d'informations quantitatives, de nombreux modèles théoriques de la géométrie stochastique (processus de points, de lignes, fibres...) ont été développés. Ils sont basés sur la connaissance d'un nombre restreint de paramètres (dans le sens où la moyenne et l'écart type d'une distribution gaussienne résument à eux seuls toute la distribution).(CASTANY 1982).

I-1 Description d'un milieu poreux saturé :

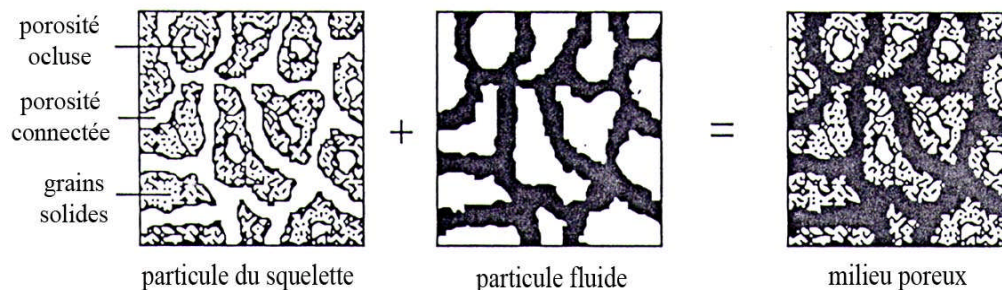
I-1-1 Porosité connectée et porosité occluse :

A) Porosité connectée :

C'est l'espace par l'intermédiaire duquel s'effectuent les échanges de masse fluide. Deux points du fluide qui le sature sont toujours reliés par un trajet intérieur à cet espace et dans ce sens, la phase fluide saturante est continue.

B) Porosité occluse :

Cet espace poreux n'est le lieu d'aucune filtration, il n'existe pas dans les sols sableux et argileux, il existe indiscutablement dans les roches. Cette porosité est le rapport du volume non solide au volume total.



FIGURE(I.1) : Description d'un milieu poreux (O.Cousy 1991)

I.1.2 L'hypothèse de continuité :

Une description continue d'un milieu macroscopiquement hétérogène suppose que l'on place à une échelle macroscopique pour l'observation des phénomènes et la quantification des grandeurs physiques. Par exemple la porosité en un point géométrique donné, est supposée une description continue du milieu qui signifie que les propriétés physiques varient d'une façon continue d'un point à un autre.

I. 2-Morphologie et intercommunication des vides :

Les fonctions essentielles du milieu poreux, réservoir et conduite sont essentielles pour assurer la continuité du milieu poreux.

L'étude morphologique des vides porte sur leur nature, leur forme, et leurs dimensions. Deux grands types de vides (pores et fissures) qui caractérisent le milieu poreux.

I.2.1Morphologie des pores et milieu poreux :

Les pores sont des vides plus ou moins sphériques, de petites dimensions, ménagés entre les particules solides et constituant le réservoir. Les dimensions des vides sont étroitement liées a celles des grains, dont la mesure est plus directement accessible. Les diamètres des grains des roches meubles perméables s'étalent de 0,06 à 16mm.

I.2.2Interconnection des pores et milieu continu :

Les pores communiquent entre eux, dans le sens de l'écoulement de l'eau souterraine permettant le déplacement des particules de l'eau gravitaire. Celles-ci suivent les trajectoires plus ou moins compliquées, identifiant les lignes de courant. Cet aménagement caractérise la continuité du milieu poreux qui est une des bases pour la validité des lois de l'hydrodynamique souterraine.

II L'alimentation du réservoir :

L'alimentation spécifique ou module spécifique d'alimentation, est le quotient des quantités d'eau globales apportées en moyenne à une nappe, pendant une durée définie par l'aire de l'aquifère considéré, elle s'exprime en l/s.Km².

L'eau des précipitations efficaces est répartie, à la surface du sol en deux fonctions fixes, conventionnelles, inégales :

II.1 Le ruissellement(R) :

Le terme ruissellement désigne le phénomène du mouvement d'un liquide sous l'influence de la gravité, il représente le mouvement de l'eau sur une région ou une superficie donnée. Le ruissellement superficiel commence en même temps que la capacité de rétention du sol ; et il est exprimé en (m³) ou en (mm).

II.2 L'infiltration (I) :

On appelle infiltration la partie de l'eau des précipitations qui est absorbée par le sol et dirigée vers les couches inférieures. Le taux maximal d'eau qu'un sol peut absorber est la capacité d'infiltration.

Elle est mesurée par des méthodes directes (Infiltromètre) ou indirectes (Analyse hydrologique) et exprimée en (mm/an). Le taux d'infiltration est le rapport entre une hauteur d'infiltration et une hauteur de précipitation efficace. (Musy 2004).

III. Caractéristiques physiques du milieu perméable :

Le milieu perméable présente trois couples de caractéristique physiques :

III.1.Continuité et discontinuité :

Le milieu perméable, comportant des vides interconnectés dans le sens de l'écoulement, est dit continu. (Les roches meubles, et les roches compactes découpées par un réseau de micro -fissures). Les milieux discontinus sont des roches compactes à macrofissures et karstiques.

III.2.Isotropie et anisotropie :

Un milieu est dit isotrope lorsque ses caractéristiques physiques (granulométrie en particulier) sont constantes dans les trois directions de l'espace, et anisotrope lorsque la granulométrie est hétérogène.

III.3.Homogénéité et hétérogénéités :

Un milieu est homogène lorsqu'il présente, en tout points dans le sens de l'écoulement, des caractéristiques physiques constantes. Par contre un milieu hétérogène est toujours anisotrope.

Chapitre II

Capacité-conductivité et transport en
suspension dans un milieu poreux

L'emmagasinement de l'eau souterraine gravitaire dans les vides du réservoir est conditionné par le coefficient d'emmagasinement, sa circulation par la perméabilité. La fonction conduite du réservoir assure le transport de quantités d'eau ou de flux souterrain et la transmission d'influences, différence de charge ou de pression, sous l'action du gradient hydraulique.

I Etude de la fonction capacitive du réservoir :

I.1 La masse volumique sèche :

Elle est exprimée en (kg/m^3) c'est le rapport de la masse des grains solides M_s (Après étuvage) sur le volume total de l'échantillon V_t

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t} \quad (\text{II.1})$$

I.2 La porosité :

L'étude des vides, fondamentale pour l'identification de la structure du milieu poreux, repose sur deux ensembles de techniques en laboratoire (granulométrie, l'analyse structurale, les mesures de porosité), et sur le terrain (la télédétection, la géomorphologie appliquée, l'analyse structurale, prospection géophysique et les sondages), la porosité est aussi reliée à des facteurs physiques du réservoir qui sont :

- Les diamètres représentatifs des grains
- L'arrangement des grains
- La surface spécifique des grains

La porosité est également reliée à la masse volumique sèche par la relation suivante :

$$\omega = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (\text{II.2})$$

Avec ρ_s qui représente la masse volumique du solide qui est établie par la relation suivante :

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (\text{II.3})$$

Avec V_s le volume de solide.

La porosité permet aussi de déterminer le volume poreux V_p .

I.3 Le volume poreux (V_p) :

Le volume poreux est défini par le produit de la porosité et le volume total de l'échantillon par la relation :

$$V_p = \omega \cdot V_t \quad (\text{II.4})$$

I.4 Teneur en eau volumique (\square) :

La teneur en eau volumique, est la quantité d'eau contenue dans le milieu poreux saturé ou non, rapporté au volume total, exprimée en pourcentage.

$$\square = \frac{V'}{V_t} \quad (\text{II.5})$$

V' : Volume d'eau

\square : Teneur en eau volumique

I.5 Teneur en eau massique (W) :

La teneur en eau massique est exprimée par le rapport de la masse liquide à la masse du solide par la relation :

$$W = \frac{M_l}{M_s} \quad (\text{II.6})$$

M_e : La masse du liquide dans le milieu poreux.

Ces deux grandeurs sont reliées par la relation suivante :

$$\square = W \frac{\rho_d}{\rho_e} \quad (\text{II.7})$$

ρ_e : La masse volumique de l'eau

Cependant toute l'eau ne participe pas à l'écoulement. On distingue l'eau libre qui se déplace par gravité sous l'effet de gradient de pression, et l'eau liée par capillarité et/ou adsorption. L'importance de cette dernière fraction, dépend de la forme de l'arrangement réactif, et de l'arrangement relatif de la distribution de la taille des particules du sol (masse volumique sèche, surface spécifique, connectivité des pores...).

On définit alors θ_m et θ_{im} , qui sont respectivement la teneur en eau volumique mobile et en eau immobile :

$$\theta = \theta_m + \theta_{im} \quad (\text{II.8})$$

La fraction d'eau mobile θ_m / θ est un paramètre important pour l'étude de transport de soluté. (GUJISAITE 2008).

I.6 Coefficient d'emménagement (S) :

Le coefficient d'emménagement d'un aquifère sans dimension représente le volume d'eau V_w que peut libérer l'aquifère par l'unité de surface de ce dernier A, suite à un abaissement unitaire de la charge hydraulique Δh . (Lefebvre 2006).

$$S = \frac{V_w}{A \Delta h} \quad (\text{II.9})$$

V_w : Le volume d'eau que peut libérer l'aquifère (m^3).

Δh : L'abaissement unitaire de la charge hydraulique (m).

A : L'unité de surface de l'aquifère (m^2).

II Etude de la fonction conductrice du réservoir :

Les caractéristiques essentielles d'une formation d'un réservoir est son degré de perméabilité, qui est l'aptitude d'un réservoir à conduire l'écoulement de l'eau dans les conditions hydrodynamiques imposées, ainsi que la pente de la nappe, la transmissivité et enfin la diffusivité.

Il existe un autre paramètre qui est très important et initial pour l'écoulement dans un réservoir, qui est la charge ou potentiel hydraulique.

II.1 Charge hydraulique et piézométrie :

Hubbert (1940) définit le potentiel comme "une quantité physique, mesurable en tout point d'un système d'écoulement, dont les propriétés sont telles que l'écoulement se produit toujours des régions où la valeur de la quantité est plus élevée vers celles où elle est plus faible, indépendamment de la direction dans l'espace".

En hydrogéologie, la pression du fluide est mesurée simplement par la hauteur de la remontée de l'eau dans un piézomètre. C'est une pression relative, c'est-à-dire mesurée par rapport à la pression atmosphérique. Pour obtenir la charge hydraulique h , on ajoute simplement à h_p la charge d'élévation z .

$$H = z + \frac{P}{\rho \cdot g} = z + h_p \quad (\text{II.10})$$

Lors de l'écoulement en milieux poreux, la vitesse du fluide est faible de sorte que l'énergie cinétique du fluide peut être négligée relativement aux autres formes d'énergie du fluide. Ainsi, le potentiel responsable de l'écoulement en milieux poreux aura une composante d'élévation (énergie potentielle liée à la force de gravité) et une composante de pression :

Potentiel = Composante d'élévation + Composante de pression

II.2 Gradient hydraulique (i) :

Le gradient hydraulique est un paramètre indispensable pour les écoulements souterrains, c'est la différence de niveau piézométrique entre deux points de la surface piézométrique par unité de longueur mesuré le long de la ligne de courant, c'est un nombre sans unité. Il est exprimé par la formule suivante :

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (\text{II.11})$$

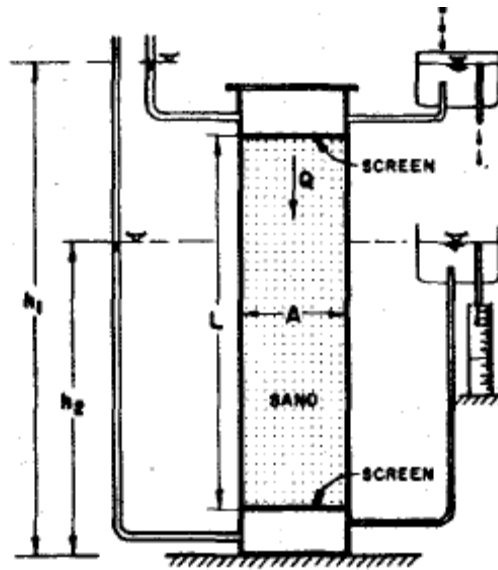
ΔH : Différence de niveau piézométrique (m)

L : Longueur entre les deux piézomètres (m)

II.2.1 La loi de Darcy et la conductivité hydraulique :

La figure (II.1) montre le type de montage utilisé par Henri Darcy en 1856 pour évaluer la capacité d'écoulement à travers des filtres de sable. Le débit Q (volume/temps) à la sortie du

montage est observé pour différentes conditions. Il est possible de modifier la différence de charge h_1-h_2 (longueur) en changeant l'élévation relative des réservoirs d'eau à l'entrée et à la sortie de la colonne de sable. La valeur de la charge est déterminée par l'élévation du niveau d'eau relativement à une référence d'élévation arbitraire. Différentes colonnes avec des sections d'écoulement A (surface) ou des longueurs L (longueur) sont aussi utilisées.



Figure(II.1) Montage expérimental de Darcy (Bear, 1972)

La figure (II.2) montre les relations observées pour des essais à des conditions différentes:

- a) le débit est proportionnel à la section d'écoulement A : $Q \propto A$
- b) le débit est proportionnel à la différence de charge hydraulique (h_1-h_2) : $Q \propto (h_1-h_2)$
- c) le débit est inversement proportionnel à la longueur de la colonne L : $Q \propto 1/L$

De ces relations, on obtient l'équation suivante avec un coefficient de proportionnalité

K :

$$Q = K \frac{A(h_1 - h_2)}{L} \quad (\text{II.12})$$

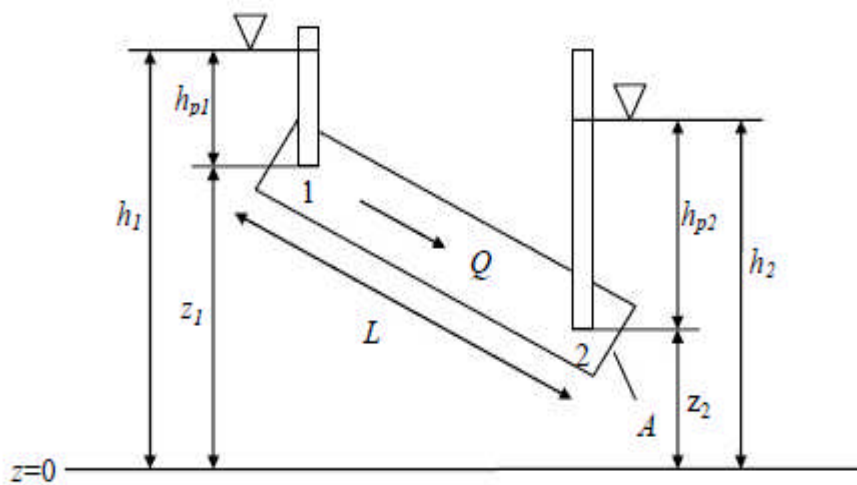


FIGURE II.2 : Conditions générales d'écoulement en milieux poreux

II.2.2 La perméabilité :

La perméabilité est une notion dynamique, c'est la propriété d'un terrain aquifère à laisser passer à travers lui l'eau mise en mouvement par la pression ou la dépression. On peut aussi l'appeler la conductivité à l'eau, elle est mesurée par deux paramètres : le coefficient de perméabilité et la perméabilité intrinsèque.

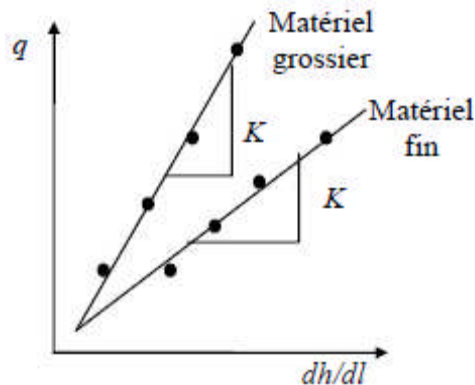


FIGURE (II.3) : La conductivité hydraulique K en tant que pente de la relation entre le flux q et le gradient hydraulique i

II.2.3 Coefficient de perméabilité de Darcy :

En effectuant l'expérience de Darcy avec des matériaux granulaires de granulométrie différente, on constate que les matériaux grossiers sont marqués par une pente plus grande que les matériaux plus fins, donc leur "conductivité hydraulique" est supérieure.

L'expression utilisée pour la loi de Darcy peut être généralisée. D'abord, on peut l'exprimer de façon à ce qu'elle soit indépendante de la section d'écoulement en remplaçant le débit Q (m^3/s) et la section d'écoulement A (m^2) par le flux q (m/s), le débit par unité de surface donne :

$$q(m/s) = \frac{Q}{A} \quad (II.13)$$

$$i = \frac{(h_2 - h_1)}{L} = \frac{dh}{dl} = \text{grad } h \quad (II.14)$$

En substituant les relations dans la loi de Darcy on obtient :

$$q = -K.i \quad (II.15)$$

d'où :
$$K = \frac{g}{i} \quad (\text{II.16})$$

Il y'a donc une relation entre les dimensions des pores et le diamètre moyen des grains d (m). On peut donc regrouper les paramètres affectant la conductivité hydraulique reliés aux propriétés du matériel poreux en deux termes, un facteur de forme N (sans dimension) regroupant porosité et tortuosité et la dimension moyenne des grains d (m). Ainsi, on obtient une expression définissant la conductivité hydraulique à partir des propriétés du milieu poreux et du fluide qui s'y écoule:

$$K=N.(d_{10})^2 \cdot \frac{\gamma}{\mu} \quad (\text{II.17})$$

K : Le coefficient de perméabilité(m/s)

N : Facteur de forme (dimension et arrangement des grains)

D_{10} : Diamètre efficace des grains en cm

γ : Le poids volumique

μ : La viscosité dynamique.

II.2.4 La perméabilité intrinsèque (K) :

L'eau circulant dans les vides du réservoir rencontre une résistance, fonction de leurs dimensions, exprimée par la granulométrie et leur degré d'interconnexion ou continuité. D'où les trois facteurs principales de la perméabilité intrinsèque :

- Le diamètre efficace d_{10}
- La surface spécifique
- La porosité efficace

Le diamètre efficace des grains est le facteur principal de la perméabilité intrinsèque qui décroît comme son carré $K=N.(d_{10})^2$. Avec des valeurs de d_{10} inférieur à 0,001mm, le réservoir devient imperméable. D'où :

$$K(\text{cm}^2)=100.(d_{10})^2 \quad (\text{II.18})$$

Cette application est appliquée dans certaines limites $U \leq 5$ et $0,01 \leq d_{10} \leq 0,3\text{mm}$. La perméabilité intrinsèque varie comme l'inverse de la surface spécifique.

II.2.5 La transmissivité (T) :

La transmissivité est fonction du coefficient de perméabilité du terrain K, et de son épaisseur b c'est un paramètre récent. Il régit le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur L, d'un aquifère sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique, i. Il évalue la fonction conduite du réservoir.

$$T(m^2/s)=k.b \quad (II.19)$$

b : Epaisseur de la tranche saturé(m)

K : Le coefficient de perméabilité (m/s)

II.2.6 La diffusivité(T/S):

La diffusivité, régit la propagation d'influences dans l'aquifère. Elle est égale au quotient de la transmissivité,T, par le coefficient d'emmagasinement. Elle s'exprime en (m²/s).

$$\text{Diffusivité (m}^2/\text{s)} = \frac{T(m^2/s)}{s} \quad (II.20)$$

s : Coefficient d'emmagasinement

Chapitre III

Mécanismes du transport solide en milieu poreux

Le transport de masse en général et des particules solides en particulier dans les milieux poreux intéresse beaucoup de champs d'application. Ces derniers peuvent se trouver dans l'industrie pour ce qui concerne les diverses techniques de séparation et de filtration (chromatographie, ultrafiltration, traitement des eaux,...) ou dans le génie pétrolier et gazier (Benamar 2006). Le transport de particule concerne aussi les domaines de la science de la terre où les particules solides jouent un rôle, notamment l'hydrogéologie et le génie environnemental (propagation des contaminants tels que les métaux lourds, éléments radioactifs,...), le transport se résume dans la figure (III.1)

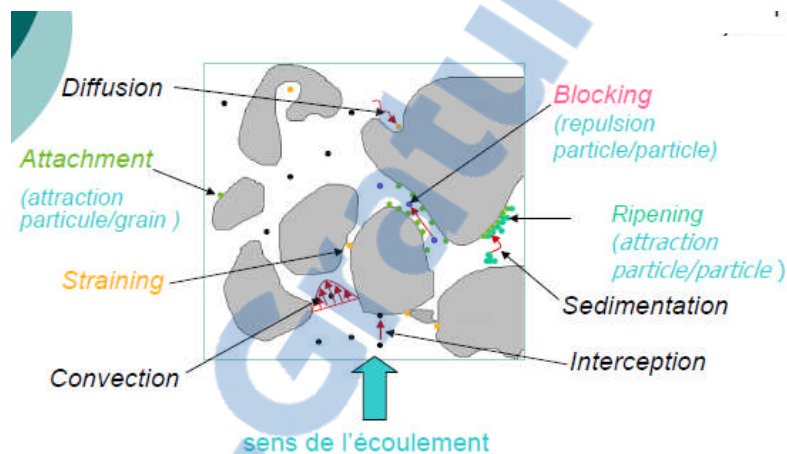
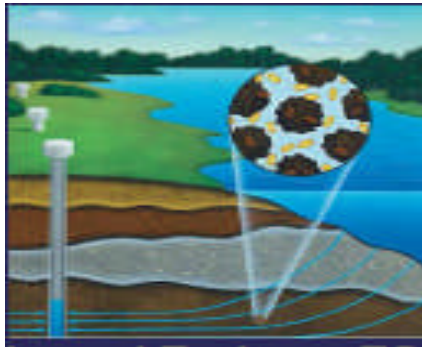


FIG III.1 Mécanisme à échelle microscopique du Transport des particules dans un milieu poreux saturé (s. Stephanie 2010)

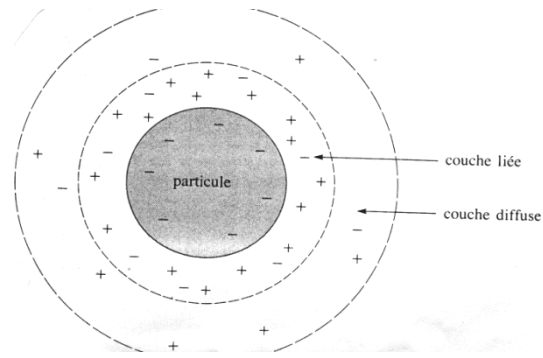
I. Impact du transport solide :

I.1 Le transport facilite les contaminants :

Les effets des colloïdes et leur signification dans le transport de contaminant d'eaux souterraines ont été intensivement étudiés. Les Colloïdes sont définis en tant que particules très petites et suspendues s'étendant dans la taille de 1.0 jusqu'à 10.0 nanomètre, peuvent agir en tant que porteurs de contaminant. En raison de leur petite taille, les colloïdes ont une grande superficie spécifique et un grand nombre de surfaces réactives. Par conséquent, ils peuvent facilement adsorber des contaminants, tels que des métaux lourds, des composés organiques, et des radionucléides, et augmenter potentiellement leur mobilité. (McCarthy et Zachara 1989) ont signalé que les colloïdes pourraient adsorber un contaminant en même temps que la matrice solide et puis confirmer le contaminant dans la phase mobile.



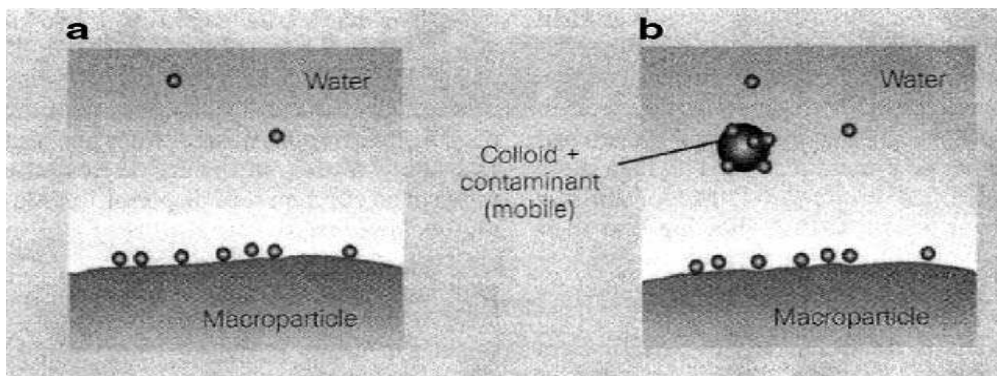
A



B

FIGURE (III.2) : (A) Transport de colloïdes dans les eaux souterraines (MacCarty & Zachara 1989). (B) Double couche d'une particule colloïdale (Dejjardins)

La contamination des eaux souterraines par les bactéries et les virus n'est pas négligeable. Depuis le début des années 1990, de nombreuses expérimentations ont porté sur le transport et l'évolution des microorganismes dans un milieu poreux. En plus de la convection et la dispersion, le transport microbien est affecté par l'influence majeure des processus d'adsorption et de désorption largement étudiés (Ahfir 2007).



FIGURE(III.3) : Comparaison de deux systèmes généraux de transport dans les milieux poreux (a) Systèmes de transport biphasé (contaminant dissous+attachement) (b) Système de transport triphasé (contaminant dissous+attachement + les microparticules colloïdales, montrée ici avec des molécules de contaminant adsorbées à elle, de ce fait les rendant mobiles) (Tushar 2006).

I.2 L'érosion interne :

L'érosion interne est un mécanisme majeur des instabilités constatées sur les ouvrages en terre de retenue d'eau. Ce mécanisme comporte deux processus principaux : l'arrachement des particules et leur déplacement.

Son développement progressif dans le temps et dans l'espace, sa non-homogénéité due à l'hétérogénéité des sols naturels rend ce phénomène complexe et difficile à mettre en évidence et à interpréter.

Le processus d'arrachement des particules se manifeste au niveau de la structure sous la forme d'érosion régressive. Le phénomène de transport agit lui par développement du phénomène de renard ou de suffusion.

Le renard représente la formation d'un cheminement préférentiel d'écoulement, le long duquel sont groupés un certain nombre de points faibles, où des courants de filtration commencent à se concentrer. Des particules sont expulsées du milieu, et le volume solide total du milieu décroît. Ce phénomène évolue très rapidement jusqu' à la formation d'un conduit continu. L'action de suffusion commence par le déplacement de particules fines à l'intérieur de la matrice granulaire. Dans cette situation, certaines particules en mouvement peuvent être piégées après une certaine distance dans les vides formés par un squelette de particules plus grossières ; ce qui conduit à une diminution de la porosité et implicitement de la perméabilité du milieu dans la zone de blocage et à une augmentation de ces mêmes paramètres dans la zone d'entraînement. Des études ont montré que la suffusion peut être un mécanisme d'effondrement des sols à condition qu'ils possèdent une structure apte à cet effet (A.Alem 2003; Bendahmen et al. 2004).

I.3 Le colmatage :

Un dépôt de particules est la conséquence du transport de particules vers une surface collectrice, et de leur capture sous l'effet d'interactions physico-chimiques. Ce phénomène, rencontré dans de nombreuses situations physiques, peut être recherché lorsqu'il s'agit d'éliminer par filtration des particules en suspension dans un fluide, ou au contraire néfaste lorsqu'il s'oppose à la bonne circulation d'un fluide en réduisant la perméabilité du milieu « colmatage ».

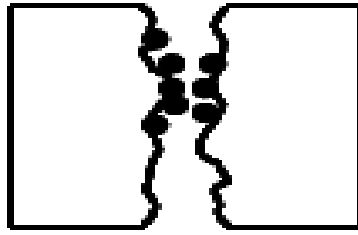


FIG III.4 : Le dépôt des particules fines va obstruer les pores et réduire la perméabilité.

II. Les particules en suspension :

La dispersion en taille des particules dans les liquides est largement rencontrée dans l'industrie. Les particules peuvent avoir des tailles allant d'une fraction de millimètre jusqu'à quelque manomètre. La gamme de taille de particules typique est présentée dans la figure(III.5) avec quelques indications associées. Traditionnellement, une distinction est faite entre les particules colloïdales et les particules en suspension, avec une limite prise égale à $1\mu\text{m}$ (AHFIR2006). Cette limite plutôt arbitraire, peut être largement justifiée (Elimilech et al 1995) par les éléments suivants :

a) Le plus souvent les particules sont observées à l'aide d'un microscope optique, et il est très difficile de distinguer les particules plus petites (inférieur à $0.5\mu\text{m}$) que la longueur d'onde de lumière ordinaire. Ainsi les particules colloïdales, comme définies ci-dessus, sont largement invisibles sous microscope optique, alors que les particules en suspension sont facilement observables.

b) La vitesse de sédimentation dépend du diamètre au carré de la particule, et les particules inférieur à $1\mu\text{m}$ tendent à se décanter très lentement. Ainsi les particules colloïdales restent longtemps à l'état dispersé, alors que les particules en suspension sont très rapidement déposés sous l'effet de la gravité.

c) La surface spécifique des particules est inversement proportionnelle à la taille, plus la taille des particules est petite plus le phénomène d'adsorption est significatif.

d) Il existe certaines interactions colloïdales, connues aussi sous le nom de force de surface, sont proportionnelles à la taille de la particule. D'autre part il y'a les forces externes qui surviennent sous les effets de :

La gravitation : Se sont des forces qui sont proportionnelles à la masse de la particule et donc à sa dimension au cube.

L'hydrodynamique : Qui est une force résultante de l'écoulement, dépendante de la dimension de la particule au carré. (Ahfir2006).

La limite de 1 μm sépare les particules colloïdales ($<1 \mu\text{m}$) des particules en suspension ($>1 \mu\text{m}$) (Heshem et al 2005). Les particules colloïdales possèdent une surface spécifique importante et inversement proportionnelle à leur diamètre, ce qui leur procure un haut potentiel de sorption de (Mc Dowell-Boyer et al., 1986). La figure (III.5) présente la distribution des colloïdes dans les milieux naturels en fonction de leurs tailles.

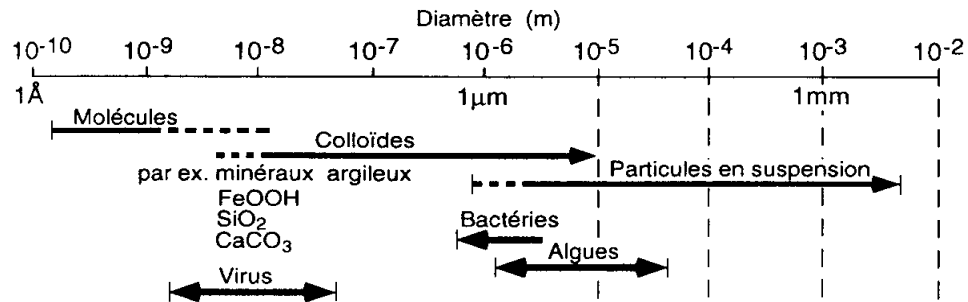


Figure III.5 : Spectre de taille des particules dans les eaux naturelles (Martin 2000)

Dans le tableau (III.1) sont donnés les diamètres de quelques particules en suspension étudiées dans la littérature, ces travaux s'intéressent aux mécanismes de transport (wang et al.2000, Benamar et al 2005), au temps de dépôt des colloïdes(R. Dejardins 1990).

TABLEAU III.1 : Quelques diamètres en suspension étudié

Auteurs	Particules	Diamètre en μm
Wang et al (2000)	Limon	Entre 2 et 50
Benamar et al (2005)	Rislan Particule en suspension Limon	Entre 2 et 50 (μm) Entre 2 et 40
Ahfir et al (2006)	Bactéries Limon	Limon 1 et 30
R.Dejardins (1990)	Colloïdales	0.1
	Colloïdales	0.01
	Colloïdales	0.001

L'or d'une étude du transport en suspension dans un milieu poreux saturé, Les différents facteurs pris en considération pour le transport et dépôt sont :

- 1) La vitesse d'écoulement (En restant dans le domaine de la validité de la loi de Darcy).
- 2) La taille et densité des particules en suspension.
- 3) La structure du milieu poreux
- 4) Longueur du milieu poreux (Dimension de la colonne du laboratoire).

III. Mobilisation des particules en suspensions:

L'écoulement des fluides en milieu poreux engendre la mobilisation des particules des parois des pores. La vitesse du flux d'eau dans le milieu fragilise la liaison entre les particules et la surface du pore. L'accélération de la vitesse d'écoulement favorise la force hydrodynamique qui va provoquer l'arrachement des particules.

Des études théoriques ont été réalisées sur la force hydrodynamique induite par un fluide en écoulement laminaire sur la mobilisation d'une particule sphérique attachée à un plan horizontal (Goldman et al. 1967) comme le montre la figure (III.6) . Le détachement d'une particule est souvent initié par un roulement plutôt qu'un glissement ou un soulèvement.

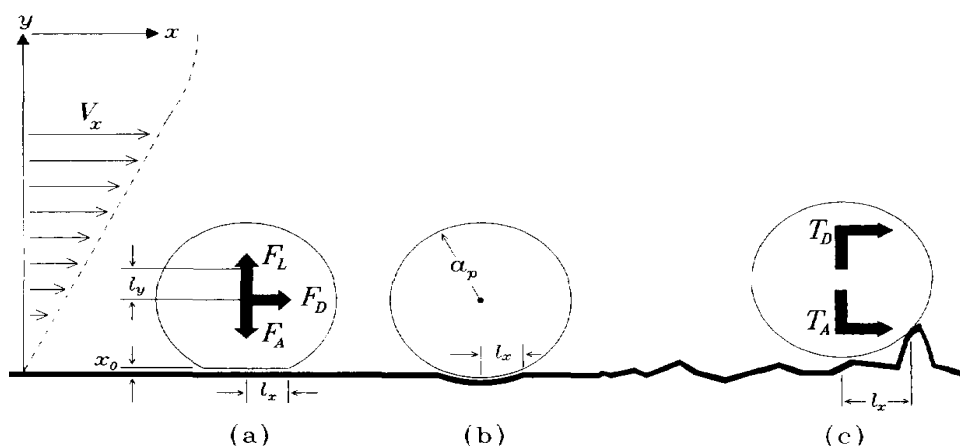


FIG III.6 : Equilibre des moments sur des particules sphériques attachées à des surfaces réceptrices (d'après Ryan et Elimelech, 1996).(a), Particule déformable.(b), surface déformable.(c), surface rugueuse.

Les forces qui interviennent à l'équilibre des moments sur la particule attachée à la surface du pore sont :

La force d'adhérence(F_A) : Elle est normale à la surface, elle tend à retenir la particule à la surface du pore.

La force de soulèvement(F_L) : Normale à la surface elle tend à soulever la particule, généralement elle est négligeable devant la force d'adhérence, elle est donnée d'après saffman 1965 (Ryan et al 1996) par :

$$F_L = \frac{81.2 a_p^2 \mu \omega^{0.5} U_x}{\eta^{0.5}} \quad (\text{III.1})$$

ω : gradient de vitesse au mur plat

a_p : Le rayon de la particule(m)

μ : La viscosité dynamique (pa.s)

η : La viscosité cinématique

U_x : La vitesse du fluide au centre de la particule attachée (à la distance a_p par rapport au mur),

elle est donnée par l'expression :

$$U_x = 6 \frac{Q_f a_p}{A l} \left(1 - \frac{a_p}{l} \right) \quad (\text{III.2})$$

Q_f : Le débit d'écoulement (m^3/s) ;

A : La section d'écoulement (m^2) ;

l : Eppaisseur de la section d'écoulement (m) ;

La force de trainée seras définit dans ce qui suit avec les forces hydrodynamiques.

IV Les forces en présence :

IV.1 Les forces hydrodynamiques :

IV.1.1 Force de décantation (gravitationnelle) :

Lorsqu' une particule chute, sa vitesse augmente jusqu'à ce que les forces de décantation qui sont due a la gravité (poids) équilibrent les forces de frottement. Cette situation, pour laquelle dV_p/dt , correspond au point d'équilibre des forces autour de la particule.(Dejardins 1990).Considérons les forces agissant sur une particule qui chute (figIII.6) :

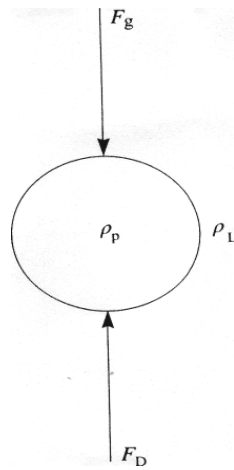


FIGURE III.6 : Forces qui agissent sur une particule qui chute(Dejardins 1990)

D'après cette figure, on peut écrire que :

$$F_g = (\rho_p - \rho_L) gb \quad (\text{III.4})$$

F_g : Force de décantation due a la pesanteur(N) ;

ρ_p : Masse volumique de la particule (Kg/m^3)

ρ_L : Masse volumique de l'eau (Kg/m^3)

b : Volume de la particule (m^3)

t : temps (s)

g : Accélération due a la pesanteur (m/s^2) ;

Pour les particules sphériques la surface est:

$$A_p = \frac{\pi d^2}{4} \quad (\text{III.3})$$

Et le volume :

$$b = \frac{\pi d^3}{6} \quad (\text{III.4})$$

Ou d est le diamètre de la particule

Le nombre de Reynolds est défini par l'expression suivante :

$$N_R = \frac{\rho_L V_p d}{\eta} \quad (\text{III.5})$$

η : La viscosité dynamique de l'eau (Pa.s) ;

Et par ailleurs :

$$C_D = \frac{24}{N_R} = \frac{24 \eta}{\rho_L V_p d} \quad (\text{III.6})$$

En combinant les équations, on obtient l'expression de la loi de Stokes, soit :

$$V_p = \frac{g(\rho_p - \rho_L) d^2}{18\eta} \quad (\text{III.7})$$

IV.1.2 Force de trainée:

Force de trainée (frottement) F_D , La force de Drag Tangente a la surface et dirigée dans le sens d'écoulement. Qui dans le cas d'un fluide newtonien, et un écoulement laminaire. Elle a été calculée par Goldman et al (1967) ; et s'écrit :

$$F_D = (1,7009)(6\pi\mu a_p U_x) \quad (\text{III.8})$$

a_p : Le rayon de la particule.

μ : La viscosité dynamique du fluide.

IV.1.3 Force résultante :

Elle est définie par la relation suivante :

$$F_r = F_g - F_D = \rho_p b \frac{dV_p}{dt} \quad (\text{III.9})$$

b : Volume de la particule (m³)

t : temps (s)

IV.1.4 Force d'inertie :

Au lieu de suivre le mouvement curviligne du fluide, les particules massives peuvent entrer directement en collision (quand il y'a changement de la trajectoire) avec les grains pour être déposées. Cette force (Force centrifuge) est approchée par :

$$F_i = \pi \frac{d_p^3}{3} (\rho_p - \rho_L) \frac{u^2}{d_g} \quad (\text{III.10})$$

Avec :

d_g : Le diamètre des grains

u : La vitesse interstitielle moyenne.

IV.2. Force physicochimiques :

Des perturbations chimiques du milieu (modification de la force ionique, pH de la solution du sol, l'adsorption d'ion et de macromolécules sur les surfaces solides), influent sur le détachement des particules solides (Ahfir 2006). Les types de forces impliquées dans les relations entre la surface des particules et la matrice poreuse sont :

IV.2.1 Les forces de van der Waals :

C'est la force d'attraction entre particule et surface poreuse. Ce sont des forces d'interaction à courtes distances, de l'ordre de quelques centaines d'angströms. Pour une interaction entre une sphère et un plan (Spielman et Cukor, 1973), la force de Van der Waals peut être simplifiée comme suit :

$$F_{vdw} = \frac{\pi H a_p}{12 h^2} \quad (\text{III.11})$$

H: La constant de Hamaker des surfaces qui est de l'ordre de 10^{-19} à 10^{-20} pour toute phase condensée.

h : La distance particule-surface solide.

a_p : Le rayon de la particule.

IV.2.2 Les forces de la double couche (forces électrostatiques) :

Lorsque les particules en suspension circulent à travers le milieu poreux, à faible distance ces particules interagissent sous l'effet de leurs double couche. Ces forces dépendent fortement de la force ionique de la solution du milieu, s'il y'a une augmentation de la concentration en ions de signe opposé à celui de la surface de la particule dans l'espace séparant particule-particule, ou particule surface du grain ; ces interaction peuvent être répulsives (Elimilech et al 1995). Pour un milieu poreux avec des grains de dimension nettement supérieur à celles des particules transportées, l'expression de la force électrostatique de la double couche est donnée par Spielman & Cukor (1973) :

$$F_{dl} = \frac{\epsilon a_p \kappa e^{-\kappa h} \zeta_p \zeta_m}{2(1 + e^{-\kappa h})} \quad (\text{III.12})$$

ϵ : La constante diélectrique

ζ_p et ζ_m : Les potentiels de Zeta de la particule et du milieu poreux

κ^{-1} : L'épaisseur caractéristique de la charge de la couche diffuse (pour l'eau à 20°C , κ^{-1} vaut $3 \cdot 10^{-10} \cdot I^{-1/2}$ m, ou I est la force ionique d'un sel monovalent en moles par litre.

IV.2.3 Répulsion de Born :

La répulsion de Born résulte de l'interaction à très faible distance des nuages électroniques des surfaces. Le potentiel de répulsion est donné par Ruckenstein et Prieve (1976) (Hamami 2007):

$$V_b = \frac{H\sigma_b^6}{7560} \left(\frac{8a_p + h}{(2a_p + h)^7} + \frac{6a_p^{-7}}{h^7} \right) \quad (\text{III.13})$$

σ_b : Le diamètre de collision.

IV.2.4 La théorie D.L.V.O :

La théorie D.L.V.O. doit son nom aux auteurs qui l'ont mise en oeuvre : Derjaguin et Landan en 1941 puis Verwey et Overbeek en 1948. La théorie D.L.V.O permet de quantifier l'influence sur les interactions entre surfaces de différents paramètres tels que la salinité, le potentiel électrocinétique des surfaces, les propriétés et la nature des matériaux en présence. La compétition entre les différents effets est prise en compte à l'aide du potentiel d'interaction totale V_T égal à la somme de tous les potentiels d'interaction. On inclut en général dans ce potentiel, les attractions de Van Der Waals et les répulsions de double couche. On ajoute parfois à ces deux effets le potentiel de répulsion de Born. La figure (III.7) montre l'évolution de l'énergie globale en fonction de la distance d'une sphère à un plan. Lorsque la distance est faible, les forces d'attraction de Van Der Waals sont prédominantes. Pour des distances de l'ordre de l'épaisseur de Debye $1/\kappa d$, qui est souvent appelé l'épaisseur de la double couche ; il est défini par la relation suivante :

$$\kappa d = 3,28 \sqrt{I} \quad (\text{III.14})$$

Où I est la force ionique de la solution.

L'effet répulsif de la force de double couche est du même ordre de grandeur que l'effet attractif de la force de Van Der Waals. Il est possible qu'il soit supérieur sous certaines conditions. La sphère, en se rapprochant de la paroi, doit vaincre cette barrière de potentiel avant d'arriver au contact du plan.

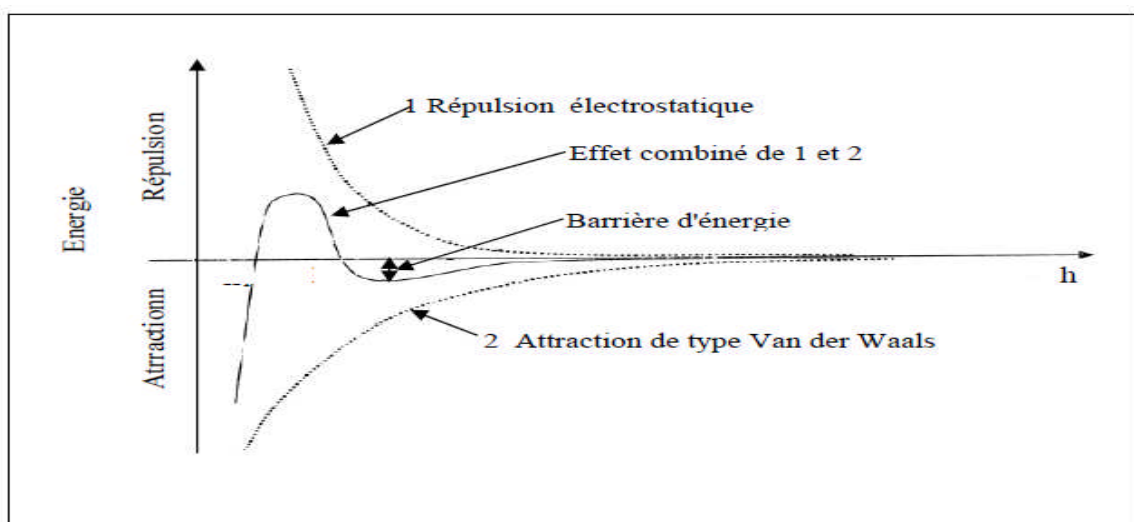


Figure (III.7) : Energie d'interaction totale pour le système sphère/plan, en fonction de l'écart h entre les surfaces (Hamami 2007).

V Capture et dépôt des particules :

V.1 Capture des particules :

Après la mobilisation des particules qui est due aux forces indiquées précédemment, elles seront toujours transportées par l'écoulement, et se déposeront encore dans le milieu poreux. Ces mécanismes dépendent de plusieurs facteurs (la nature des particules et leurs formes, propriétés du fluide, la porosité du milieu (taille et interconnexion des vides)) ; la figure généralise les mécanismes qui interviennent dans le dépôt des particules :

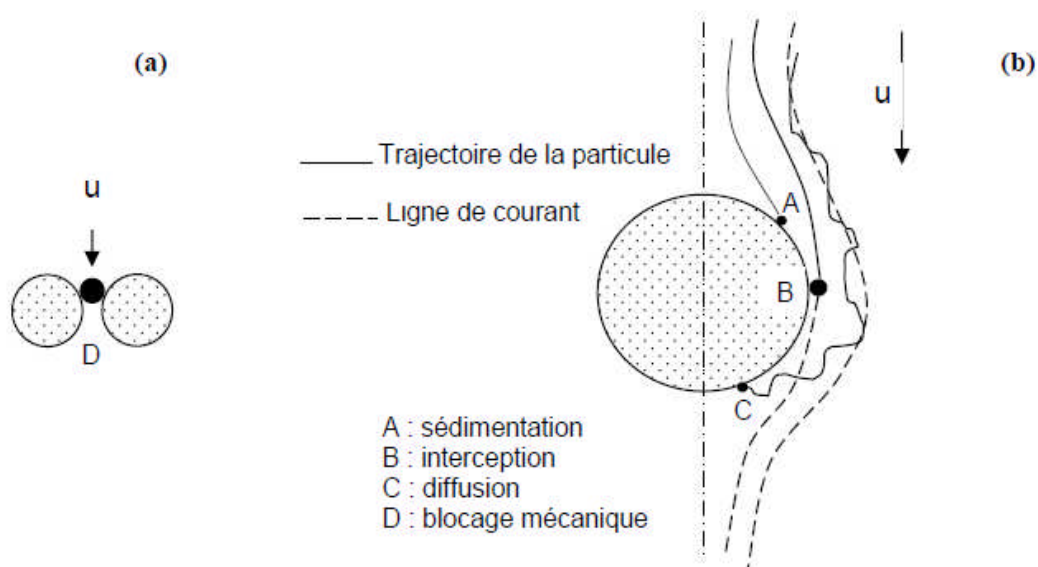


FIG (III.8) : Transport vers la surface d'un collecteur (Yao et al 1971 in Ahfir 2006)

V.2 Blocage mécanique :

Le blocage se produit quand l'espace poreux entre les grains n'est pas suffisant pour permettre le passage des particules (Yusong et al. 2008). Ce phénomène se produit normalement quand le rapport du diamètre de la particule est du grain de la matrice solide est plus grand que 0.05 (Sakthivadivel 1969) ; et peut même se produire quand le rapport est moins que 0.003 , Ce rapport est (d_p/d_{50}). Le blocage est un mécanisme important de la filtration .

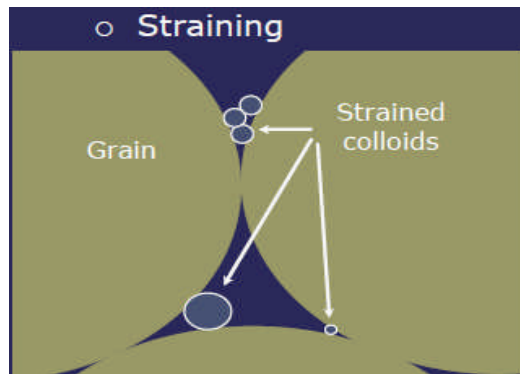


FIG III.9 : Blocage mécanique (D'après Bradford et Bettahar 2006)

V.3 Le mouvement et la diffusion brownienne :

Lors de l'observation au microscope de très fines particules, il apparaît que celles-ci sont constamment en animation. Chacune, sans en excepter une seule, se meut « infatigablement en tous sens », sans s'écarter beaucoup de sa position moyenne.

C'est une sorte de trépidation ou d'oscillation sur place, qui peut néanmoins, à la longue, produire des déplacements d'une certaine étendue, et faire cheminer les particules au sein du liquide qui les entoure. Le mouvement est d'autant plus animé que les particules sont plus petites. Il est à peine perceptible pour une taille de 4 μm , mais il est très rapide pour des particules à la limite de résolution du microscope. Plus le liquide qui baigne les particules est visqueux, moins amples et moins rapides sont leurs oscillations. Aussi la température joue un rôle important plus celle-ci est élevée et plus le mouvement est énergique. Ce mécanisme de transport et de dépôt peut être quantifié par le coefficient de diffusion donné à l'origine par Einstein (spielman 1977) :

$$D = \frac{K_b T}{3\pi\mu a_p} \quad (\text{III.15})$$

D : Le coefficient de diffusion brownienne (m^2/s)

K_b : La constante de Boltzman

T : La température en (K°)

V.4 L'interception directe :

Lorsqu'on a des particules transportées par le fluide, dont leur densité est au voisinage de ce fluide. Ces particules suivront les lignes de courant sous l'effet de leurs tailles ; elles peuvent être interceptées directement à la surface des grains (dans le cas d'une particule et d'un grain parfaitement sphérique), ce mécanisme est lié aux paramètre d'interception $(d_p/d_g)^2$.

V.5 La vitesse de décantation (Sédimentation) :

La sédimentation se produit quand les particules en suspension ont une densité supérieur à celle du fluide. La vitesse de décantation de ces particules est donnée par la loi de stockes qui est :

$$V_p = \frac{g(\rho_p - \rho_L)d^2}{18\eta} \quad (\text{III.16})$$

η : La viscosité dynamique de l'eau (Pa.s) ;

d_p : Le diamètre de la particule (m) ;

VI - Dépôt des particules :

Le dépôt de particules dans les milieux poreux résulte de plusieurs mécanismes qui dépendent de divers paramètres physiques et géométriques. Les mécanismes principaux qui sont impliqués dans le dépôt suspendu de particules (i) les particules bloquées dans les pores (ii) la sédimentation due à la densité et à la taille des particules transportées (Ahfir2009). (Kretzschmar et al. 1999) ; (1) Le transport vers la surface des grains par diffusion Brownienne, interception ou sédimentation gravitationnelle résultant des collisions entre particules et grains. Dont les particules doivent être transportées jusqu'à la surface du grain, cette étape dépend principalement de facteurs physique (taille et densité des particules, surfaces accessibles de dépôt, structure du pore et la vitesse de circulation du fluide).

(2) L'attachement des particules à la surface des grains. Qui dépend surtout de la chimie du fluide porteur et de la chimie de la surface des particules et des grains, les particules doivent être transportées au delà de la barrière d'énergie répulsive, pour ensuite s'attacher dans un premier minimum d'énergie. Pour de faibles forces ioniques une barrière d'énergie répulsive (de hauteur ΔV_d) se développe entre les particules de même charge et les surfaces. Dans ce cas, (Elimilech 1995 et al) le dépôt est ralenti et la réaction limitée (fig III.9a). Pour de fortes forces ioniques, la barrière d'énergie répulsive disparaît et les cinétiques de dépôt deviennent rapides et limitées par le transport.

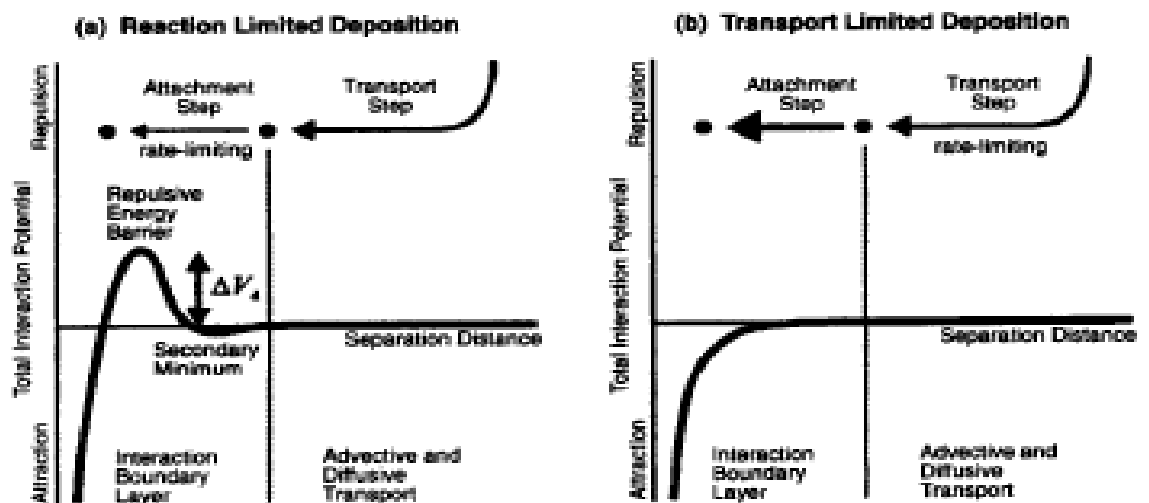


FIGURE III.10 : Vue conceptuelle des processus de dépôt des particules en deux étapes (D'après Kretzschmar et al 1999).

VII Adsorption et désorption : processus réversibles :

Les interactions entre la phase mobile en déplacement et la phase immobile (corps+ eau de rétention) sont de deux types :

Echanges dynamiques avec déplacement des molécules d'eau entre l'eau gravitaire et l'eau de rétention ; sous l'action des forces d'attraction moléculaires.

Echanges géochimiques, sous formes d'ions, entre l'eau de rétention et le solide ; d'une part et entre l'eau de rétention et l'eau gravitaire, d'autre part. Suivant le sens des échanges il y a adsorption ou désorption (Castany 1982). Les interactions eau/roche a l'origine de l'adsorption et de la désorption sont montrées dans la figure (III.10)

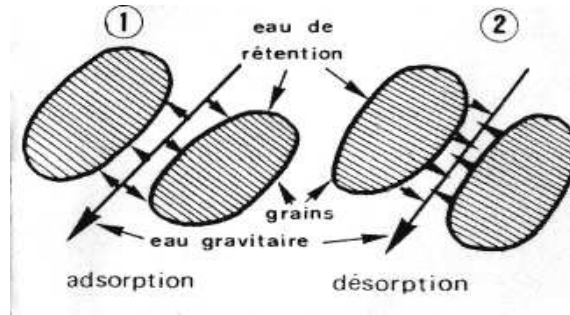


FIGURE (III.11) : Adsorption et désorption. L'eau gravitaire en écoulement subit des échanges avec l'eau de rétention (Castany 1982).

La formulation proposée par Corapcioglu et Jiang (1993 in Martin 2000) introduit les phénomènes d'adsorption et de désorption. En prenant en compte ces deux types de réaction, les auteurs ont basé leurs travaux sur un système représenté par un modèle triphasique. Le terme source de l'équation de transport devient :

$$\Gamma = - \frac{\partial S}{\partial t} \quad (\text{III.17})$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = K_d C - K_r S \quad (\text{III.18})$$

avec :

S : masse de particules retenues par unité de volume de fluide (M.L-3),

K_d : coefficient d'adsorption (T-1), correspond au taux de dépôt,

K_r : coefficient de désorption (T-1), correspond au taux de relargage

Traiter les problèmes de transport de particules colloïdales dans un milieu poreux en faisant

l'hypothèse que les réactions obéissent à une loi cinétique du 1^{er} ordre revient donc à considérer :

- que la concentration en colloïdes dans la phase fluide conditionne directement le taux de dépôt,

- que la concentration en colloïdes dans la matrice poreuse conditionne le taux de relargage.

Pour Delay *et al.*(1997) concernant les expériences décrites précédemment (injection de fluorescéine sur catsan), le terme Γ représente les échanges entre les phases de fluide mobile

et immobile ($L-\omega_c$ constitue la fraction volumique de fluide immobile). Le terme Γ s'exprime de la manière suivante :

$$\Gamma = \frac{(L-\omega_c) \frac{\partial C_{imm}}{\partial t}}{\omega_c} \quad (III.19)$$

$$(L - \omega_c) \frac{\partial C_{imm}}{\partial t} = \beta (K_p \cdot C_m - C_{imm}) \quad (III.20)$$

$$K_p = C_{imm}/C_m$$

avec :

β : taux d'échange entre les deux phases fluides (T-1)

C_m et C_{imm} : concentrations dans les phases de fluides respectivement mobile et immobile (M.L-3).

K_p : coefficient de partage entre les deux phases (M°L°T°)

VIII. Caractéristique d'une courbe de restitution :

La réalisation de traçages permet l'obtention de courbes de restitution qui traduisent la distribution de la concentration d'un soluté en fonction du temps ou de la distance. Dans la mesure où l'ensemble de restitution obtenue sur le terrain est assimilable à une courbe théorique du schéma hydro dispersif pur selon le couple concentration/temps ($c=f(t)$), il est possible d'en déduire les caractéristiques hydro dispersif de transfert dans la colonne.

En considérant le transfert comme uniforme ou à débit constant dans un milieu homogène, on peut utiliser les méthodes analytiques pour l'interprétation des traçages, basées sur les solutions explicites. Ces méthodes analytiques s'appuient soit sur un traitement statistique (Bear 1972).

Dans cette étude nous retiendrons la méthode d'injection instantanée (injection impulsion) et un échantillonnage à une grande fréquence en un seul point d'observation (sortie de la colonne), permet l'obtention de la variation de la concentration en fonction du temps. De cette courbe plusieurs paramètres caractéristiques peuvent être déterminés :

Temps caractéristiques :

t_a : Temps d'arrivée du traceur auquel correspond la vitesse maximale,

t_m : Temps modal correspondant à la concentration maximale C_m ,

\bar{t} : Temps de résidence (séjour) moyen ou moyenne arithmétique pondérée des temps,

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t C dt}{\int_0^{\infty} C dt} \quad (\text{III.21})$$

t_c : Temps de transfert par convection pure, $t_c = x/u$, avec x la longueur du milieu poreux et u la vitesse moyenne du pore (vitesse effective).

t_h : Temps harmonique ou moyenne harmonique pondérée des temps

$$t_h = \frac{\int_0^{\infty} C dt}{\int_0^{\infty} \frac{C}{t} dt} \quad (\text{III.22})$$

t_f : Temps final (Retour a concentration initiale).

Paramètres statistiques :

Chaque courbe de restitution est caractérisée, par ces moments. Le moment de la courbe de restitution d'ordre n par rapport au temps est :

$$m_n = \int_0^{\infty} C(t) \cdot t^n dt \quad (\text{III.23})$$

Le temps moyen de résidence et la variance réduite :

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot C(t) \cdot dt}{\int_0^{\infty} C(t) \cdot dt} \quad (\text{III.24})$$

$$\sigma_R^2 = \frac{\int_0^{\infty} \left(\frac{t-\bar{t}}{\bar{t}}\right)^2 C(t) \cdot dt}{\int_0^{\infty} C(t) \cdot dt} \quad (\text{III.25})$$

Le taux de restitution est :

$$R = \frac{\int_0^{\infty} Q \cdot C(t) \cdot dt}{m} \quad (\text{III.26})$$

Avec m la masse du traceur (dissous ou particulaire) initialement injectée.

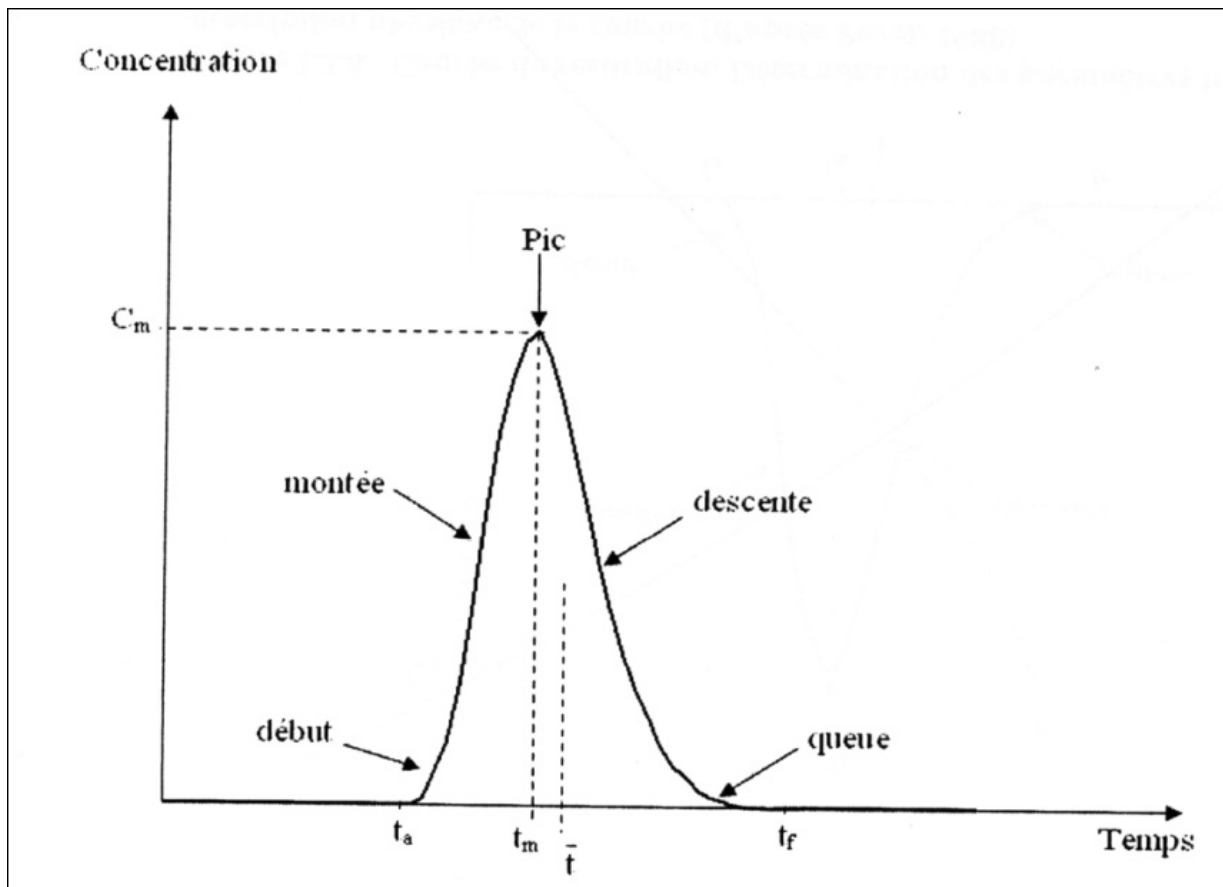


FIGURE (III.12) : Courbe de restitution (évolution de la concentration en fonction du temps a distance fixe)

Chapitre IV

Processus du transport dans les milieux poreux

Rapport-Gratuit.com

Le transport ou la migration des particules ou des éléments chimiques dans un milieu poreux ou fissuré résulte de la combinaison de trois mécanismes principaux :

- La convection, qui est l'entraînement des particules à la vitesse moyenne du fluide,
- La diffusion moléculaire engendrée par les gradients de concentration,
- La dispersion cinématique engendrée par l'hétérogénéité du vecteur vitesse réelle de l'écoulement dans le milieu poreux, par rapport à la vitesse convective moyenne (Beaudoin et al 2008).

I. La convection:

Le déplacement d'une particule dans un aquifère se fait avec le déplacement moyen de la masse d'eau. L'eau est ainsi le vecteur de déplacement, et le transport dominant de la particule suspendue ; ce phénomène s'appelle la convection. La vitesse de transport est donc celle de l'eau lorsque la particule ne réagit pas avec la matrice solide (Hammadi & Belhadj 2006).

Entre particules il existe une différence de masses ou des concentrations massiques qui s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial c}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x} \quad (\text{VI.1})$$

Le signe négatif résulte des convections spatiales et temporelle, il indique que la variation observée en descendant dans le temps est proportionnelle à celle qui existait dans l'espace.

Avec :

$$u = \frac{U}{\omega_c} \quad (\text{VI.2})$$

u : La vitesse effective d'écoulement

U : Vitesse de Darcy

C : La concentration volumique

ω_c : La porosité cinématique, ou La phase d'eau mobile est associée à (ω_c), alors que la fraction volumique de fluide immobile est représentée par la quantité ($L-\omega_c$), L étant une grandeur comprise entre la porosité cinématique et la porosité totale, et $\omega_c < \omega$.

II. La Dispersion :

Ce phénomène est à la fois associé au mouvement du fluide et la présence du milieu poreux avec son complexe structure porale. Des particules fluides qui sont ensemble à un moment donné, ont tendance à s'éloigner à cause d'au moins trois mécanismes physiques. D'abord, les particules qui se trouvent plus proche de parois des pores bougent moins vite que celles au centre des pores. Ensuite, la variation de la dimension des pores, se traduit par des vitesses relatives différentes des particules. A la fin, des particules se trouvant au voisinage d'un point à un moment donné, peuvent parcourir des chemins différents aboutissant aux différents chenaux. Quand ces mécanismes se produisent en présence d'un gradient de concentration, le mouvement du fluide dans l'ensemble, est identifié par un mécanisme de dispersion. En réalité, la dispersion est due à notre incapacité de suivre le détail du mouvement du fluide dans les pores.

Statistiquement la dispersion tient compte de la déviation par rapport au mouvement moyen. Plus la distance parcourue par une particule est importante, plus elle a la chance de rencontrer des hétérogénéités qui augmentent sa déviation par rapport à un système homogène idéalisé.

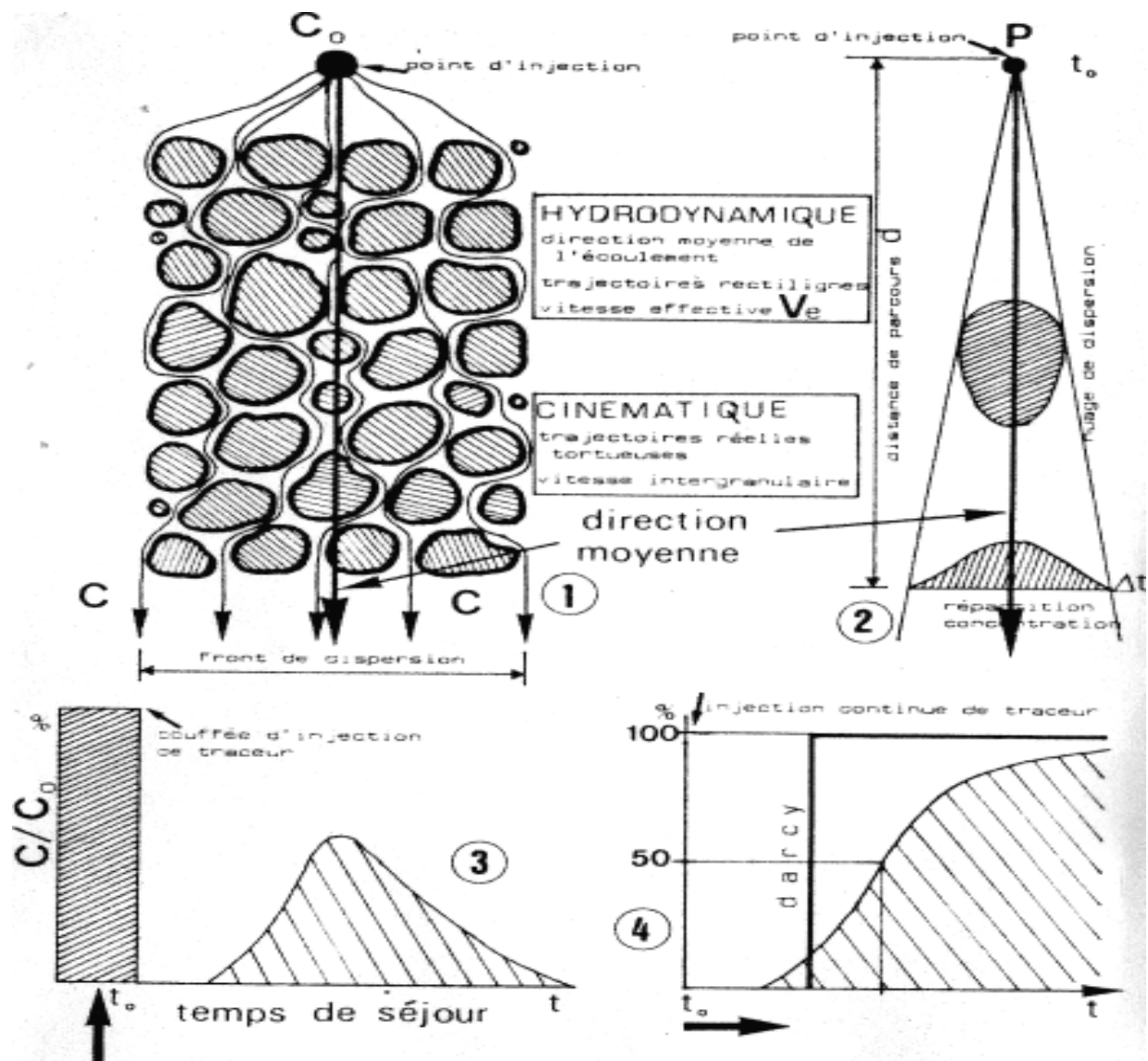


FIGURE (IV.1) : Phénomènes de dispersion (1) Trajectoires réelles des particules d'eau (2) Cones de dispersion (3) Tracages par bouffées (4) Tracages par injection continue (Castany 1982).

II.1 La dispersion mécanique :

La dispersion mécanique est causée par trois mécanismes bien distincts :

II.1.1 La dispersion de Taylor- Iris :

La dispersion à l'intérieur d'un canal est causée par la différence des vitesses d'écoulement. Celles-ci sont nulles près des parois, à cause de la rugosité de ces dernières et maximales au centre du canal. (profil parabolique)

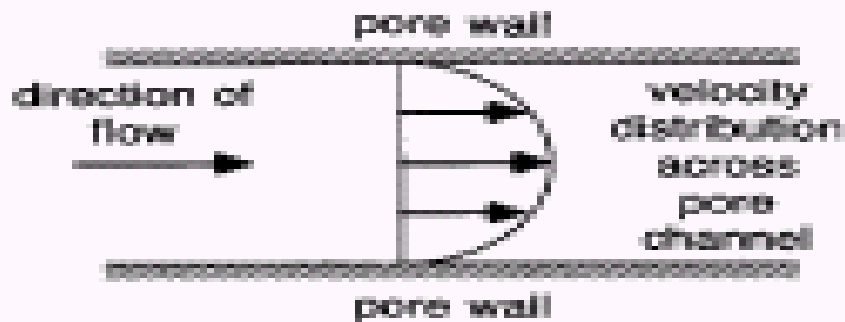


FIGURE (IV.2) : Dispersion de Taylor- Iris (Morel 2004)

II.1.2 La dispersion associée aux différentes vitesses d'écoulement :

Les vitesses varient d'un pore à l'autre du milieu. Les pores sont de diamètres et rugosités variables, ce qui cause d'avantage de dispersion. Le transport des particules par des chemins tortueux se mélange et engendrant une dilution de la concentration.

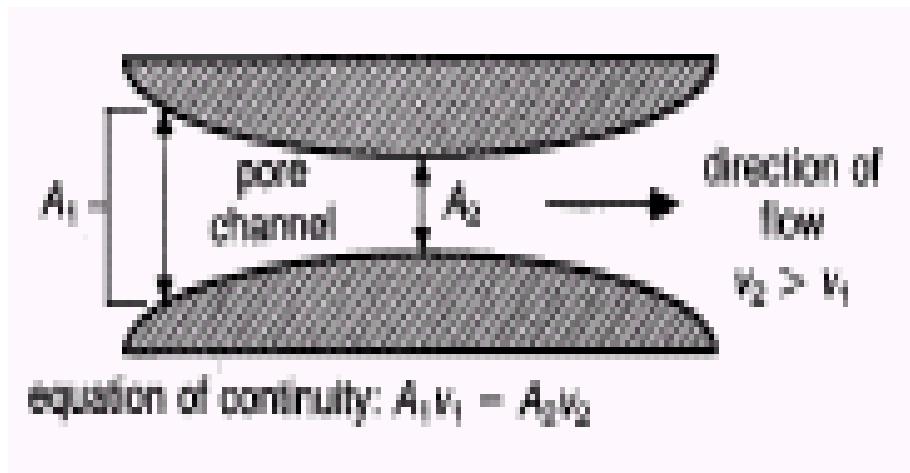


FIGURE (IV.3) : La différence d'ouverture des pores est responsable des vitesses différenciées selon le canal emprunté par le fluide.

II.1.3 La dispersion cinématique :

La dispersion cinématique est un phénomène macroscopique de mélange lié principalement à l'hétérogénéité des vitesses microscopiques à l'intérieur du milieu poreux. Ce phénomène provoque, comme la diffusion moléculaire, un étalement des solutés à travers le milieu poreux. En pratique, la séparation entre les phénomènes de diffusion moléculaire et de dispersion cinématique peut paraître artificielle vu que ces phénomènes sont inséparables. Néanmoins, seule la diffusion moléculaire prend place également dans un fluide au repos ; alors que la dispersion cinématique n'apparaît que lorsque le fluide est en mouvement. (De Marsily ; 1986) et (Bear ; 1972). Cette dispersion est associée à l'existence de l'hétérogénéité locale. Au temps t_0 , deux solutés très voisins peuvent se retrouver au temps $t_0 + t$ très loin l'un de l'autre à cause de l'hétérogénéité du champ de vitesse local (liée à la tortuosité).



FIG IV.4 : Illustration de la dispersion cinématique

La formule mathématique de la dispersion cinématique proposée par (Bear 1972) consiste à adopter une loi de transfert par dispersion analogue à la loi de Fick :

$$\text{Flux dispersif} = -\bar{\bar{D}}' \overline{\text{grad } C} \quad (\text{III.3})$$

Le coefficient de dispersion $\bar{\bar{D}}'$ s'exprime sous la forme tensorielle, symétrique et de second ordre.

$$\bar{\bar{D}}' = \begin{bmatrix} D'_L & 0 & 0 \\ 0 & D'_T & 0 \\ 0 & 0 & D'_T \end{bmatrix}$$

III La diffusion moléculaire :

C'est un phénomène physique lié à l'agitation moléculaire. Dans un fluide au repos, les atomes ou les molécules d'un élément ou d'un composé chimique sont soumis au phénomène de diffusion. Ce phénomène transforme une hétérogénéité locale de concentration en une concentration homogène dans tout le milieu considéré. Ce transfert de molécules est décrit par la loi de Fick qui exprime le fait que le flux de matière transporté par unité de surface est proportionnel au gradient de concentration de la substance. Le coefficient de diffusion moléculaire D_0 traduit cette proportionnalité.

Dans les milieux poreux, la présence des grains arrête ou ralentit le mouvement Brownien des particules. Il en résulte, un coefficient de diffusion moléculaire, dit effectif, D^* en milieu poreux qui est plus faible que D_0 . On admet généralement que (De Marsily 1986) :

$$\frac{D^*}{D_0} = \frac{1}{F\omega} \quad (\text{III.4})$$

F : le facteur de formation, définit par le rapport de la conductivité électrique en présence du milieu poreux à celle de l'eau libre ;

ω : La porosité total du milieu

$F\omega = \tau$: La tortuosité du milieu, en pratique la tortuosité du milieu varie de 0.1 (argiles) et 0.7 (sables).

IV La dispersion hydrodynamique :

La dispersion hydrodynamique est la sommation des deux phénomènes décrits précédemment, soit la dispersion mécanique et la diffusion moléculaire. Dans les sens longitudinal et transversal de l'écoulement, les coefficients de dispersion hydrodynamique peuvent s'écrire de la façon suivante :

$$D_L = D^* + V_e \times \alpha_L$$

$$D_T = D^* + V_e \times \alpha_T$$

Les produits $V_e \times \alpha_L$ et $V_e \times \alpha_T$ représentent les dispersions mécaniques longitudinales et transversales les paramètres α_L et α_T les coefficients de dispersivité, V_e la vitesse moyenne de l'écoulement Morel(2004). L'étalement du pic au sein d'un tube de courant est causé par la

dispersion longitudinale. Les échanges latéraux entre filets liquides voisins sont due à la dispersion transversale (plus particulièrement sous l'effet de la tortuosité, et quelquefois, en cas de faible vitesses, et de la diffusion moléculaire). Le flux par dispersion hydrodynamique est exprimé:

$$f_{dis} = \omega_c \cdot \bar{D} \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (III.5)$$

$\left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)$: Concentration du contaminant à une distance x.

V- Equation de transport dans une colonne au laboratoire :

L'équation de convection / dispersion est l'équation aux dérivées partielles classiquement utilisée en hydrogéologie pour décrire le transport de solutés dans les milieux poreux saturés.

Dans le cas d'un écoulement monodimensionnel, en milieu homogène, pour une distribution

des vitesses uniforme, sans interactions (pour des éléments conservatifs), elle s'écrit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} \quad (IV.6)$$

De nombreux auteurs ont rajouté à l'équation de transport convection- Dispersion, un terme source $-K_{dep}C$, représentatif des interactions existant entre les particules circulant dans le milieu poreux et les grains du milieu poreux (phénomènes de dépôt et/ou de relargage des particules colloïdales, lorsqu'elles sont présentes en quantité suffisamment importante dans le milieu). L'équation devient alors (Martin 2000) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} - K_{dep} C \quad (IV.7)$$

C : La concentration de la suspension ;

t : Le temps ;

x : La distance parcourue

D_L : Le coefficient de dispersion longitudinal

$D_L = \alpha_L \cdot u$ (α_L : La dispersivité longitudinale)

u : La vitesse moyenne de l'écoulement

K_{dep} :Le coefficient cinétique de dépôt

La formulation la plus simple est celle utilisée entre autres par Kretzschmar *et al.*(1997) : le

terme $K_{dep}C$ est caractéristique d'une réaction du 1^{er} ordre avec la concentration C ; le

Paramètre cinétique K_{dep} de dimension (T^{-1}), est un coefficient permettant d'évaluer le taux de

dépôt des colloïdes. Les auteurs estiment K_d de la manière suivante :(Tufenkji et al 2004)

$$K_{dep} = -\frac{U}{\omega L} \ln \left(\frac{C}{C_0} \right) \quad (IV.8)$$

U : La vitesse d'écoulement.

ω : La porosité du milieu.

L : La longueur de la colonne.

$\frac{C}{C_0}$: Concentration réduite atteinte au plateau des courbes de restitution

Le temps moyen de résidence est calculé directement par la formule :

$$t_p = \frac{V_p}{Q} \quad (IV.9)$$

V_p :Le volume poral

Q : Le débit d'alimentation

L'équation de convection dispersion est la base du traitement de transport d'une substance, ou d'une concentration et son évolution dans le milieu poreux. La figure ci-dessous représente la variation et l'étalement de la concentration d'un soluté par rapport à une distance :

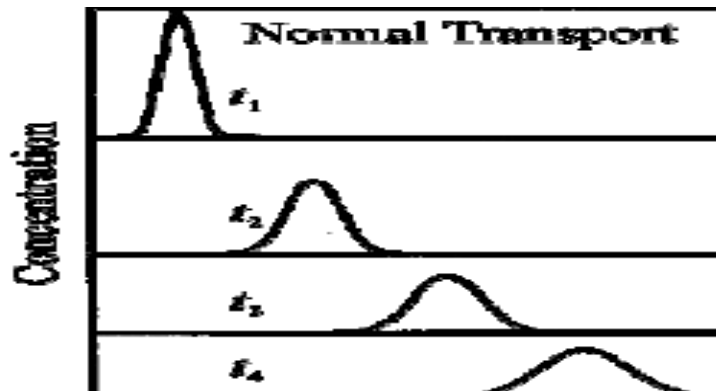


FIG IV.5 : Evolution de la concentration en fonction de la distance parcourue (Porel 1988)

L'importance relative du transport par dispersion et/ou diffusion par rapport au transport par convection est exprimé à l'aide du nombre de pécelet, nombre adimensionnel généralement défini par :

$$Pe = \frac{uL}{D_L} \quad (IV.10)$$

Avec L la longueur caractéristique de la colonne, et u la vitesse moyenne convective. De nombreuses expériences ont essayé de déterminer les relations liant le coefficient dispersion, la distribution de vitesse et le coefficient de diffusion moléculaire. Une analyse dimensionnelle montre que le nombre adimensionnel D_L/D_0 est fonction d'un autre nombre adimensionnel, le nombre de pecelet (appelé aussi pecelet de diffusion) défini cette fois par (MARTIN 2000) :

$$Pe_d = \frac{ud_g}{D_0} \quad (IV.11)$$

d_g : Le diamètre des grains du milieu poreux.

u : La vitesse moyenne convective.

D_0 : Le coefficient de diffusion en eau libre.

C'est un nombre sans dimension qui détermine en hydrogéologie les régimes d'écoulement dans un milieu poreux. La courbe expérimentale de la figure ci-dessous D_L/D_m en fonction de Pe_d permet de mettre en évidence l'importance relative de la diffusion et de la dispersion cinématique :

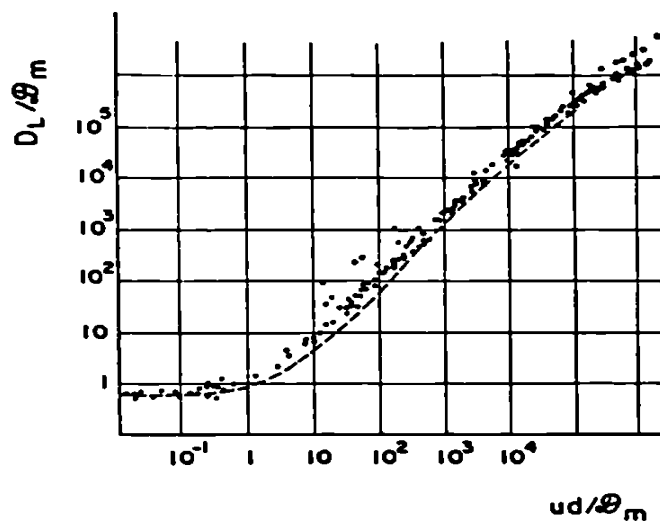


FIG IV.6 : Mesure en laboratoire du coefficient D_L Pour les milieux poreux granulés

Pour $Pe_d \leq 0.1$: Le régime d'écoulement est un régime de diffusion moléculaire pure.

Pour $0.4 < Pe_d \leq 6$: L' influence de la dispersion moléculaire apparait et D_L/D_m augmente en fonction de Pe_d

Pour $Pe_d \gg 6$: D_L devient directement proportionnel à la vitesse d'écoulement ce qui implique que la dispersion cinématique est le processus dominant.

La représentation des résultats expérimentaux sur un diagramme logarithmique ou l'inverse du nombre de peclét dynamique, défini par $Pe_{dyn} = ud_g/D_L$, est une fonction du nombre de Peclét de diffusion qui permet la mise en évidence des différent régimes de dispersion (Ahfir2007). Sous cette forme de représentation le régime de dispersion cinématique pur est très net, celui-ci est représenté par la partie où $1/Pe_{dyn}$ prend une valeur constante.

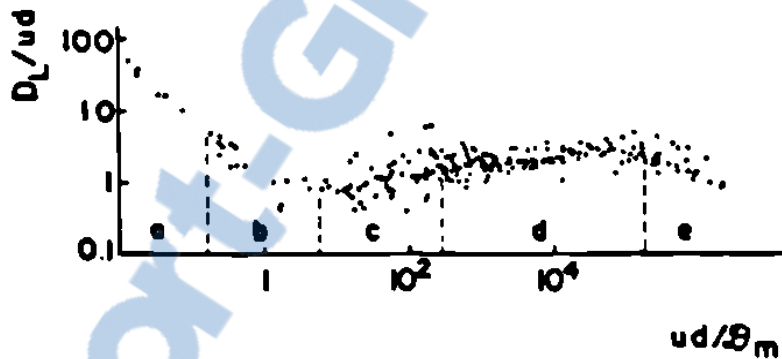


FIG IV.7 : Mise en évidence des régimes d'écoulement

Regime a : Diffusion moléculaire pure

Regimes b et c : Sont des régimes de transitions la dispersion cinématique et la diffusion moléculaire sont de meme ordre.

Regime d : C'est un régime de dispersion cinématique pure .

Regime e : Ce régime correspond à une valeur de peclét où la loi de Darcy n'est plus valable.

Partie 2

Chapitre V

Description et étude des paramètres physique

L'étude du transport des matériaux en suspension dans un milieu poreux saturé est très difficile à réaliser dans un terrain naturel vu les facteurs inconnus (Vitesse locale, directions, hétérogénéité du terrain, variation de la perméabilité et la porosité, réactions chimiques). Ces paramètres compliquent l'étude et influencent l'interprétation des résultats.

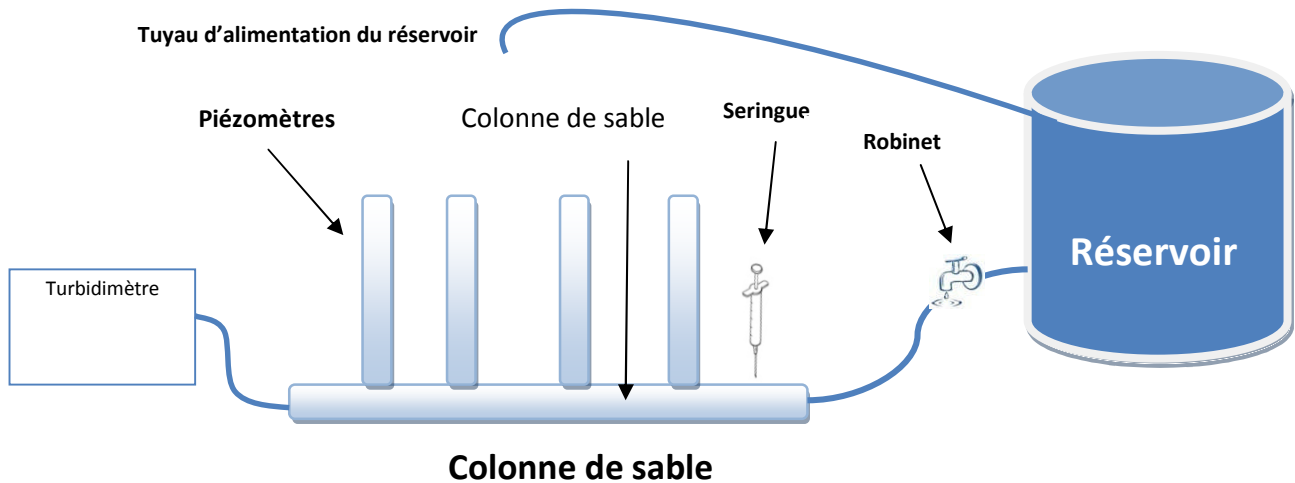
Le but de la réalisation d'un modèle expérimental de laboratoire est de réduire ces facteurs d'influence des paramètres qui perturbent le suivi de l'expérimentation (transport, dépôt). Ainsi que la quantification du champ de vitesse et son influence sur la dispersion et la convection.

I. Description du modèle expérimental :

L'étude des principaux mécanismes de transport des particules colloïdales dans les milieux poreux sont, la migration des particules qui est le transport par convection (qui est engendré par la force d'entraînement du fluide) et le dépôt de ces derniers (l'agglomération) qui dépend de plusieurs facteurs (forces hydrodynamiques, d'interaction électrostatiques entre double couches diffuses, forces attractives de van der Waals et les forces répulsives).

Le dispositif expérimental est composé de :

- Un réservoir d'eau qui alimente la colonne, ce dernier est alimenté constamment à partir d'un robinet pour maintenir la charge d'alimentation constante.
- Un tuyau de diamètre 1,7mm qui relie le réservoir à la colonne.
- Une colonne en PVC de diamètre 50mm fermée en ces deux extrémités par des filtres pour empêcher la perte des grains qui constituent le milieu poreux.
- Une seringue à l'amont de la colonne pour l'injection de la suspension et le traceur
- 4 piézomètres pour contrôler et maintenir la charge hydraulique à l'intérieur de la colonne, séparés d'une distance de 7,5cm.
- Un turbidimètre à la sortie de la colonne pour mesurer la turbidité et la traduire en concentration.



FIGURE(V.1) : Schéma de la colonne expérimentale

II. Description du milieu poreux utilisé :

Le choix du sable utilisé dépend de l'expérience et de l'objectif à réaliser, puisque notre expérience sera réalisé dans des colonnes au laboratoire, on a éliminé les grains qui ont un diamètre inférieur à 0.63mm pour la bonne circulation de l'eau.

Les deux types de sables utilisés sont des sables siliceux (densité sèche constante après saturation tout à fait le contraire du sable qui contient du calcaire). Notre sable provient de la région d'Adrar, le premier type de sable est un sable à granulométrie hétérogène de diamètre des grains compris entre 0.63 et 2mm on l'appel dans notre expérience sable1, le deuxième type de sable est un sable sélectionné pour avoir une granulométrie presque homogène de diamètre $d_{90} = 1\text{mm}$ on l'a appelé sable 2.

II.1 Etude granulométrique :

L'étude granulométrique, ou la granulométrie est l'ensemble des techniques de laboratoire, permettant de déterminer les caractéristiques physiques et géochimiques des roches meubles.

✓ L'analyse granulométrique : Elle permet d'étudier la répartition des grains solides constituant le sol. Elle se fait par tamisage de l'échantillon du sol utilisé et se traduit par une courbe ; et c'est à partir de cette courbe que se fait l'identification du sol selon les classifications existantes.

✓ Le tamisage à sec : La méthode consiste à identifier le sol préalablement lavé et étuvé, de diamètre supérieur à 0.63mm par passage à travers une colonne de tamis de divers ouvertures afin d'établir les différentes proportions.

✓ Mode opératoire :

- Prendre un échantillon de sol à analyser (1Kg)
- Constituer une colonne de tamis avec des ouvertures de mailles de 3, 2.5, 2, 1.6, 1.25, 1, 0.8 et 0.63mm. Après étude granulométrique on a eu une granulométrie comprise entre 0,8 et 3mm. Concernant le sable1, 90% de l'échantillon a un diamètre de 1,65 mm. Pour le sable2, 90% de l'échantillon a un diamètre de 1mm.

- Fixer soigneusement la colonne sur une table vibrante et agiter pendant 15mn

- Peser chacun des tamis et en déduire le poids des refus

- Calculer le pourcentage cumulé des tamisats

Tableau (V.1) : Résultats de l'analyse granulométrique

Sable 1				Sable 2			
Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus (g)	% des refus (g)	% des tamisats cumulé	Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus (g)	% des refus (g)	% des tamisats cumulé
2.5	6	0.6	100	1.6	2	0.2	99.9
2	160	16	99.4	1.25	42	4.2	99.7
1.6	748	74.8	83.4	1	900	90	95.5
1.25	75	7.5	8.6	0.8	8	0.8	5.5
1	6	0.6	1.1	0.63	39	3.9	4.7
0.8	3	0.3	0.5	0.5	8	0.8	0.8
0.63	2	0.2	0.2				
0.315	0	0	0				

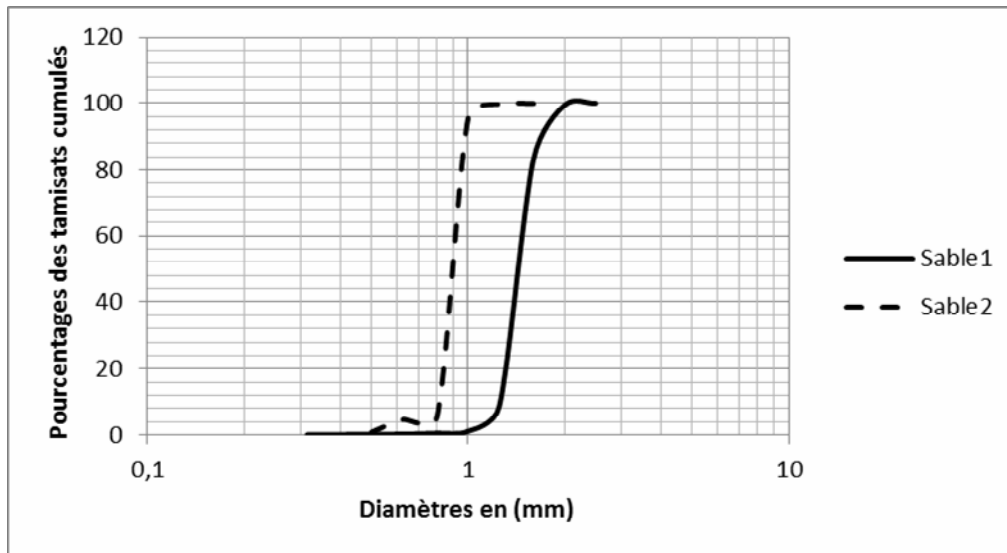


FIGURE (V.2) : Courbe granulométrique des deux milieux poreux

Les courbes granulométriques de la figure (Fig V.2) ont les caractéristiques physiques réparties dans le tableau suivant :

TABLEAU (V.2) : Valeurs des coefficients d'uniformité des deux formations et leurs diamètres.

	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	Le coefficient d'uniformité <i>U</i>
Sable 1	1.3	1.5	1.6	1.23
Sable 2	0.81	0.89	0.90	1.11

Les courbes ont une pente voisine de la verticale, donc la gamme des diamètres est étroite, notre matrice poreuse des deux sables est uniforme, ceci est caractérisée par leurs coefficients d'uniformité.

II.2 Calcul des paramètres physiques du milieu :

II.2.1 La densité :

On distingue la densité spécifique et la densité apparente :

✓ La densité spécifique : On prend un échantillon de sol à étudier (50g), puis on introduit cette quantité dans une éprouvette graduée qui contient déjà un certain volume d'eau distillé (50cm³) et on déduit le volume d'eau déplacé qui représente le volume du sol sec.

✓ La densité apparente : On a introduit 135g de sable dans une tare de volume égale à 99.46 cm³ puis on divise notre poids sur le volume indiquée.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau (V.6)

II.2.2 La porosité :

La porosité est définie d'après la formule (II.2) :

$$\omega = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \text{ ou } 1 - d_s/d_a \quad (\text{V.1})$$

III. La perméabilité:

III.1 Détermination de la perméabilité à partir de la courbe granulométrique :

Du point de vue pratique la formule de Hazen, est valide pour $C_u \geq 5$ et $d_{10} \geq 0,3 \text{ mm}$ donne aussi de bon résultats (Lencastre 1995), avec d_{10} en (cm) et K en (m/s).

$$K = 100 d_{10}^2 \quad (\text{V.2})$$

Tableau (V.3) : Calcul de la perméabilité à partir de la loi de Hazen pour les deux sables

	Sable 1	Sable 2
K(m/s)	$1,69 \cdot 10^{-2}$	$6,56 \cdot 10^{-3}$

III.2 Détermination de la perméabilité à partir du perméamètre:

C'est un perméamètre à charge constante au niveau du laboratoire dont le mode opératoire est : (Schéma présenté en annexes (Photo 2)).

-Assembler le matériel

-Introduire de l'eau dans le cylindre, pour un régime permanent on mesure :

- Le débit Q
- La hauteur d'eau de la colonne de sol H_s
- La hauteur de la surface d'eau dans le tube piézométrique situé a la partie supérieure H_n

-Arrêter l'alimentation

- Vider l'eau

- Ajouter 10cm de sol et refaire les opérations précédentes.

$$K = \frac{QH_s}{\pi R^2 H_n} \quad (V.3)$$

Les expériences effectuées sont récapitulées dans le tableau (V.4) :

Tableau (V.4) : Résultats des perméabilité donnée par le perméamètre

Essai		Débit m ³ /s	H _s (m)	H _n (m)	πR^2 (m)	K(m/s)	K _{moy} (m/s)
Sable1	1	6,66.10 ⁻⁵	0.367	0.2352	9.15.10 ⁻³	1,11.10 ⁻²	1,315.10 ⁻²
	2	9,10 ⁻⁵	0.4	0.258	9.15.10 ⁻³	1,52.10 ⁻²	
Sable2	1	6,66.10 ⁻⁵	0.393	0.417	9.15.10 ⁻³	6,85.10 ⁻³	8,15.10 ⁻³
	2	9,10 ⁻⁵	0.5	0.52	9.15.10 ⁻³	9,45.10 ⁻³	

III.3 Détermination de la perméabilité à partir de la colonne expérimentale:

Pour la détermination de la perméabilité à partir de la colonne, il faut que l'écoulement soit laminaire afin que la loi de Darcy soit valable. Pour sa validité (De Marsily 1986) a défini le

nombre de Reynolds dans les milieux poreux par la formule suivante :

$$Re = \frac{U d_{50}}{\mu} \quad (V.4)$$

U : La vitesse de Darcy

μ : La viscosité dynamique

Pour un Re compris entre 1 et 10 l'écoulement est laminaire à l'intérieur des pores

Pour un Re compris entre 10 et 100 commence le régime de transition, où les forces d'inertie ne sont plus négligeables et où la loi de Darcy ne s'applique plus

Et en fin pour un Re au-delà de 100 le régime d'écoulement est turbulent à l'intérieur des pores. (Ahfir 2008).

Le calcul du coefficient de perméabilité se fait par l'utilisation de la loi de Darcy d'où :

$$K = Q/A.i \quad (V.5)$$

Avec :

A : La section de la colonne

i : Le gradient hydraulique

Les résultats sont récapitulés dans le tableau (V.5) :

Tableau (V.5) : Valeurs de la perméabilité calculées a partir de la colonne expérimentale

	Q(l/s)	Lecture du piézomètre(1) h_1 (cm)	Lecture du piézomètre(1) h_2 (cm)	Distance Entre les piézomètres(cm)	$i=(h_1-h_2)/L$	Perméabilité (m/s)	Perméabilité moyenne (m/s)
Sable 1	0,003	3	2,1	7.5	0,12	0,0127	$1,68. 10^{-2}$
	0,0066	4	2,8	7.5	0,16	0,021	
Sable2	0,003	5	3	7.5	0.26	0.00587	$8,38. 10^{-3}$
	0,0066	6	3,5	7.5	0.33	0.0109	

Après avoir calculé la perméabilité par les trois méthodes, nous avons choisi la valeur de la perméabilité trouvée à partir de la colonne expérimentale. On a remarqué que la perméabilité augmente en fonction du débit d'écoulement pour le sable1, et presque constante pour le sable2 malgré l'augmentation du débit. Le sable2 a une granulométrie homogène, on déduit donc, que l'homogénéité des grains joue un rôle important pour la stabilité de la perméabilité.

Tableau (V.6) : Propriétés physiques et hydrauliques des deux milieux poreux

	Densité apparente (d_a)	Densité spécifique (d_s)	Porosité %	Perméabilité (m/s)
Sable 1	1.33	2.45	45	$1,68.10^{-2}$
Sable 2	1.54	2.49	38	$8,38.10^{-3}$

IV. Le remplissage de la colonne :

Le remplissage de la colonne se fait en position verticale et en conditions saturées. Le matériau granulaire est déversé dans la colonne préalablement remplie d'eau pour éviter le piégeage des bulles d'air. Les grains sont mis en place par petite quantités de volume connu, en faisant subir à la colonne de légères vibrations pour assurer une bonne compaction.

IV.1 Les matériaux en suspension :

Le choix des particules en suspension c'est porté sur des particules de diamètres inférieur à $80\mu\text{m}$ (Argiles et chaux). La répartition des diamètres est défini dans ce qui suit par la méthode dite sédimentométrie.

IV.1.1 La sédimentométrie des matériaux en suspension :

La sédimentométrie donne la répartition des grains solides de diamètre inférieur à $80\mu\text{m}$, c'est-à-dire ce qui est désigné sous l'appellation de sols fins. Elle permet de tracer la courbe granulométrique des sols fins. Lors de la décantation de grains solides en suspension dans l'eau, les grains les plus gros chutent plus rapidement que les plus petits. La vitesse de chute est directement liée à leurs diamètres (Loi de Stokes) relation (III.9).

Mode opératoire :

- 1) Prendre deux éprouvettes de deux litres de volumes chacune.
- 2) Le sol est mis à imbibition pendant 12 à 15h dans une solution constituée par environ 500 cm^3 d'eau distillée ou déminéralisée additionnée d'une solution défloculante d'héxamétophosphate de sodium (60cm^3 d'une solution de 5%). L'ensemble est soumis à une agitation mécanique (1000 à 1500 tr/min) pendant 3min afin de séparer convenablement les grains les uns des autres.
- 3) On verse la suspension, ainsi préparée, dans l'une des éprouvettes.
- 4) Compléter par de l'eau distillée jusqu'à 2l.
- 5) La même eau distillée est mise dans la deuxième éprouvette, qu'on appelle témoin, et dans laquelle on place un densimètre
- 6) À l'aide d'un agitateur manuel, on agite la suspension pour obtenir une concentration uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette.
- 7) Ensuite on introduit le densimètre dans la suspension et on procède aux lectures à :
30s, 1min, 2min, 5min, 10min, 20min, 40min, 80min, 4h et 24h. On note à chaque lecture, la densité de l'eau et la température se trouvant dans l'éprouvette témoin. (Cordary 1994)

Calculs, mesures et résultats :

Calcul du diamètre des particules non décantées :

Le diamètre des particules est tiré de la relation de Stokes :

$$D=K\sqrt{\frac{H_r}{t}} \text{ avec } K^2=\frac{18\eta}{\gamma_s-\gamma_w} \quad (\text{V.6})$$

H_r : Profondeur du centre de poussée dans la suspension à l'instant t

t : Le temps de lecture.

Calcul de la profondeur du centre de poussée

$$H_r=H-100.H_1.(R_c-R_t)-H_c \quad (\text{V.7})$$

H : Hauteur séparant le milieu du bulbe du densimètre de la graduation 1,0000

($H=22.2$ cm)

H_1 : La distance séparant la graduation 1,0000 de la graduation 1,0100 ($H_1= 3.8$ cm)

R : La lecture du densimètre

R_t : La lecture du densimètre dans l'éprouvette témoin.

H_c : La hauteur de déplacement de la solution due au densimètre. ($H_c=0$ pour les trois premières lectures, $H_c=0.5V_d/A=1.4$ cm : Avec V_d :le volume du densimètre et A : l'aire de la section droite de l'éprouvette)

Calcul du pourcentage des particules non décantées :

On exprime le pourcentage « P » des grains de diamètre inférieur à « D » qui sont encore en suspension a l'instant t :

$$P=\frac{V'}{m} \times \frac{\gamma_s}{\gamma_s-R_t\gamma_w} \times \gamma_w \times [R_c - R_t] \quad (\text{V.8})$$

Avec : V' : Volume de la suspension

m : Masse de prise d'essai

R_c : La lecture corrigée du densimètre à l' instant t

R_t : La lecture du densimètre dans l'éprouvette témoin à l' instant t

La mesure des pourcentages du tamisât des éléments fin pour les argiles est indiquée sur le tableau suivant :

Tableau (V.7) : Résultats d'analyse granulométriques par sédimentométrie

Temps de lecture	Lecture R	Lecture R _t	Température C°	$D=K\sqrt{\frac{H_r}{t}}$	% des grains □ D→P
30s	1.0078	0.997	24	76.27	85.61
1min	1.0076	0.997	24	54.05	84
2min	1.0075	0.997	24	38.25	83.23
5min	1.0072	0.997	24	23.32	80.85
10min	1.007	0.997	25	16.25	79.27
20min	1.0069	0.997	25	11.51	78.47
30min	1.0068	0.997	25	9.4	77.68
40min	1.0066	0.997	25	8.16	76.09
80min	1.0061	0.997	25	5.8	72.13
4h	1.0055	0.997	24.5	3.43	67.37
24h	1.0042	0.997	24	1.42	55.48

A partir de ce tableau on peut connaître la gamme de diamètres de notre suspension argileuse qui est poli dispersive entre 76 et 1,42 μ m, et plus 50% de l'échantillon a un diamètre inférieur à 1,42 μ m. D'après le spectre de taille (Figure III.5) notre suspension comporte même des colloïdes.

L'étude de la taille des particules est importante pour faire le rapport particule-grain du milieu poreux afin d'étudier le phénomène de blocage. (Sakthivadivel 1969) Le blocage se produit lorsque le rapport S_p/S_g est plus grand que 0,05.

Notre gamme des tailles en suspension est largement inférieur à la taille moyenne des grains constituant les milieux poreux avec un rapport de S_p/S_g de l'ordre de 10^{-6} .

Chapitre VI

Mode opératoire et expérimentation

De nombreux paramètres influent sur le transport et la rétention des particules en milieu poreux saturé (taille des particules, forme des particules, surface des grains qui constituent le milieu poreux, longueur et largeur de la colonne) (Jeremy A .2004).

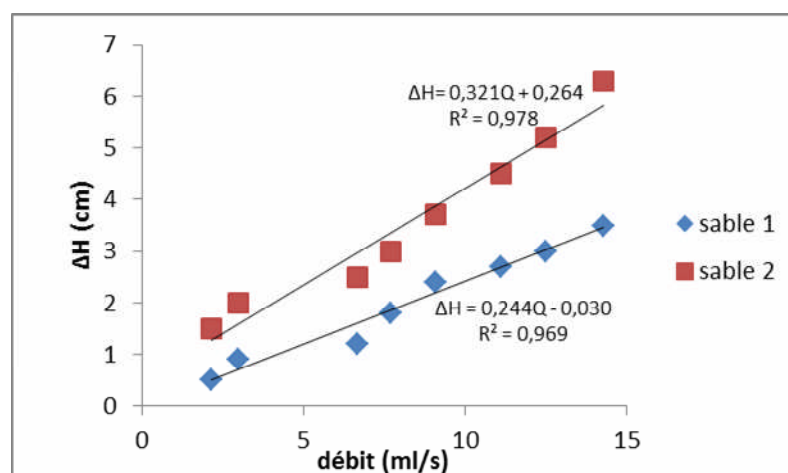
On a choisi le traçage de la suspension par la méthode d'injection par impulsion. (Kretzschmar et al. 1997, ont montré que la méthode d'injection continue favorise le colmatage du milieu poreux. Par contre la méthode par impulsion comparée à celle en continue, a beaucoup d'avantages :

- Très peu de particules sont introduites dans le milieu poreux
- L'effet de blocage est réduit au minimum
- La méthode par impulsion permet une meilleur correction de la ligne de base parceque la ligne de base est obtenue des deux cotés du pic de la courbe de restitution.

I.Application de la loi de Darcy pour les paramètres de montage :

I.1Variation de (h_1-h_2) en fonction du débit :

Dans le chapitre II § II.2.1 le montage expérimentale de Darcy montre les différents paramètres de la capacité d'écoulement dans une colonne au laboratoire. La figure (VI.1) montre la variation de la différence de charge en fonction du débit.



FIGURE(VI.1) : Différence de charge en fonction du débit

La figure (VI.1) montre que la différence de charge Δh augmente en fonction du débit d'alimentation, et encore plus rapidement quand le diamètre des grains est plus petit, ce qui indique que la taille des grains et le débit d'alimentation jouent un rôle significatif pour la différence de charge.

I.2 -Variation du gradient hydraulique en fonction de la vitesse'écoulement :

Dans les milieux poreux il est très important d'étudier la perméabilité du milieu, la signification physique du coefficient de proportionnalité dans la loi de Darcy appelé conductivité hydraulique K est déterminé dans la figure (VI.2).

Qui est la relation entre le flux d'écoulement et le gradient hydraulique, dont la gamme des vitesses utilisées est incluse dans l'intervalle de vitesse de Darcy compris entre 0.3 et 0.8 cm/s (toujours dans le régime laminaire).

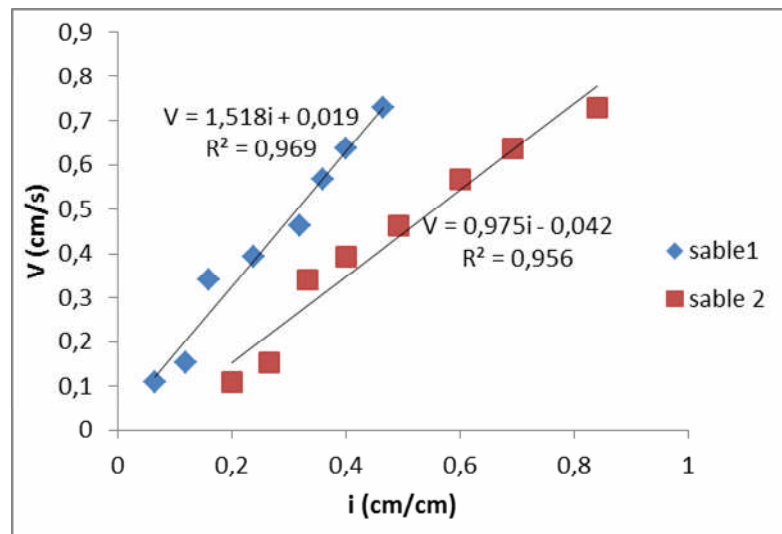


FIGURE (VI.2) : Vitesse de Darcy en fonction du gradient hydraulique

La figure (VI.2) montre nettement que le gradient hydraulique augmente en fonction de la vitesse d'écoulement ; la seule différence entre les deux courbes des deux types de sables est la pente. la relation linéaire entre le flux et le gradient hydraulique représente le coefficient de perméabilité K, elle est déduite par la tangente de l'angle. Il est nettement claire que le sable 1 est plus perméables que le sable 2. Les résultats calculés a partir des courbes sont indiqués ci-dessous :

-pour le sable1 : $V=K.I= 1,5.10^{-2}$ m/s

-pour le sable2 : $V= 9,7.10^{-3}$ m/s

II. L'Injection des particules en suspension :

Notre choix s'est porté sur la méthode d'injection par impulsion, une fois la colonne remplie horizontalement avec le matériau. On injecte notre suspension à l'aide d'une seringue, en réalisant des impulsions, Le volume injecté doit être beaucoup plus petit que le volume de la colonne ($V_{inj} \ll V_p$). Le fait de choisir un volume injecté beaucoup plus inférieur que le volume de pore, c'est d'éviter la perturbation de l'écoulement à l'intérieur du milieu poreux.

La concentration en particules injectées pour tous les essais est égale à 1 g/l, la concentration de la chaux injectée est de 1 g/l. Pour la conversion des turbidités que nous mesurerons en concentrations, nous avons établi la courbe d'étalonnage (FIG VI.3).

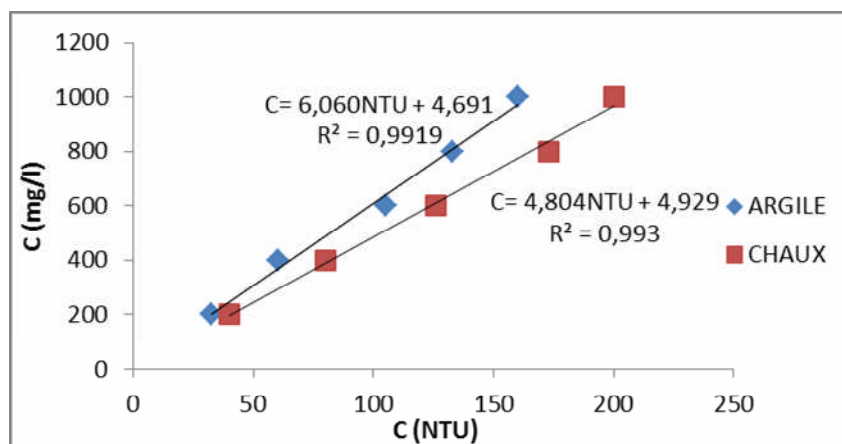


FIGURE (VI.3) : Concentration en (mg/l) en fonction de la turbidité en (NTU)

Les injections sont faites à plusieurs vitesses d'écoulement, par ordre décroissant, cette technique permet d'éviter toute dispersion des particules déjà déposées au cours des injections précédentes.

Le volume total de la colonne est obtenu en faisant le produit de la section par la hauteur de matériau :

$$V_t = L \times S \quad (VI.1)$$

avec :

L : longueur de matériau (m) (L= 60 cm)

S : section de la colonne (m²)

Le volume porale est le produit du volume total de la colonne avec la porosité du milieu.

$$V_p = V_t \times \omega \quad (\text{VI.2})$$

ω : La porosité du milieu.

Les résultats du volume injecté par rapport au volume du pore sont récapitulés dans le tableau suivant :

TABLEAU (VI.1) : Volume injectée par-rapport au volume de pore du milieu

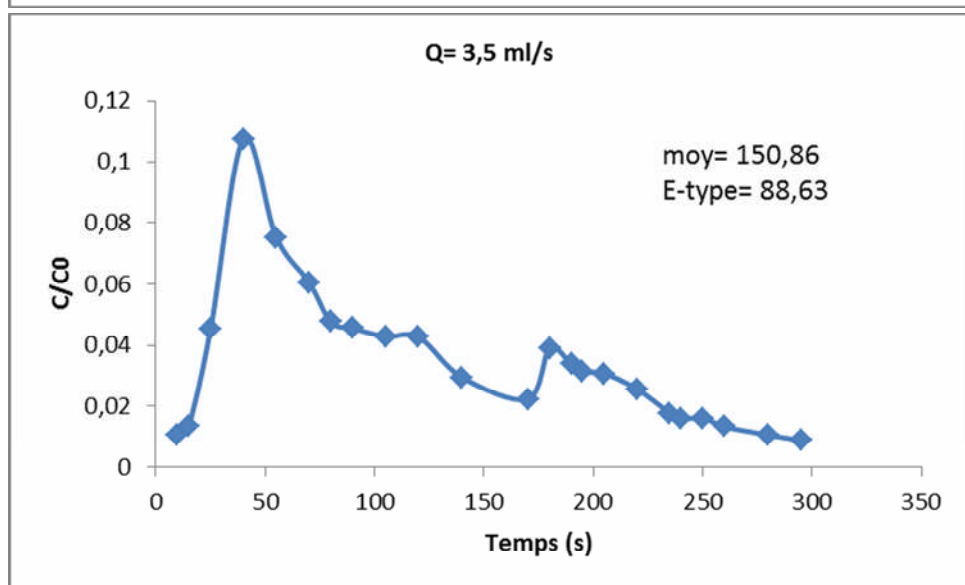
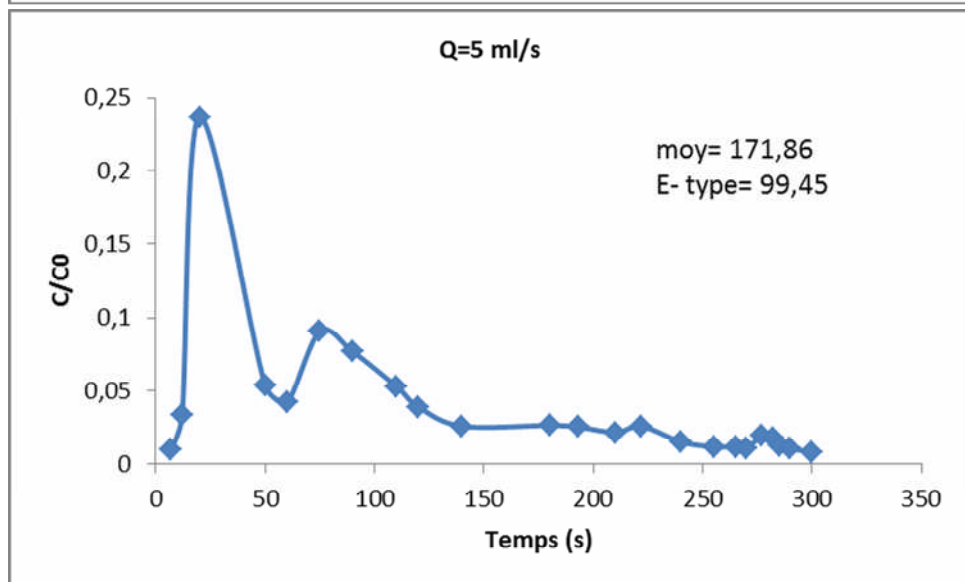
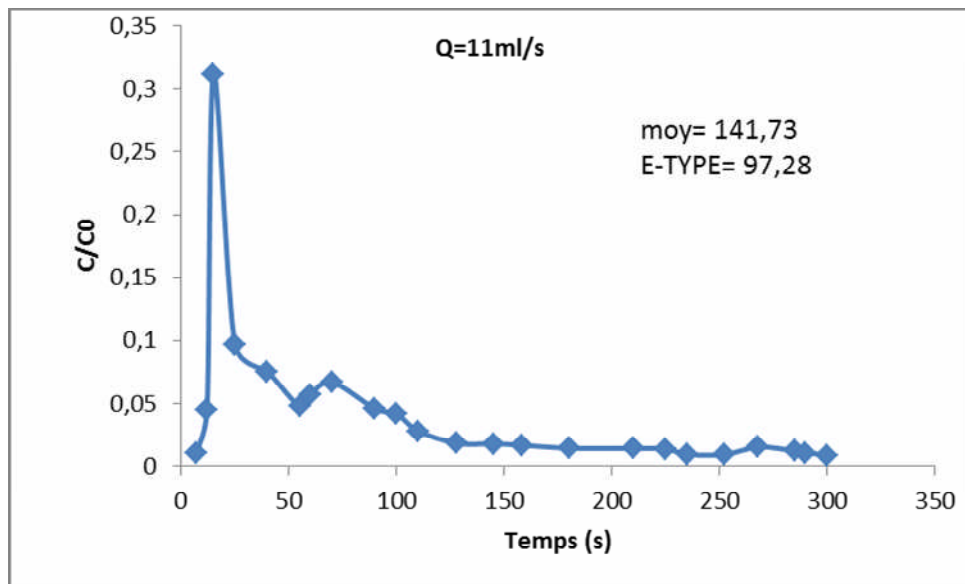
	SABLE 1			SABLE 2		
	$V_p(\text{ml})$	$V_{inj}(\text{ml})$	% V_p	$V_p(\text{ml})$	$V_{inj}(\text{ml})$	% V_p
Colonne (50mm)	530	5.5	1.03	447.45	5.5	1.23

III. Courbes de restitutions :

La réalisation des essais de transport en suspension et de traçage dans une colonne au laboratoire, permet d'étudier l'évolution de la propagation des matières suspendues et des traceurs dans les différents milieux poreux. Ces essais sont basés sur des méthodes qualitatives qui identifient les paramètres régissant les écoulements souterrains (vitesse effective des eaux, propriétés hydro dispersives).

Il s'agit d'injecter en amont de la colonne une concentration de la suspension argileuse, et La chaux. Sous l'effet de différentes vitesses d'écoulements qui sont en ordre décroissant, mais toujours dans le régime laminaire, la solution est récupérée à la sortie de la colonne, à une distance de 60cm à partir du point d'injection, et à différents temps de prélèvement.

Les courbes de restitution expérimentales que nous tracerons présentent l'évolution de la concentration réduite (concentration en sortie de colonne rapportée à la concentration d'injection) en fonction du temps. La restitution des argiles et de la chaux $C/C_0 = f(t)$ est présentée dans les figures (VI.4) a (VI.7) pour trois vitesses d'écoulement.



FIGURE(VI.4) : Courbes des restitutions d'injection instantanée des argiles dans le sable1

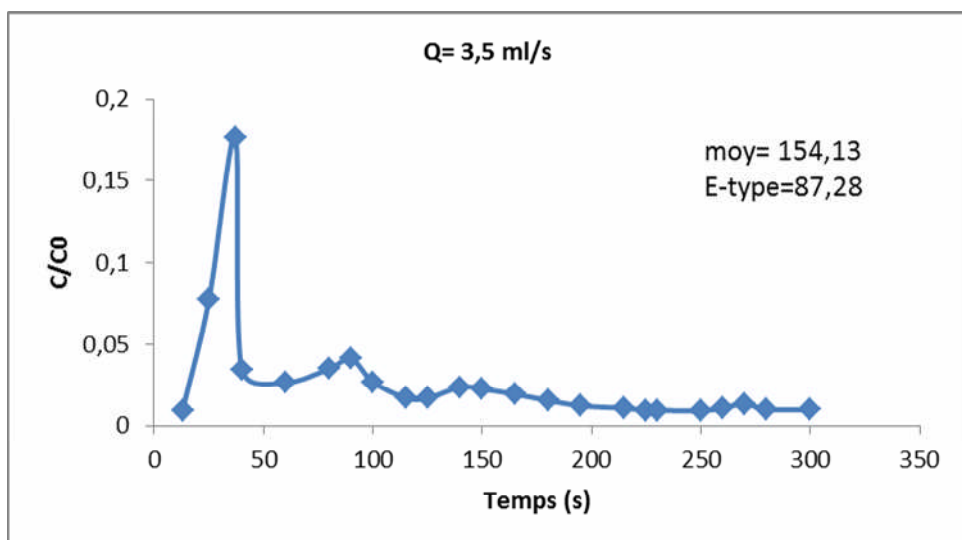
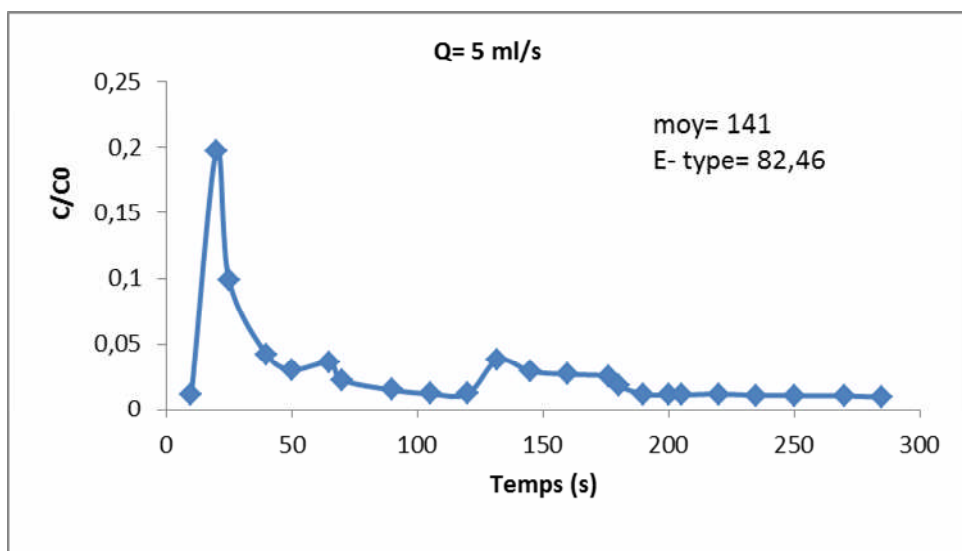
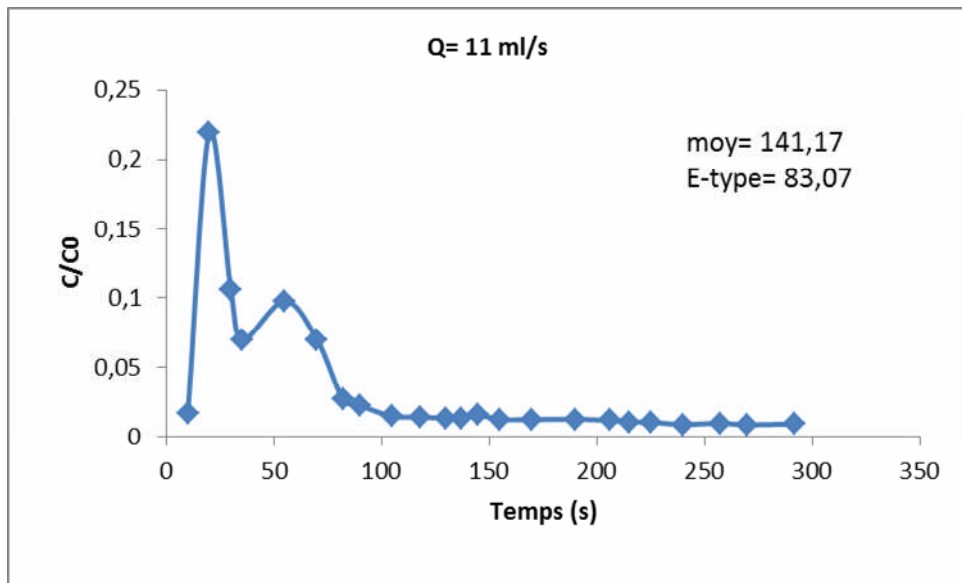


FIGURE (VI.5) : Courbes des restitutions d'injection instantanée des argiles dans le sable2

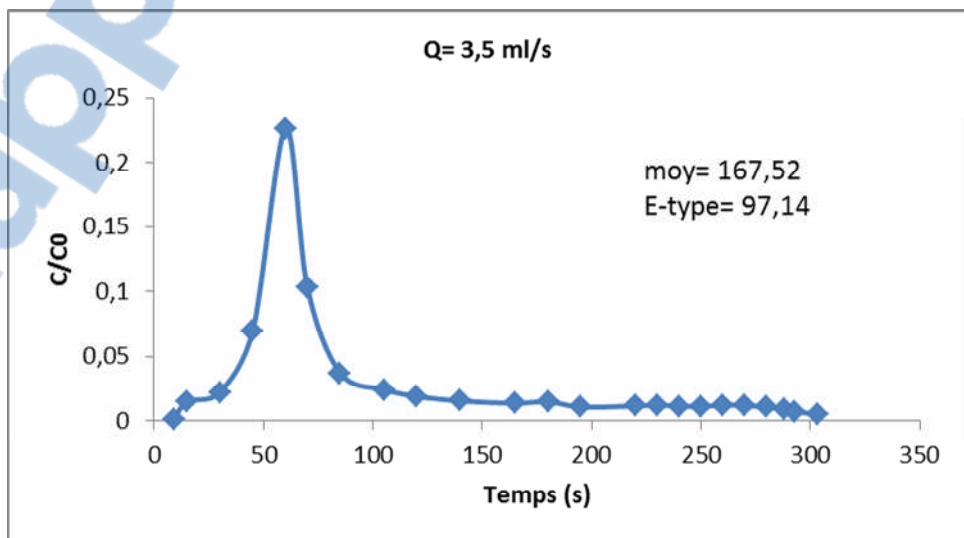
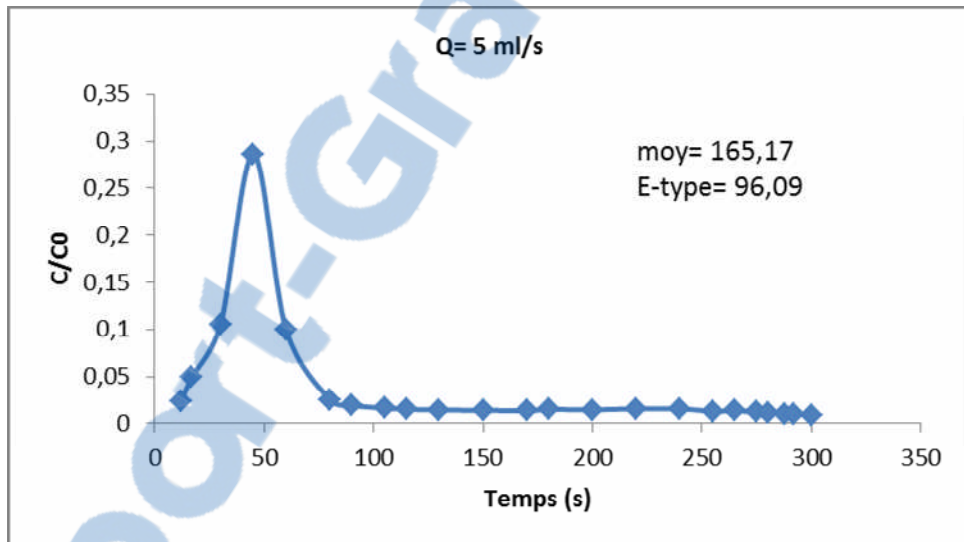
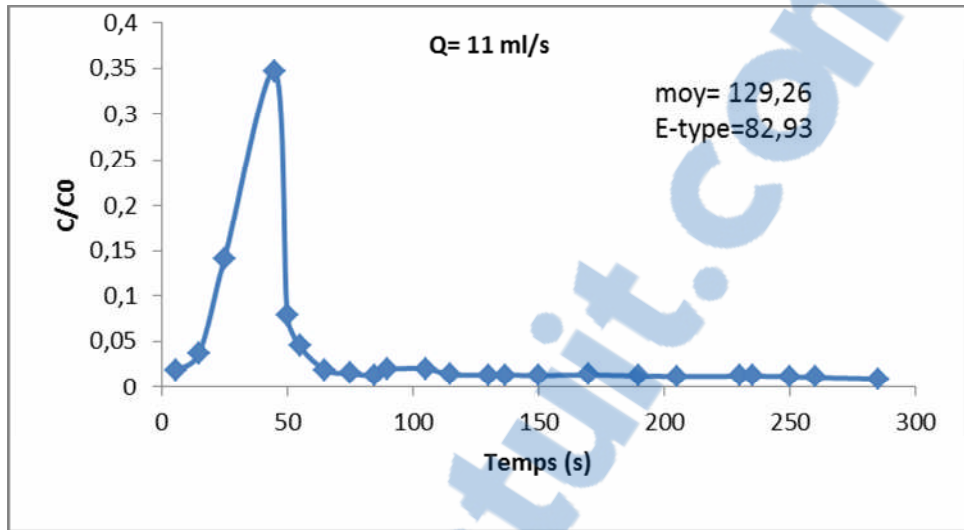


FIGURE (VI.6): Courbes des restitutions d'injection instantanée de la chaux dans le sable1

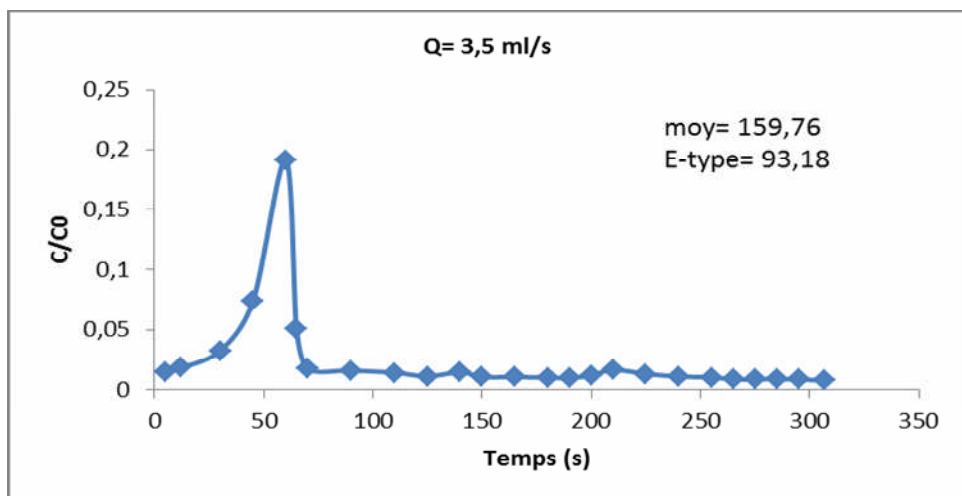
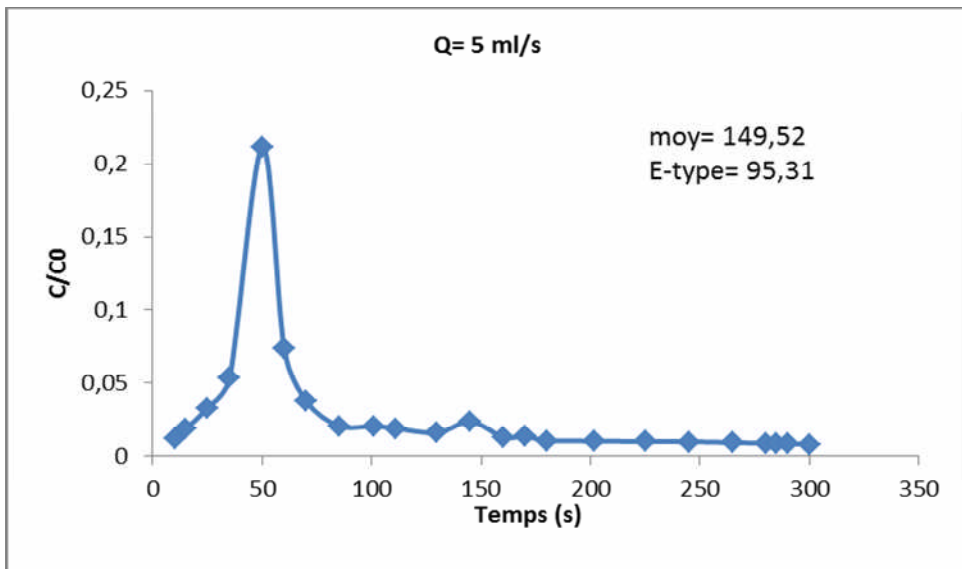
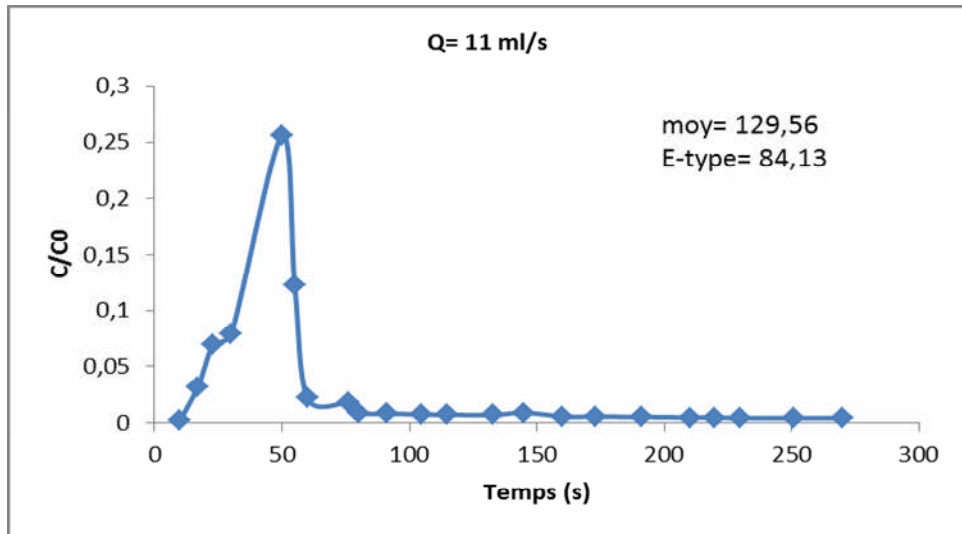


FIGURE (VI.7): Courbes des restitutions d'injection instantanée d dans le sable2

IV. Interprétation des courbes de restitution :

A partir des figures (VI.4) à (VI.7), on peut déduire les temps caractéristiques qui définissent les courbes de restitution :

TABLEAU (VI.2) : Temps caractéristiques des courbes de restitutions d'injection des argiles pour les deux milieux poreux

Débits d'alimentation (ml/s)	Sable (1)			Sable (2)		
	t_m	t_{pic}	t_f	t_m	t_{pic}	t_f
11	12	15	180	10	20	137
5	12	20	255	15	20	190
3,5	15	40	260	25	37	180

TABLEAU (VI.3) : Temps caractéristiques des courbes de restitutions d'injection de la chaux pour les deux milieux poreux

Débits d'alimentation (ml/s)	Sable (1)			Sable (2)		
	t_m	t_{pic}	t_f	t_m	t_{pic}	t_f
11	15	45	205	17	50	191
5	17	45	275	15	50	225
3,5	15	60	288	30	60	265

Les figures (VI.3) à (VI.6) présentent les courbes de restitutions dans le cas d'une injection instantanée des particules d'argiles, et de la chaux dans deux milieux poreux de granulométrie et caractéristiques physiques différentes. L'évolution de la concentration au point de récupération (sortie de la colonne), permet de déterminer les temps caractéristiques et les paramètres hydro dispersive d'un écoulement laminaire monodimensionnel.

Les temps d'arrivée des particules d'argiles sont légèrement inférieurs que celles de la chaux pour des mêmes vitesses d'écoulement. Car une partie de la chaux est dissoute ce qui conduit à l'adsorption, la diffusion moléculaire et la dispersion.

- La surface de la courbe de restitution augmente avec la vitesse d'écoulement, car cette dernière défavorise le dépôt des particules.
- La restitution du sable (1) est un peu plus importante que celle du sable (2), ce qui explique que la porosité joue un rôle significatif pour la vitesse d'écoulement et les phénomènes de la convection dispersion.

-Le sable2 homogène a une porosité inférieure à celle du sable1, cette caractéristique favorise l'interception directe particule-grain solide et aussi l'adsorption pour la chaux.

- On a remarqué des fluctuations au niveau des courbes de restitutions, ces dernières sont par défaut du mauvais arrangement des grains, et peut être au relargage de quelques matières en suspension qui se sont déposée lors des expériences précédentes.

Pour voir la quantité des matériaux restituées, nous avons tracé les figures (VI.8) qui montrent l'évolution temporelle des concentrations cumulées en fonction du temps des deux traceurs injectés, avec trois débits d'alimentation différents. A l'aide de ces courbes cumulées nous déduisons les taux de restitution de chaque traceur utilisé ; et les résultats sont induits dans le tableau (VI.4)

TABLEAU (VI.4) : Taux de restitution obtenue par la courbe des concentrations cumulées en fonction du temps

		SABLE1 (injection d'argile)	SABLE2 (injection d'argile)	SABLE1 (injection de la chaux)	SABLE2 (injection de la chaux)
Débit d'alimentation (ml/s)	11	98,45	81,09	90,34	78,22
	5	87,69	70,34	82,36	64,76
	3,5	78,63	63,29	75,57	60,24

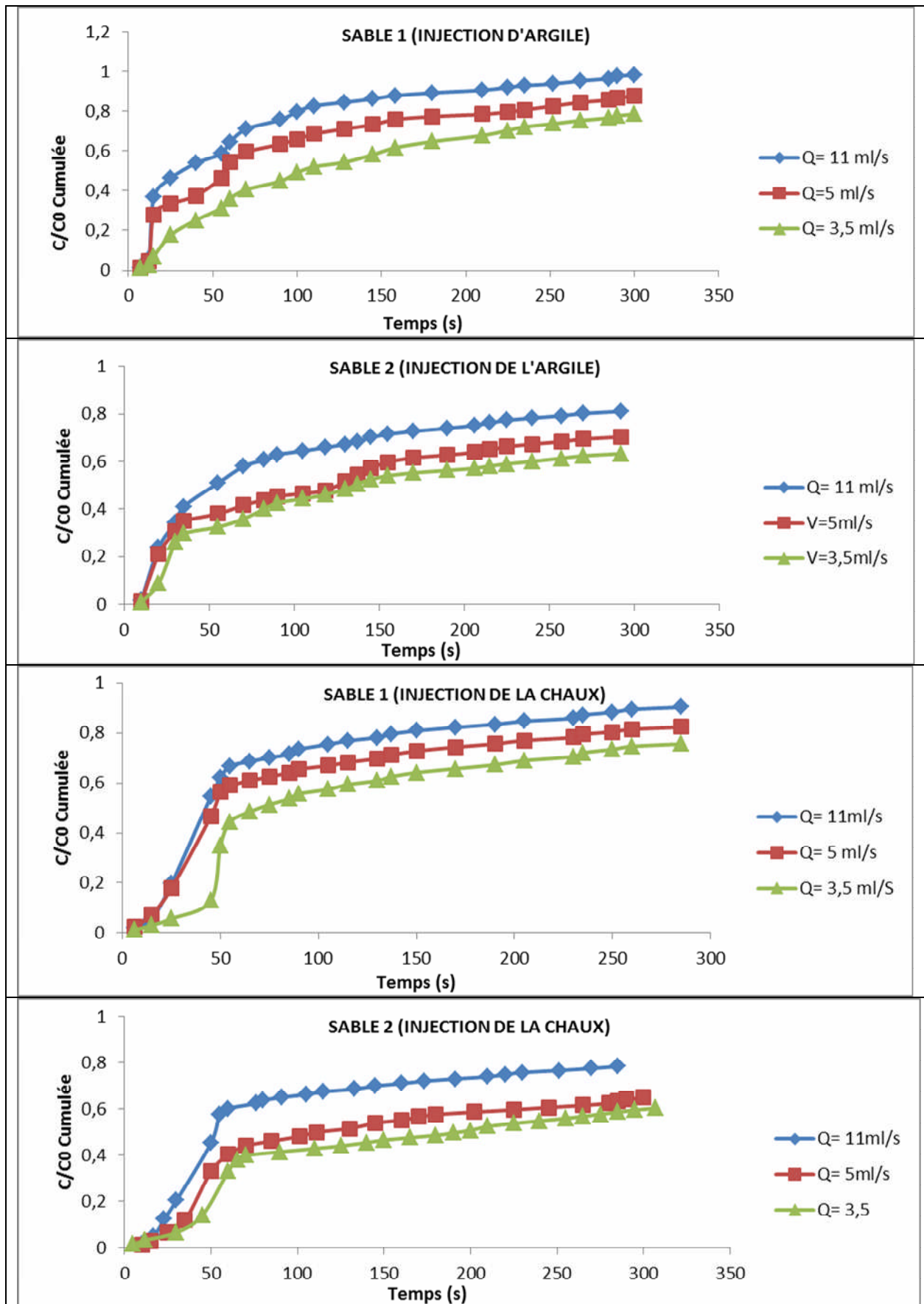


FIGURE (VI.8) : Concentrations cumulées en fonction du temps

Les résultats expérimentaux obtenus pour les traçages avec la suspension argileuse sont un peu différents de ceux obtenus pour les traçages avec la chaux:

- La concentration réduite atteinte au plateau des courbes de restitution n'est pas égale à 1, ce qui témoigne qu'une partie des colloïdes est retenue dans le milieu poreux.

- La valeur de la concentration réduite atteinte au plateau est d'autant plus faible que les débits sont faibles ; en termes de rétention, on peut dire que celle-ci est inversement proportionnelle au débit d'écoulement.

V. Calcul de la dispersion par la méthode dite « Ecart-type » (Fried et Combarous, 1971) :

Fried et Combarous (1971) montrent que le phénomène de dispersion des particules peut être traduit par une fonction à distribution normale. La méthode dite écart-type consiste à appliquer une méthode graphique de détermination de l'écart type de la loi de Gauss à la fonction erfc. (Yebdri 2008)

La loi de Gauss (ou la loi normale) est une loi de probabilité dont la densité est donnée par la relation :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right) \quad (\text{VI.3})$$

Ou, les deux paramètres caractéristiques sont :

m : Moyenne ;

σ : Ecart-type;

La fonction de répartition est l'intégrale de la densité de probabilité :

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y-m}{\sigma}\right)^2\right) dy \quad (\text{VI.4})$$

La courbe représentative de F(x) est une courbe symétrique par rapport au point (m ; 0,5), une propriété de cette fonction F est que les points (m + σ) et (m - σ) ont des ordonnées symétriques situées à 0,341 de part et d'autre de l'axe des ordonnées.

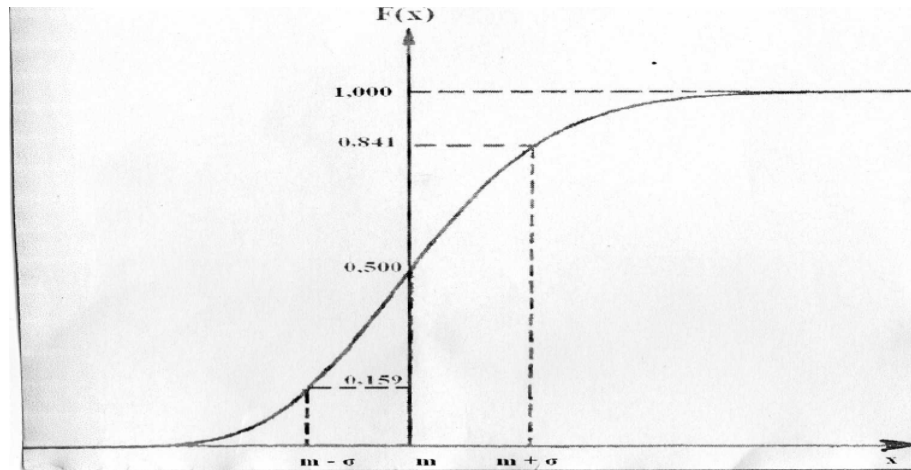


FIGURE (VI.9) : Représentation graphique de la fonction de répartition de la loi de Gauss. Avec m : moyenne et σ l'écart-type.

Détermination du coefficient de dispersion D :

Ne disposant que de la courbe cumulative (VI.9) en fonction de t pour un x fixé, on définit les valeurs $t_{0,841}$ et $t_{0,159}$ correspondant aux concentrations cumulées 0,841 et 0,159, on écrit :

$$\frac{x - ut_{0,841}}{\sqrt{2Dt_{0,841}}} - \frac{x - ut_{0,159}}{\sqrt{2Dt_{0,159}}} = 2 \quad (\text{VI.5})$$

D'où

$$D = \frac{1}{8} \left(\frac{x - ut_{0,841}}{\sqrt{t_{0,841}}} - \frac{x - ut_{0,159}}{\sqrt{t_{0,159}}} \right)^2 \quad (\text{VI.6})$$

TABLEAU (VI.5) : Détermination du coefficient de dispersion à partir de la méthode dite Ecart-type

		SABLE1 (injection d'argile)	SABLE2 (injection d'argile)	SABLE1 (injection de la chaux)	SABLE2 (injection de la chaux)
Vitesse d'écoulement (cm/s)	0,56	12,6	7,98	10,24	10,6
	0,25	3,64	4,05	3,74	5,09
	0,18	3,24	2,88	2,99	3,07

A partir des résultats obtenus par la méthode dite écart-type, en appliquant la relation (VI.6) on déduit que la dispersion longitudinal est proportionnel avec la vitesse d'écoulement.

Chapitre VI

Etude des paramètres hydro- dispersives

L'écoulement de l'eau ne dépend pas seulement du gradient hydraulique et de la perméabilité qui agissent sur la vitesse et le flux d'écoulement. Dans son déplacement, l'eau peut aussi entraîner des éléments sous forme dissoute comme les ions, les colloïdes les bactéries, et des éléments solides qui sont transportés en suspension. Le transfert et le transport de ces entités avec l'eau résulte d'un ensemble de phénomènes physiques convection et dispersion, et chimiques comme la diffusion moléculaire.

Les méthodes que nous allons présenter, dites méthodes analytiques sont basées sur les solutions analytiques de l'équation de convection dispersion (VII.3) en écoulement monodimensionnel. Dans ce chapitre, nous exposerons les cas de traçages avec les particules en suspension et de traceur conservatif par injection instantanée. La quantité des particules en suspension injectée est particulièrement faible pour que le dépôt des particules ne modifie pratiquement pas la porosité (perméabilité) du milieu et le relargage est négligeable.

I. Identification des paramètres de transport et de traçage :

Le transport des particules dans un milieu poreux homogène avec un écoulement monodimensionnel uniforme est décrit par l'équation de convection-dispersion avec une cinétique de dépôt du premier ordre :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} - K_{dep} C \quad (VII.1)$$

Les conditions initiales aux limites s'écrivent :

$$C(t=0, x) = 0$$

$$C(t, x=0) = m/Q \cdot \delta(t) \quad (VII.2)$$

$$C(t, x=\infty) = 0$$

Où $\delta(t)$ est une fonction de type Dirac en temps $[T^{-1}]$, Q le débit d'écoulement $[L^3 T^{-1}]$; m la masse du traceur injectée $[M]$ qui est calculée par : $m = C_0 V_{inj}$

C_0 étant la concentration et V_{inj} le volume de la solution du traceur injectée. La dernière condition aux limites ($C(t, x=\infty)=0$), valable pour un milieu semi-infini n'étant pas réaliste dans notre cas.

La solution analytique de l'équation (I.36) avec les conditions initiales aux limites est donnée par (Wang et al ; 2000) :

$$C(t,x) = \frac{m_0}{Q\sqrt{4\pi D_L t}} \exp(-K_{dep} t) \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{4D_L t}\right) \quad (VII.3)$$

Pour une distance L fixée entre le point d'injection et le point d'observation et en définissant, le nombre de pécelet $P_e = uL/D_L = L/\alpha_L$; ainsi que le temps de transfert par convection pur $t_c = L/u$ l'équation (VII.3) s'écrit :

$$C(t) = \frac{m}{Q} \sqrt{\frac{P_e t_c}{4\pi t^3}} \exp(-K_{dep} t) \exp\left(-\frac{P_e}{4t_c} \frac{(t_c - t)^2}{t}\right) \quad (VII.4)$$

Pour l'interprétation de l'équation (VII.4) des courbes de restitution de traçage, il existe des méthodes analytiques dont on va citer quelques unes dans ce qui suit :

I.1 Méthode des moments :

Nous présentons une méthode de détermination des paramètres hydro dispersives à partir des expressions de divers temps caractéristiques, et paramètres statistiques de transfert présentées au chapitre 3 §3 que l'on qualifie de «Méthode des Moments».

Par définition, le moment d'ordre n de la courbe de restitution par rapport au temps s'écrit:

$$m_n = \int_0^{\infty} C(t) \cdot t^n dt \quad (VII.5)$$

Soit :

Le moment d'ordre 0 :
$$m_0 = \int_0^{\infty} C(t) dt = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{C_{i+1} + C_i}{2} (t_{i+1} - t_i) \right)$$
 (VII.6)

Le moment d'ordre 1 :
$$m_1 = \int_0^{\infty} t \cdot C(t) dt = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{t_{i+1} C_{i+1} + t_i C_i}{2} (t_{i+1} - t_i) \right)$$
 (VII.7)

Le moment d'ordre 2 :
$$m_2 = \int_0^{\infty} t^2 \cdot C(t) dt = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{t_{i+1}^2 C_{i+1} + t_i^2 C_i}{2} (t_{i+1} - t_i) \right)$$
 (VII.8)

Le taux de restitution de la masse injectée(R) au point x=L, le temps de résidence moyen (\bar{t}) et la variance réduite (σ_R^2) s'écrivent:

$$R = \frac{\int_0^{\infty} Q \cdot C(t) \cdot dt}{m} = \frac{Q}{m} m_0 \quad (\text{VII.9})$$

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot C(t) \cdot dt}{\int_0^{\infty} C(t) \cdot dt} = \frac{m_1}{m_0} \quad (\text{VII.10})$$

$$\sigma_R^2 = \frac{\int_0^{\infty} \left(\frac{t-\bar{t}}{\bar{t}}\right)^2 C(t) \cdot dt}{\int_0^{\infty} C(t) \cdot dt} = \frac{m_2 m_0}{m_1^2} - 1 \quad (\text{VII.11})$$

Ces trois paramètres statistiques peuvent être calculés expérimentalement par les formules précédentes.

Wang et al (2000) ont donné les différentes expressions théoriques de ces paramètres en appliquant l'intégrale sur la solution analytique (VII.4)

$$R = \exp\left(\frac{P_e}{2} (1 - \beta)\right) \quad (\text{VII.12})$$

$$\bar{t} = \frac{t_c}{\beta} \quad (\text{VII.13})$$

$$\sigma_R^2 = \frac{2}{P_e \beta} \quad (\text{VII.14})$$

Avec :

$$\beta = \sqrt{1 + \frac{4K_{dep} t_c}{P_e}} \quad (\text{VII.15})$$

Les équations (VII.12), (VII.13), (VII.14) permettent de déterminer les trois paramètres (P_e , t_c et K_{dep}):

$$P_e = \frac{2}{\sigma_R^2} + 2 \ln(R) \quad (\text{VII.16})$$

$$t_c = \bar{t} (1 + \sigma_R^2 \cdot \ln R) \quad (\text{VII.17})$$

$$K_{dep} = -\frac{\ln R}{\bar{t}} \left(1 + \frac{\sigma_R^2}{2} \ln R\right) \quad (\text{VII.18})$$

Généralement la valeur de $\ln \frac{\sigma_R^2}{2} \ln R$ est très faible devant 1, et donc souvent négligée.

On Déduire alors:

$$K_{dep} = -\frac{\ln R}{\tau} \quad (\text{VII.19})$$

Pour un traceur parfait ($K_{dep}=0$, $\beta =1$, $R=1$), on a donc :

$$P_e = \frac{2}{\sigma_R^2} \quad (\text{VII.20})$$

$$t_c = \bar{t} \quad (\text{VII.21})$$

I.2 Méthode graphique linéaire (MGL) :

La méthode graphique linéaire (Wang, 1987) a été conçue pour les traceurs dissous. Elle est étendue (Wang, 2001) au cas des traceurs particulaires avec la cinétique de dépôt du premier ordre. L'écriture de l'équation (VII.4) sous forme adimensionnelle donne l'équation suivante:

$$C(t) = \sqrt{\frac{P_e t_c}{4\pi t^3}} \exp\left(-K_{dep} t - \frac{P_e}{4t_c} \frac{(t_c - t)^2}{\tau}\right) \quad (\text{VII.22})$$

Le principe de cette méthode consiste à transformer la solution analytique (VII.22) en une équation de type $H = cx + a$ dont les variables a et c dépendent des paramètres de transport. Pour cela, on prend le logarithme népérien (\ln) sur l'équation (VII.22) :

$$\ln(C.t^{1.5}) = \ln\left(\sqrt{\frac{P_e t_c}{4\pi}}\right) - K_{dep} t - \frac{P_e}{4t_c} \frac{(t_c - t)^2}{\tau} \quad (\text{VII.23})$$

En posant :

$$H = \ln(C.t^{1.5}) \quad (\text{VII.24})$$

On obtient :

$$H = -\left(K_{dep} + \frac{P_e}{4t_c}\right).t + \frac{1}{2}\left(P_e + \ln \frac{P_e t_c}{4\pi}\right) - \frac{P_e t_c}{4} \frac{1}{t} \quad (\text{VII.25})$$

En dérivant l'équation (VII.34) par rapport à t , on obtient :

$$H = cX + a \quad (\text{VII.26})$$

D'où :

$$X = \frac{1}{t^2} \quad (\text{VII.26})$$

$$a = -(K_{dep} + \frac{P_e}{4t_c}) \quad (\text{VII.27})$$

$$c = \frac{P_e t_c}{4} \quad (\text{VII.28})$$

On obtient une équation linéaire entre X et H. Les valeurs de données peuvent être calculées à partir des données expérimentales de la façon suivante :

$$X_{i+1/2} = \frac{1}{t_i t_{i+1}} \quad (\text{VII.30})$$

$$H_{i+1/2} = \frac{\ln(C.t^{2.5})_{i+1} - \ln(C.t^{2.5})_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (\text{VII.31})$$

En utilisant la régression linéaire entre X et H. On peut déterminer les deux valeurs de **a** et **c**. Connaissant a, c et le taux de restitution **R** (VII.9), nous déduisons **Pe**, **tc** et **K_{dep}** Comme suit:

$$P_e = 4\sqrt{-c.a} + 2\ln R \quad (\text{VII.32})$$

$$t_c = 4c/P_e \quad (\text{VII.33})$$

$$K_{dep} = -\frac{\ln R}{t_c} \left(1 - \frac{\ln R}{P_e}\right) \quad (\text{VII.34})$$

Avec $\alpha_L = x/P_e$

Pour un traceur dissous parfait, le phénomène de dépôt n'intervient pas (**K_{dep}**=0, **R**=1 et **InR**=0). D'après les valeurs de a et c, on calcule **Pe** et **tc** de la façon suivante:

$$P_e = 4\sqrt{-c.a} \quad (\text{VII.35})$$

$$t_c = \sqrt{-c/a} \quad (\text{VII.36})$$

II. Résolution de l'équation convection-dispersion :

La résolution de l'équation (VII.1) à partir des méthodes citées auparavant sont dans les tableaux (VII.1) et (VII.2) :

II.1 Résolution avec la méthode des moments :

Cette méthode est utilisée en appliquant les formules (VII.9);(VII.10);(VII.11); (VII.16);(VII.17); (VII.18) tout en déterminant les moments des différents ordres ; dont les résultats sont donnés dans le tableau (Voir annexes, tableau 1). A partir de ce tableau nous avons calculé les paramètres hydrodispersives, représentées dans le tableau (VII.1).

TABLEAU (VII.1) : Description des paramètres hydrodispersives à partir de la méthode des moments

	Débits d'alimentation (ml/s)	\bar{E} (s)	t_c (s)	R(%)	σ_R^2	P_e	K_{dep} (1/h)	D_L (cm ² /s)
Sable(1)	11	82,46	81,42	98,45	0,8	2,46	0,68	13,65
	5	89,61	81,6	87,69	0,68	2,53	5,31	5,92
ARGILE	3,5	114,05	104,23	78,63	0,358	5,1	7,26	2,12
Sable(2) ARGILE	11	74,69	63,15	81,09	0,79	2,13	10,41	15,77
	5	93,02	71,42	70,34	0,66	2,32	12,03	6,46
	3,5	102,97	76,61	63,29	0,56	2,65	14,07	4,07
Sable(1) Chaux	11	73,72	67,65	90,34	0,81	2,26	4,8	14,86
	5	83,43	71,61	82,36	0,73	2,35	7,78	6,38
	3,5	106,14	92,19	75,57	0,47	3,69	8,88	2,92
Sable(2) Chaux	11	78,64	65,43	78,22	0,699	2,36	14,67	14,23
	5	92,91	69,96	64,76	0,57	2,63	15,18	5,7
	3,5	101,46	71,73	60,24	0,58	2,43	15,56	4,44

II.2 Résolution par la méthode graphique linéaire (WANG 2001) :

En appliquant les expressions (VII.32);(VII.33) et (VII.34) indiquées et après traçage des droites Figures (VII.1) et (VII.2) pour chaque vitesse d'écoulements, nous obtenons le tableau (VII.2) dont les résultats sont récapitulées pour les deux traceurs.

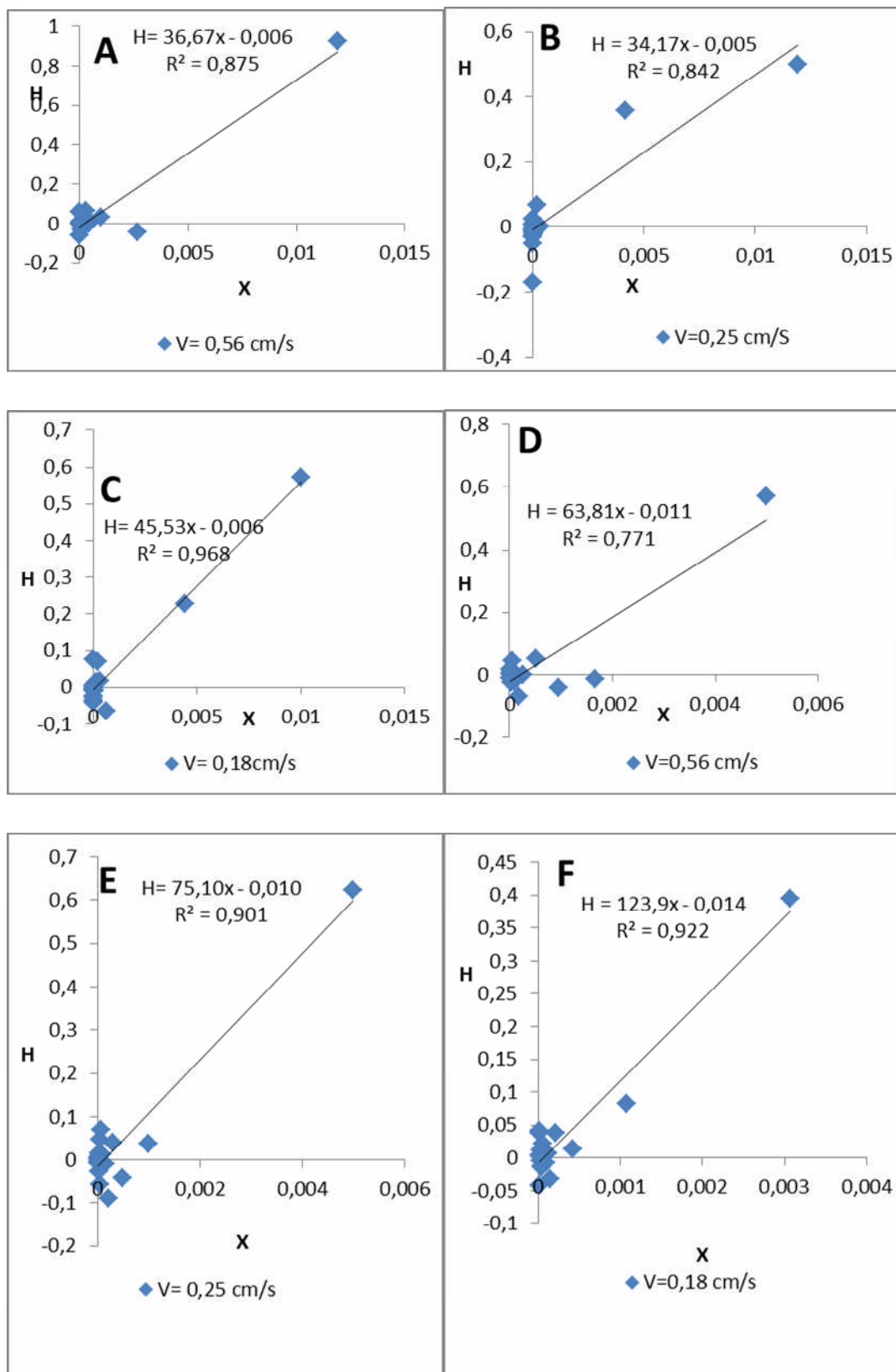


FIGURE (VII.1) : Représentation graphique des droites de (WANG 2001) :(A,B,C) Injection des argiles Sable1; (D,E,F) Injection des argiles Sable2

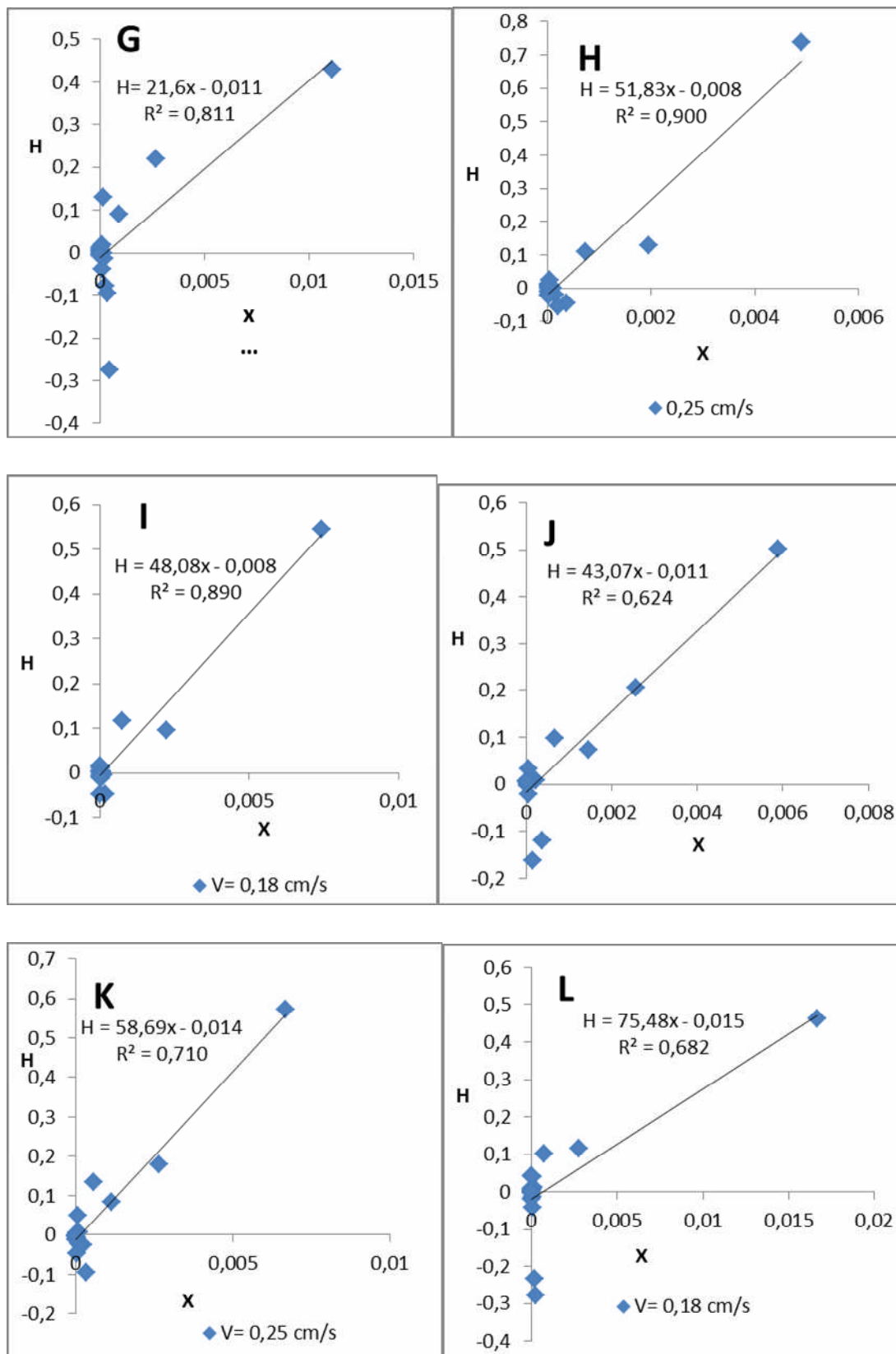


FIGURE (VII.2) : Représentation graphique des droites de (WANG 2001) :(G,H,I) Injection de la chaux Sable1; (J,K,L) Injection de la chaux Sable2

TABLEAU (VII.2) : Description des paramètres hydro dispersives a partir de la méthode graphique linéaire

	Q (l/s)	t _c = (s)	R(%)	P _e	K _{dep} (1/h)	D _L (cm ² /s)
Sable(1) ARGILE	11	80,21	98,45	1,83	0,7	18,38
	5	98,27	87,69	1,39	5,28	10,71
	3,5	113,12	78,63	1,6	8,81	6,75
Sable(2) ARGILE	11	86,39	81,09	2,95	8,86	11,38
	5	108,58	70,34	2,76	13,22	5,43
	3,5	113,9	63,29	4,35	15,97	2,51
Sable(1) Chaux	11	49,46	90,34	1,76	7,82	19,09
	5	94,89	82,36	2,19	8	6,84
	3,5	100,16	75,57	1,92	11,55	5,62
Sable(2) Chaux	11	76,04	78,22	2,25	12,90	14,93
	5	85,15	64,76	2,75	21,3	5,45
	3,5	93,12	60,24	3,24	22,65	3,33

III. Interprétation et comparaison des résultats :

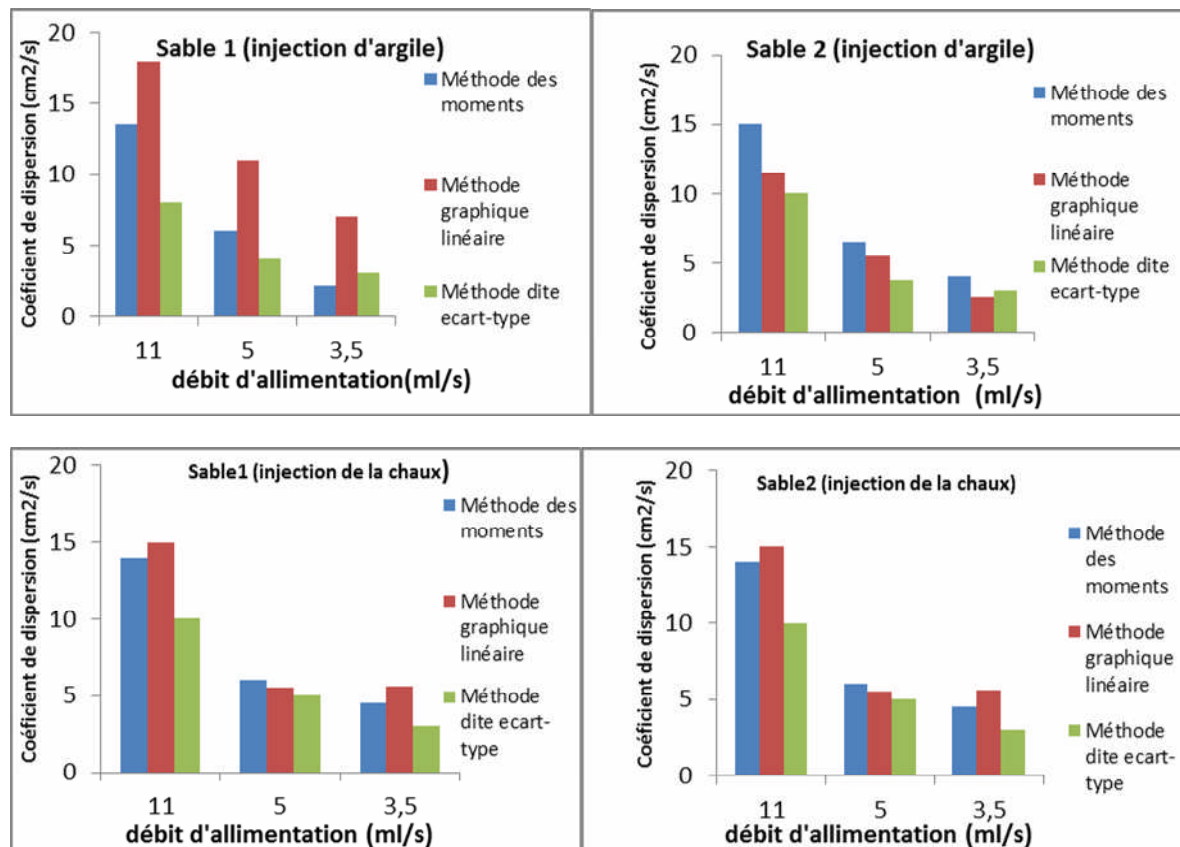


FIGURE (VII.3): Comparaison schématique du coefficient de dispersion obtenue par les trois méthodes en fonction du débit d'alimentation

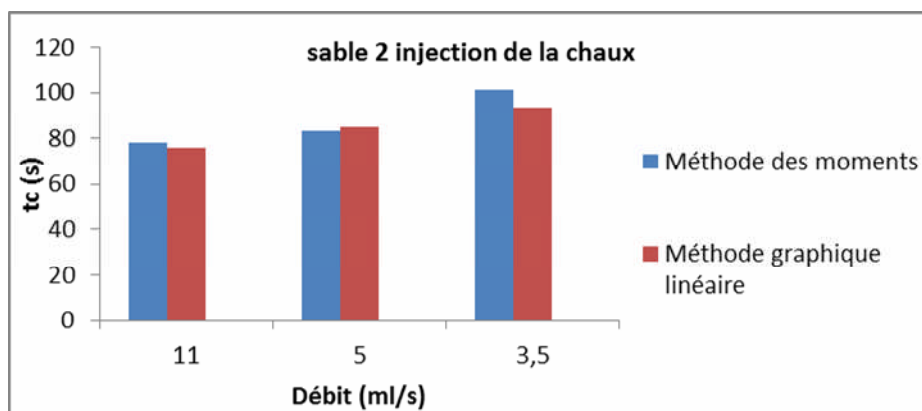
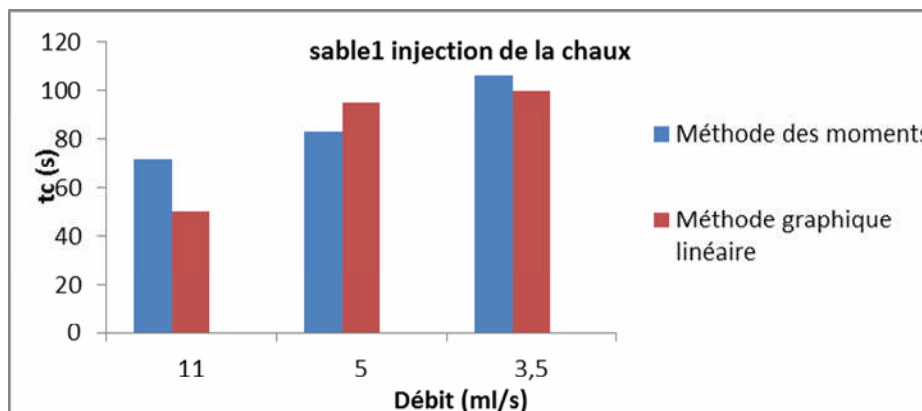
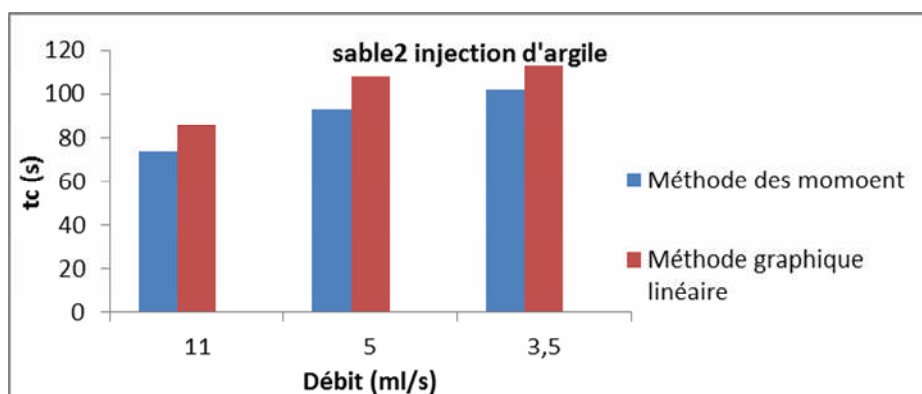
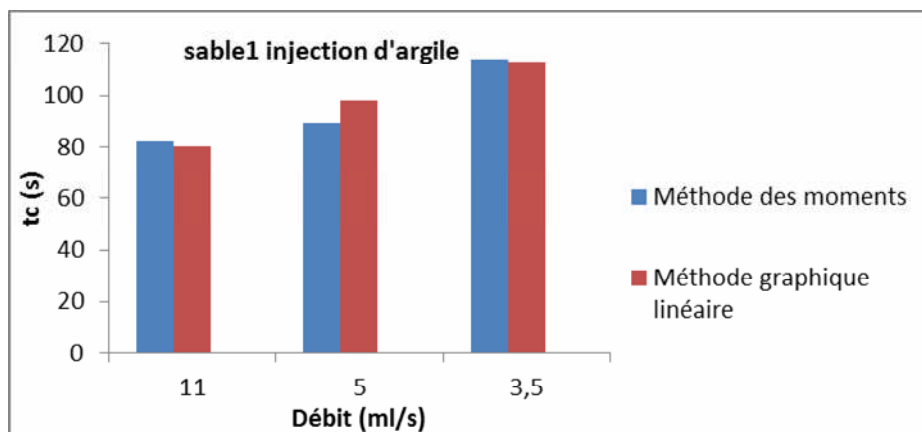


FIGURE (VII.4): Comparaison schématique du temps de transfert obtenue par les trois méthodes en fonction du débit d'alimentation

Les graphes de la figure (VII.3) montrent l'évolution du coefficient de dispersion longitudinal, en fonction du débit d'alimentation. Ce coefficient varie proportionnellement avec la vitesse d'alimentation ; il augmente lorsque la vitesse augmente ceci explique que la vitesse favorise la dispersion du traceur et des particules dans le milieu poreux.

Le nombre de pécelet joue un rôle important pour définir les paramètres hydro dispersives du milieu, mais dans notre expérience ce nombre n'est pas trop variable, il y a quelque valeurs qui sont différentes des autres, on peu dire que le Pe est constant avec la vitesse d'écoulement. Cela revient probablement aux erreurs de lectures qui sont dues :

1) Le mauvais rinçage du turbidimètre, après plusieurs lectures successives.

2) Le temps que prend le turbidimètre pour donner une lecture, des décantations de particules, peuvent avoir lieux diminuant ainsi la valeur de la turbidité.

Nos deux milieux poreux, ont une perméabilité importante ce qui fait que la restitution est très rapide. Le coefficient de la cinétique de dépôt varie inversement avec la vitesse d'écoulement, on conclue donc que la vitesse joue un rôle majeur dans la cinétique de dépôt.

Les figures (VII.4) qui présentent le temps de transfert par convection pur ou le temps de résidence en fonction du débit d'alimentation montre que, les résultats requis par les deux méthodes sont proches et elles indiquent toutes que le temps moyen est inversement proportionnel à la vitesse d'écoulement.

Conclusion générale

L'étude du transport de l'argile et de la chaux dans un milieu poreux saturé, à travers cette expérience dans une colonne au laboratoire, a permis d'établir des particularités propres aux deux types de sable (courbes granulométriques), ainsi que pour chaque traceur. Les essais sont effectués avec des vitesses qui dépassent celles qui sont dans les milieux naturels, tout en restant dans le domaine de Darcy pour que sa loi reste applicable. Nous avons travaillé en régime laminaire, les nombres de Reynolds calculés sont inférieurs à 10.

Cette étude a permis de montrer que les caractéristiques physiques du milieu poreux ont un rôle important dans la restitution des traceurs. La perméabilité, la porosité et la vitesse d'écoulement, sont des paramètres qui en premier lieu favorisent le passage et/ou le colmatage, l'agglomération (rétention) ou le relargage (dispersion).

Les injections instantanées effectuées séparément avec les matières en suspension (argiles et la chaux) pour les différentes vitesses d'écoulement ont montré un petit déphasage entre la restitution de la chaux et les particules d'argile. Les d'argiles sont transportées plus rapidement que la chaux (on remarque ce phénomène dans les temps d'arrivées de la courbe de restitution).

La vitesse d'écoulement est le paramètre le plus important dans cette étude, en effet la vitesse influe sur beaucoup de paramètres.

- Le taux de restitution augmente avec la vitesse d'écoulement, plus particulièrement pour les faibles vitesses, pour les argiles, l'effet des forces hydrodynamiques (l'influence de la force de gravité) les particules d'argiles sont entraînées vers le fond de la colonne ce qui fait réduire le taux de restitution. L'effet de la densité des particules d'argiles supérieur à celle de l'eau. Concernant la chaux la variation de la vitesse n'a pas de grande influence sur le taux de restitution la chaux est partiellement soluble et donnerait une densité voisine de celle de l'eau, aussi lorsque la vitesse diminue la restitution diminue, une partie de la chaux serait adsorbée par les grains de sable.

- Le coefficient de dispersion D_L augmente avec la vitesse d'écoulement de l'eau, les valeurs obtenues pour les deux suspensions sont proches.

- La rétention et/ou le dépôt des particules dans le milieu poreux est caractérisée par le coefficient cinétique de dépôt. Ce coefficient augmente lorsque la vitesse d'écoulement diminue.

Le dépôt et la rétention des particules sont essentiellement influencés par la vitesse d'écoulement, et par la porosité du milieu. Il existe toutefois d'autres paramètres aussi importants tels que la forme des grains et de la rugosité de leurs surfaces, qui agissent sur la capacité d'attraction de la rétention et de l'adsorption. On a déduit ces caractéristiques à partir

des taux de restitution obtenue pour les mêmes vitesses d'écoulement et la même masse des particules en suspension injectée dans les deux sables. La porosité et la tortuosité joue un rôle significatif pour le transport et le dépôt des particules dans un milieu poreux saturé, car plus la tortuosité est importante plus le dépôt et la rétention sont importants, ce qui implique la régression du taux de restitution.

Les paramètres hydro-dispersives calculés par les deux méthodes, sont basés sur la valeur du nombre de Peclet, le temps de transfert, et le dépôt.

Cette étude a permis de réaliser une modélisation analytique simple pour le transport et le dépôt de particules en suspension dans un milieu poreux saturé. Les paramètres hydrauliques, géométriques et physiques influent sur le transfert et la rétention des particules solides.

Perspectives :

Les perspectives portées à cette étude concernent principalement l'approche expérimentale,

Qui n'a été menée que sur trois vitesses d'écoulement relativement peu étendue, et une seule colonne expérimentale avec des matériaux naturels. Pour pouvoir maîtriser les mécanismes associés à ces phénomènes, il serait intéressant que certains aspects soient développés, notamment :

- Elargir la gamme des vitesses.

- Utiliser différentes colonnes expérimentales de diamètres et longueurs variables, ces derniers sont des paramètres géométriques importantes pour l'étude de l'évolution de la dispersion et le dépôt.

- La caractérisation de la surface des grains du milieu poreux, on peut approfondir nos recherches avec un matériau industrielle (exemple les billes de verre) pour une homogénéisation total du milieu, et avec une rugosité qui est au voisinage de 0 donnent certainement des résultats différents que dans un milieu naturel.

- La variation de la taille des particules en suspension.

Références bibliographiques:

A. Alem, S. Alhaddad, A. Benamar, H. Wang 2003: Migration des particules en suspension dans un milieu poreux (Erosion interne). XXIV^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil. Le Havre. P 1-8.

A. Beaudoin, J.R. De Dreuzy, J. Erhel 2008: Dispersion dans les milieux hétérogènes. XXVI^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil, 4 au 6 juin, Nancy.

Ahfir, N-D. 2006. Etude des mécanismes de transport et de la cinétique de dépôt des particules en suspension dans un milieu poreux saturé. Thèse de doctorat, université Du Havre.

Ahfir, N-D. H-Q, Wang. A, Benamar. A, Alem. 2007. Transport and deposition of suspended particle in saturated porous media. Hydrodynamic effect. Hydrogeology journal, 15, P 659-668.

Ahfir, N-D. A, Benamar. A, Alem. H-Q, Wang. 2009. Influence of internal structure and medium length on transport and deposition of suspended particles. A laboratory study. Transp porous med, 76, P 289-307.

A Musy. 2004. Hydrologie. Une science de la nature 1. Presses polytechnique et universitaire Romandes, Paris, ISBN 2-88074-546-2.

Benamar, A., HQ. Wang, N-D. Ahfir, A. Alem, N. Massei, J-P. Dupont. 2005. Effets de la vitesse d'écoulement sur le transport et la cinétique de dépôt de particules en suspension en milieu poreux saturé. C. R. Geoscience, 337, 497-504

Benamar, A., A, Alem. N-D, Ahfir. H-Q, Wang. 2006. Contribution du transport des particules en suspension à l'érosion des sols. AUGC, 8P.

Ba Bocar. 2002. Etude du comportement hydrodynamique d'un milieu poreux sur banc d'essai au laboratoire. Mémoire d'ingénieur, université Tlemcen, 77P.

Beddiaf A, Glaoui H. 2008. Filtration par sable sur pilote au laboratoire. Mémoire d'ingénieur, université Tlemcen, 76P.

Bendahmane, F., D., Marot, A., Alexis, P. Thomas. 2004. Etude expérimentale de l'évolution par érosion interne des matériaux d'ouvrage hydraulique en terre. XXIIèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil-Ville & Génie Civil, Marne-la-Vallée les 3 & 4 juin, Paris.

Bouanani, R. Bourek, R. 2007. Etude des écoulements dans un milieu poreux sur banc d'essai au laboratoire. Mémoire d'ingénieur, université Tlemcen, 69P.

Bradford, S. A., M. Bettahar. 2006. Concentration dependent transport of colloids in saturated porous media. Journal of Contaminant Hydrology, 82, P 99-117

Bear, J. 1972. Dynamics of fluids in porous media. Dover publications, INC. New York.

Bruno, M. 2004. Transport non réactif en milieux hétérogènes. Expériences et théories. Mémoire DEA, école des mines Paris, 46P.

Castany Gilbert. 1982. Hydrogéologie. Principes et methods. DUNOD, Paris, ISBN 2-10-004171-1

Charlotte, M. 2000. Transport de soluté et de particules argileuse colloïdales dans un milieu poreux saturé à double porosité. Mémoire DEA, école des mines Paris, 51P.

Coussy, O. 1991. Mécanique des milieux poreux. TECHNIP, Paris, ISBN 2-7108-0595-2.

Daniel Cordary. 1994. Mécanique des sols. Lavoisier-Tec & Doc, ISBN 2-85206-987-3.

Daniel, Grolimund. Kurt, Barmettler. Michal, Borkovec. 2001. Release and transport of Colloidal particles in natural porous media, American Geophysical Union, 37, P571-582.

Delay, F., Porel, G., de Marsily, G. 1997. Predicting solute transport in heterogeneous media from results obtained in homogeneous ones : an experimental approach. Journal of Contaminant Hydrology, 25, P63-84.

De Marsily G. 1986. Quantitative hydrogeology. Groundwater hydrology for ingineers. Academic Press, INC, New York.

Deb P, Jaisi. Navid B, Saleh. Ruth E, Blake. And M, Elimelech. 2008. Transport of single-Walled carbon nanotubes in porous media. Filtration mecanisme and reversibility, Environ, Sci, Technol, New- Haven, 42, P8317-8323.

Dorra, Hamami, Gassara. 2007. Simulation de la formation d' un dépôt de particules en microfiltration : effet des conditions hydrodynamiques et des interactions physicochimiques sur la morphologie et la perméabilité apparente du dépôt. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.

Elimelech, M., C.R., O'Melia. 1990. Effect of Particle Size on Collision Efficiency in the Deposition of Brownian Particles with Electrostatic Energy Barriers", Langmuir, 6, P 1153-1163.

Elimelech, M., J. Gregory, X. Jia, and R. A. Williams. 1995. Particle Deposition and Aggregation: Measurement, Modeling, and Simulation, Butterworth-Heinemann, Oxford

Goldman, A., R. Cox, and H. Brenner. 1967. Slow viscous motion of a sphere parallel to a plane wall. Chem. Eng. Sci. 22,P 637-651.

Gujisaite, V. 2008. Transport réactif en milieu poreux non saturé. Thèse de doctorat, Université de Nancy.

Hesham M, Bekhit. Ahmed E, Hassan. 2005. Two-Dimensional modeling of contaminant transport in porous media in the presence of colloids, advances in water resources, University of Nevada-United State, 28, P1320-1355.

Hamadi, A. Belhadj, K. 2006. Etude de transport d'un solute dans un milieu poreux. Mémoire d'ingénieur, Université de Tlemcen, 60P.

Jeremy A. R, Sharon L. Walker. And M, Elimelech. 2004. Bacterial Adhesion and Transport in Porous Media: Role of the Secondary Energy Minimum. Environ. Sci. Technol. 38, P1777-1785.

Lamia Yebdri. 2008. Etude du comportement de quelques traceurs en hydrogéologie sur banc d'essai au laboratoire. Mémoire de magister, université de Tlemcen, 84P.

Laboratoire centrale des ponds et chaussées. 2007. Effet de l'hétérogénéité du milieu poreux sur le transfert d'eau et de polluants en phase colloïdale. Eau et environnement, Nante le 27 et 28 Novembre.

Lencastre A. 1995. Hydraulique générale. EYROLLES, ISBN 2-212-01894-0.

Luc Dormieux. 2002. Introduction a la micromécanique des milieux poreux. Presses de l'école national des ponds et chaussées, ISBN 2-85978-364-4.

McCarthy, J.F., and J.M. Zachara. 1989. Subsurface transport of contaminants. Environ. Sci. Technol. 23 : 496-502.

McDowell-Boyer, L.M., J.R. Hunt, N.Sitar. 1986. Particle transport through porous media. Water Resources Research 22, No. 13, 1901 –1921.

Porel G. 1988. Transfert de soluté en aquifère crayeux : causes de modifications des résultats de traçages. Thèse de doctorat, Université des sciences et techniques de Lille.

René Lefebvre. 2006. Ecoulement multiphasique en milieu poreux. Programme gradué en science de la terre. INRS-eau, terre et environnement, université Laval, Québec.

R Dejardins. 1990. Traitement des eaux. Presses internationales polytechniques, ISBN 978-2-553-00643-2.

Ryan, J.N., M. Elimelech. 1996. Colloid Mobilization and Transport in Groundwater. Colloids and Surfaces A, Vol. 107, P1-56.

Kanti Sen, Tuchar. and K.C. Khilar. 2006. Review on subsurface colloids and colloid-associated contaminant transport in saturated porous media. Advances in Colloid and Interface Science. 119 :71 – 96

Kretschmar, R., Borkovec, M., Grolimund, D., M. Elimelech. 1999. Mobile Subsurface Colloids and their Role in Contaminant Transport (Review Paper), Advances in Agronomy, Vol 66, 121-194.

S. Stephanie. 2010. Etude des mécanismes de transport et de rétention de particules colloïdales en milieu poreux saturé. CEA. GRENOBLE.

Sakthivadivel, R. 1969. Clogging of granular porous medium by sediment. Rep. HEL 15-7, 106 pp., Hydraul. Eng. Lab., Univ. of Calif., Berkeley.

Spielman, L., P.M. Cukor, 1973. Deposition of non-Brownian particles under colloidal forces. J. Coll. Int. Sci. 1, 43-51.

Spilman L. 1977. Particle capture from low-speed laminar flows. Ann. Rev. Fluid Mech, 9, 297-319.

Tufenkji, N. G.F. Miller, J.N. Ryan, R.W. Hervey, M. Elimelech. 2004a. Transport of Cryptosporidium Oocysts in porous media: Role of straining and physicochemical filtration. Environ. Sci. Technol. 38: 5932-5938.

Wang, HQ., M. Lacroix, N. Massei, J-P. Dupont. 2000. Transport des particules en milieu poreux : détermination des paramètres hydrodispersifs et du coefficient de dépôt. C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes, 331, 97–104

Yusong. Li, H. Wang, D. Kurt, Linda. M., 2008. Investigation of the Transport and Deposition of Fullerene (C60) Nanoparticles in Quartz Sands under Varying Flow Conditions. Environ. Sci. Technol,42, P7174- 7180.

Annexes

Annexes (I)

TABLEAU (A.1) : Tableau récapitulative du calcul des moments pour les différents injections

	Débits d'alimentation (ml/s)	Moment d'ordre 0	Moment d'ordre 1	Moment d'ordre 2
Sable(1) argiles	11	10470,194	863474,851	128637576
	5	13850,96	1241244,6	187311316
	3,5	10371,75	1182924,38	183237545
Sable(2) argiles	11	9448,818	705802,705	94776091,4
	5	7461,665	694129,15	107344118
	3,5	7168,73	738164,785	118640286
Sable(1) Chaux	11	10683,456	787626,78	105295793
	5	11491,272	958736,016	138521154
	3,5	10116,6	1074174,05	168453814
Sable(2) Chaux	11	8236,56	647777,004	86442289,6
	5	7984,056	741831,144	108169408
	3,5	6979,248	708135,84	113758228

Annexes (II)

TABLEAU (A.2) : Injection de l'argile (Sable1)

0,56cm/s			0,25cm/s			0,18cm/s		
Temps (s)	C(NTU)	C(mg/l)	Temps (s)	C(NTU)	C(mg/l)	Temps (s)	C(NTU)	C(mg/l)
7	0,92	10,21	7	0,89	10,03	10	0,97	10,51
12	6,7	44,89	12	4,8	33,49	15	1,48	13,57
15	51,2	311,89	20	38,7	236,89	25	6,76	45,25
25	15,28	96,37	50	8,08	53,17	40	20,14	107,53
40	11,84	75,73	60	6,22	42,01	55	4,76	75,25
55	7,2	47,89	75	12,32	90,61	70	4,3	60,55
60	8,8	57,49	90	10,14	76,69	80	7,16	47,65
70	10,42	67,21	110	8	52,69	90	6,82	45,61
90	6,86	45,85	120	5,68	38,77	105	6,36	42,85
100	6,18	41,77	140	3,5	25,69	120	6,34	42,73
110	3,87	27,91	180	3,6	26,29	140	4,14	29,53
128	2,22	18,01	193	3,42	25,21	170	2,96	22,45
145	2,16	17,65	210	2,8	21,49	180	5,7	38,89
158	1,96	16,45	222	3,5	25,69	190	4,86	33,85
180	1,57	14,11	240	1,72	15,01	195	4,44	31,33
210	1,52	13,81	255	1,17	11,71	205	4,36	30,85
225	1,46	13,45	265	1,2	11,89	220	3,5	25,69
235	0,756	9,226	270	1,02	10,81	235	2,18	17,77
252	0,702	8,902	277	2,4	19,09	240	1,86	15,85
268	1,7	14,89	282	2,2	17,89	250	1,91	16,15
285	1,2	11,89	285	1,3	12,49	260	1,43	13,27
290	0,982	10,582	290	0,98	10,57	280	0,97	10,51
300	0,62	8,41	300	0,543	7,948	295	0,67	8,71

Annexes (III)

TABLEAU (A.3) : Injection de l'argile (Sable2)

0,56cm/s			0,25cm/s			0,18cm/s		
Temps (s)	C(NTU)	C(mg/l)	Temps (s)	C(NTU)	C(mg/l)	Temps (s)	C(NTU)	C(mg/l)
10	2,11	17,35	10	1,22	12,01	13	0,78	9,37
20	35,75	219,19	20	32,1	197,29	25	12,1	77,29
30	16,76	105,25	25	15,6	98,29	37	28,6	176,29
35	10,77	69,31	40	6,19	41,83	40	4,98	34,57
55	15,5	97,69	50	4,28	30,37	60	3,6	26,29
70	10,87	69,91	65	5,21	35,95	80	5,02	34,81
82	3,79	27,43	70	2,97	22,51	90	6,04	40,93
90	3,01	22,75	90	1,72	15,01	100	3,65	26,59
105	1,72	15,01	105	1,24	12,13	115	2,02	16,81
118	1,64	14,53	120	1,25	12,19	125	2	16,69
130	1,46	13,45	132	5,54	37,93	140	3,12	23,41
137	1,43	13,27	145	4,09	29,23	150	2,92	22,21
145	1,87	15,91	160	3,7	26,89	165	2,39	19,03
155	1,34	12,73	176	3,45	25,39	180	1,76	15,25
170	1,33	12,67	180	2,26	18,25	195	1,23	12,07
190	1,37	12,91	190	1,2	11,89	215	0,97	10,51
206	1,22	12,01	200	1,09	11,23	225	0,74	9,13
215	1,05	10,99	205	1,08	11,17	230	0,76	9,25
225	0,997	10,672	220	1,22	12,01	250	0,73	9,07
240	0,753	9,208	235	1,04	10,93	260	1	10,69
257	0,897	10,072	250	1,02	10,81	270	1,42	13,21
270	0,713	8,968	270	0,976	10,546	280	0,88	9,97
292	0,83	9,67	285	0,819	9,604	300	0,8	9,49

Annexes (IV)

TABLEAU (A.4) : Injection de la chaux (Sable1)

0,56cm/s			0,25cm/s			0,18cm/s		
Temps (s)	C(NTU)	C(mg/l)	Temps (s)	C(NTU)	C(mg/l)	Temps (s)	C(NTU)	C(mg/l)
6	2,8	18,36	12	3,95	23,88	9	1,22	10,776
15	6,78	37,464	17	9,31	49,608	15	2,97	19,176
25	28,42	141,336	30	20,87	105,096	30	4,47	26,376
45	71,2	346,68	45	58,6	286,2	45	13,9	71,64
50	15,32	78,456	60	19,68	99,384	60	45,2	221,88
55	8,29	44,712	80	4,31	25,608	70	18,7	94,68
65	2,96	19,128	90	3	19,32	85	7,44	40,632
75	2,11	15,048	105	2,38	16,344	105	4,86	28,248
85	1,74	13,272	115	2,13	15,144	120	3,8	23,16
90	3,07	19,656	130	1,95	14,28	140	3,09	19,752
105	3,2	20,28	150	1,9	14,04	165	2,73	18,024
115	1,91	14,088	170	1,8	13,56	180	2,97	19,176
130	1,76	13,368	180	2,1	15	195	2,14	15,192
137	1,8	13,56	200	2	14,52	220	2,3	15,96
150	1,7	13,08	220	2,24	15,672	230	2,41	16,488
170	1,82	13,656	240	2,21	15,528	240	2,27	15,816
190	1,6	12,6	255	1,7	13,08	250	2,2	15,48
205	1,5	12,12	265	1,79	13,512	260	2,44	16,632
230	1,53	12,264	275	1,51	12,168	270	2,36	16,248
235	1,57	12,456	280	1,46	11,928	280	2,11	15,048
250	1,4	11,64	288	1,19	10,632	288	1,86	13,848
260	1,25	10,92	292	1,06	10,008	293	1,43	11,784
285	0,92	9,336	300	0,87	9,096	303	1,01	9,768

Annexes (V)

TABLEAU (A.5) : Injection de la chaux (Sable2)

0,56cm/s			0,25cm/s			0,18cm/s		
Temps (s)	C(NTU)	C(mg/l)	Temps (s)	C(NTU)	C(mg/l)	Temps (s)	C(NTU)	C(mg/l)
10	2,12	15,096	10	1,48	12,024	5	2,03	14,664
17	6,4	35,64	15	2,81	18,408	12	2,78	18,264
23	13,9	71,64	25	5,87	33,096	30	5,78	32,664
30	15,7	80,28	35	10,09	53,352	45	14,3	73,56
50	51,1	250,2	50	43,09	211,752	60	38,7	190,68
55	24,51	122,568	60	14,26	73,368	65	9,5	50,52
60	4,34	25,752	70	6,87	37,896	70	2,67	17,736
76	3,5	21,72	85	3,26	20,568	90	2,33	16,104
80	1,69	13,032	101	3,24	20,472	110	1,94	14,232
91	1,62	12,696	111	2,88	18,744	125	1,32	11,256
105	1,49	12,072	130	2,27	15,816	140	2,02	14,616
115	1,42	11,736	145	3,88	23,544	150	1,21	10,728
133	1,39	11,592	160	1,65	12,84	165	1,19	10,632
145	1,8	13,56	170	1,76	13,368	180	1,11	10,248
160	1,13	10,344	180	1,17	10,536	190	1,04	9,912
173	1,1	10,2	202	1,08	10,104	200	1,47	11,976
191	1,06	10,008	225	1,03	9,864	210	2,43	16,584
210	0,948	9,4704	245	0,999	9,7152	225	1,75	13,32
220	0,931	9,3888	265	0,88	9,144	240	1,27	11,016
230	0,844	8,9712	280	0,765	8,592	255	1,15	10,44
251	0,838	8,9424	285	0,7	8,28	265	0,8	8,76
270	0,836	8,9328	290	0,67	8,136	275	0,841	8,9568
285	0,728	8,4144	300	0,65	8,04	285	0,867	9,0816
						295	0,78	8,664
						307	0,6	7,8

Photos

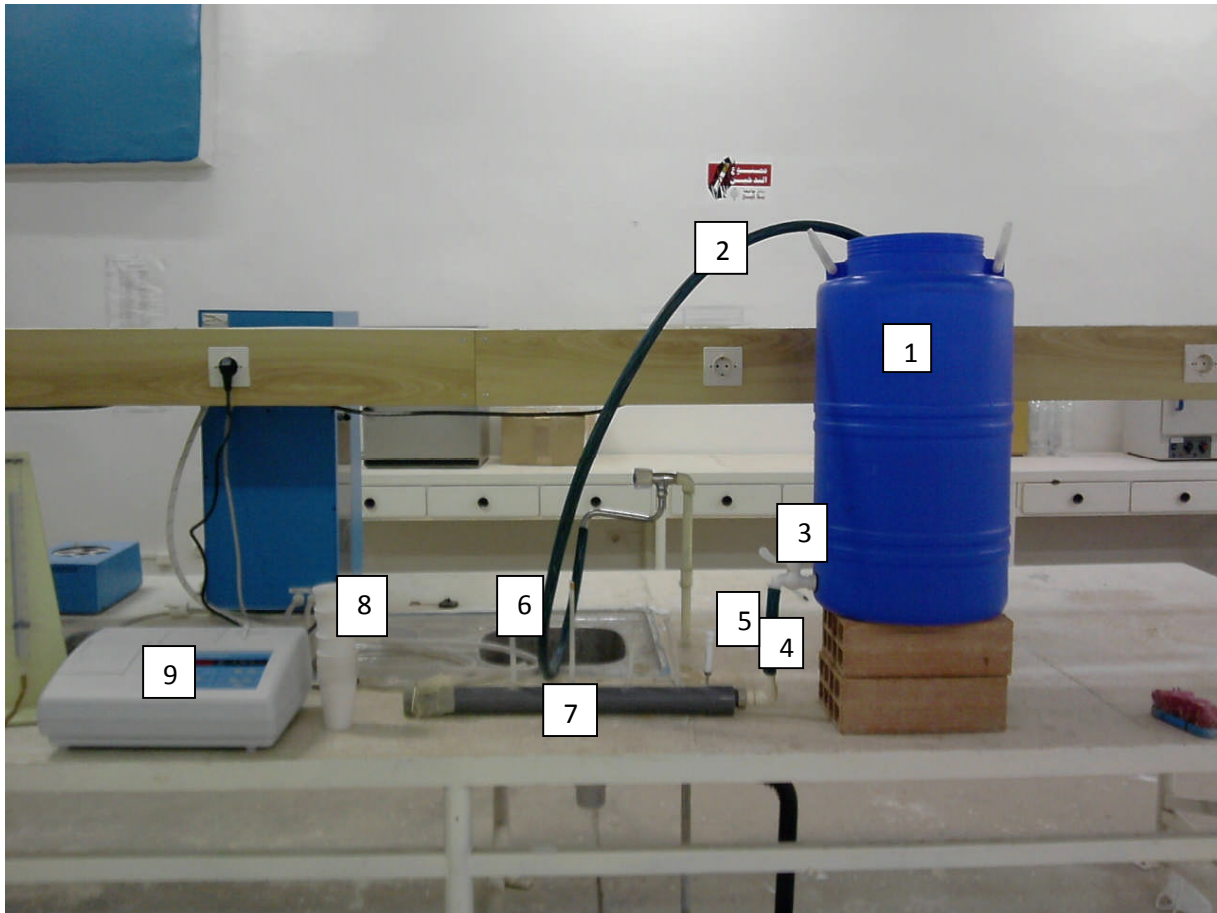


Photo 1 : Banc d'expérimentation

- 1 : Réservoir d'alimentation
- 2 : Conduite d'alimentation pour maintenir la charge constante
- 3 : Vanne pour le réglage du débit
- 4 : Alimentation de la colonne
- 5 : Seringue d'injection de la suspension
- 6 : Tubes piézométriques
- 7 : Colonne de sable
- 8 : Goblet pour la récupération de la concentration à la sortie de la colonne
- 9 : Turbidimètre pour la mesure de la concentration à l'instant (t)

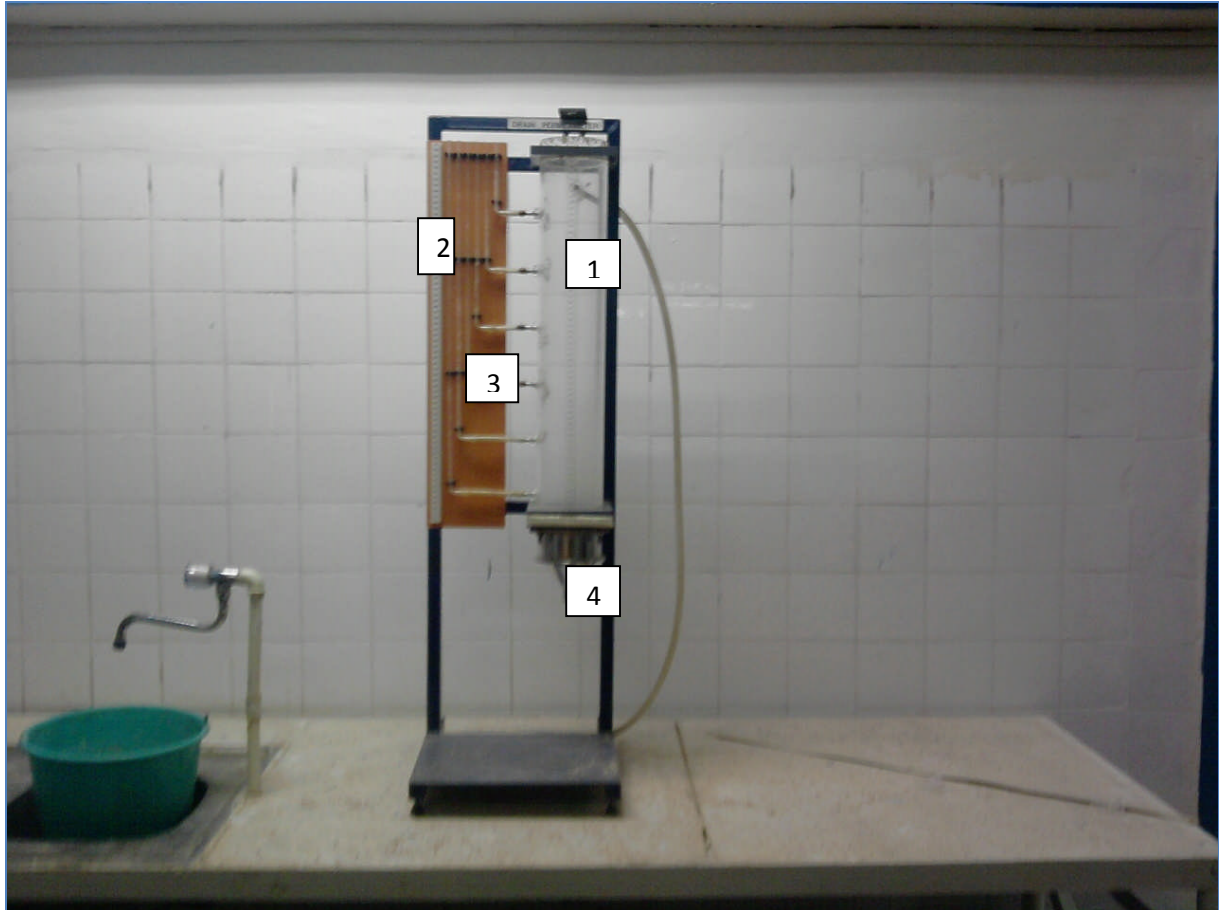


Photo 2 : Perméamètre à charge constante

- 1 : Eprouvette graduée
- 2 : Gradué
- 3 : Tubes piézométriques
- 4 : Entonnoir



Photo 3 : Sable1 Provenance d'Adrar (région de Bouda)



Photo 4 : Sable2 Provenance d'Adrar (Région de Bouda)



Photo 5 : Particules en suspension argileuse de diamètre inférieur à $80\mu\text{m}$



Photo 6 : Particules en suspension argileuse

$$\frac{dC}{dt} = -\lambda C$$

$$C = C_0 e^{-\lambda t}$$

$$\lambda = \frac{C_0}{C} \ln \left(\frac{C_0}{C} \right)$$

$$C = C_0 e^{-\lambda t}$$

—

Résumé:

Les travaux effectués dans ce mémoire concernent deux formations sableuses de caractéristiques physiques (porosité, perméabilité, volume poreux) différentes. Et aussi deux types de traceurs en suspension (particules d'argiles et la chaux).

Les particules en suspension sont impliquées dans de nombreuses problématiques ; tels que les ouvrages hydrauliques, l'exploitation des ressources souterraines (hydriques et pétrolière), le transport de ces dernier dans l'eau peut être un vecteur de transport de contaminants ou de freins par leurs dépôt (colmatage des pores).

Les études expérimentales du transport en suspension et leurs dépôt dans notre colonne expérimentale, ont été effectués dans un régime laminaire.

L'interprétation des résultats de traçage obtenus en utilisant l'équation convection-dispersion de premier ordre ; nous à permis de déterminer les différents paramètres hydrodispersifs. Les différentes vitesses d'écoulement utilisées et la taille des particules sont des paramètres qui influent sur le transport et le dépôt. Le taux de restitution est fonction de la vitesse d'écoulement et la porosité du milieu.

Mots clés : Colonne expérimentale- particules en suspension-vitesse d'écoulement- transport-dépôt-convection-dispersion.

Abstract :

The work carried out in this memory relates to two sandy formations of physical characteristics (porosity, permeability, porous volume) different. And also two types of tracers in suspended particles (clays and lime).

The suspended particles are implied in many problems; such as the hydraulic works, the exploitation of the underground resources (hydrous and oil), the transport of the latter in water can be a vector of transport of contaminants or brakes by their deposition (filling of the pores).

The experimental studies of transport in suspension and their deposition in our experimental column, were carried out in a laminar mode. The interpretation of the results of tracing obtained by using the equation convection-dispersion of first order; we allowed to determine the various parameters hydrodispersifs. The various rates of flow used and cuts in particles are parameters which influence on transport and deposition. The rate of refund is function of the rate of flow and the porosity of the medium.

Key words: Experimental column- Suspended Particles in- Velocity of flow transport-deposition-convection-dispersion.