



Faculté de Technologie
Département d'**Hydraulique**
Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement (LRHAE)

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par :

KACED Smail

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER en Hydraulique**

Option : **Ouvrages et Aménagements Hydrauliques**

INTITULE :

MODELISATION PHYSIQUE ET NUMERIQUE DE L'ÉCOULEMENT ET DU TRANSPORT D'UN POLLUANT DANS UN MILIEU POREUX SATURE

Soutenu le **27/06 /2018** devant le jury composé de :

- Président : M. BERREKSI Ali
- Promoteurs : M. BENDAHMANE Ibrahim
M. SEGHIR Abdelghani
- Examineurs : M. HAMMOUCHE Abderrahmane

M. IKNI Tahar

Remerciements

Au terme de ce travail, je remercie Dieu qui m'a donné le courage et la force pour achever ce travail.

Je remercie fortement mes promoteurs : M. Bendahmane et M. Seghir, qui ont été toujours disponibles pour m'écouter, m'aider et m'orienter pour trouver l'issue à chaque obstacle que j'ai rencontré. Je les remercie aussi pour les nombreuses discussions (scientifiques ou non) que nous avons partagées tout au long de trois années.

Je suis très reconnaissant à monsieur Breksi qui m'a soutenu durant mon passage au laboratoire d'hydrologie, je le remercie pour tous les outils et matériels personnels qu'il a mis à ma disposition pour réussir mon expérience.

J'adresse mes sincères remerciements à M. Hamani Sofiane et Mlle Chebbi Salima, pour le soutien et l'aide qu'ils m'ont apporté, et surtout pour les journées passées au laboratoire.

Je tiens à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie aussi tout le personnel de laboratoire MDS de génie civil, et le personnel de laboratoire d'analyse par SAA de département génie des procédés pour leurs contributions.

Je remercie particulièrement AMAZIGH, pour sa disponibilité, durant cinq années passées ensemble. Et Si-Yahya Moh qui a su me supporter durant ce travail.

Je remercie mes amis : Abdou, Massicilia, Sarah, Sonia, Tinhinane et ZINEB pour cette amitié qui nous a uni.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.

Je dédie ce travail à mes parents,

A mes deux frères,

A mes deux sœurs.

A vous tout le mérite

Merci...

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur le transport en milieux poreux et recherche bibliographique	
I.1. Introduction	2
I.2. Caractéristiques des milieux poreux	2
I.2.1. Définition	2
I.2.2. Caractéristiques physiques des sols	2
I.2.2.1. La porosité	2
I.2.2.2. L'indice des vides	3
I.2.2.3. La charge hydraulique	3
I.2.2.4. La perméabilité intrinsèque	4
I.2.2.5. La conductivité hydraulique	4
I.2.2.6. La transmissivité	4
I.2.2.7. La granulométrie	5
I.2.2.8. Homogénéité et hétérogénéité	5
I.2.2.9. Isotropie et anisotropie	5
I.2.3. L'hydrodynamique dans les milieux poreux	5
I.2.3.1. La loi de DARCY	5
I.2.3.2. L'équation de continuité	6
I.3. Généralités sur la pollution des eaux souterraines	7
I.3.1. Scénario de pollution des nappes et impacts	7
I.3.2. Les sources de polluants.....	8
I.3.2.1. L'industrie	8
I.3.2.2. L'agriculture moderne	9
I.3.2.3. La pollution organique.....	9
I.3.2.4. L'intrusion marine	9
I.4. Transport de la pollution dans les milieux poreux	10
I.4.1. La convection	10
I.4.2. La diffusion moléculaire	10
I.4.3. La dispersion cinématique	11
I.4.4. La dispersion hydrodynamique	12

I.4.5. L'équation d'advection-dispersion	12
I.4.5.1. Les conditions initiales et aux limites	13
I.5. Couplage écoulement- transport	13
I.6. Travaux effectués	14
I.7. Conclusion	16
Chapitre II : Etude expérimentale	
II.1. Introduction	17
II.2. Objectif de l'expérience	17
II.3. Le dispositif expérimental	17
II.3.1. Banc d'essais d'hydrologie H 313	17
II.3.2. Caractéristiques du banc	17
II.3.3. Etudes réalisables sur l'appareil	18
II.4. Propriétés physiques du milieu	18
II.4.1. L'analyse granulométrique	18
II.4.2. La perméabilité	21
II.4.3. La porosité	23
II.4.4. Le remplissage du bassin	24
II.5. Hypothèses	24
II.6. Etude de l'écoulement souterrain	25
II.6.1. Ecoulement vers un puits dans une nappe libre	25
II.6.1.1. Mesure de débit	25
II.6.1.2. La ligne piézométrique	26
II.7. Etude de transfert de la pollution	26
II.7.1. Choix du polluant	26
II.7.2. La concentration massique	26
II.7.3. La mole	27
II.7.4. La concentration molaire	27
II.7.5. Injection de la solution concentrée	27
II.7.6. Le prélèvement	28
II.7.7. La filtration	29
II.8. La spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA)	30
II.8.1. Définition	30

II.8.2. La détermination de la concentration	30
II.8.2.1. Courbe d'étalonnage	30
II.8.2.2. dosage par SAA	31
II.9. Les difficultés rencontrées dans l'étude expérimentale	31
II.10. Conclusion	31
Chapitre III : Simulation numérique	
III.1. Introduction	32
III.2. Le logiciel COMSOL Multiphysics	32
III.2.1. Traitement de l'écoulement dans les milieux poreux	33
III.2.2. Traitement de transport de la pollution dans les milieux poreux	33
III.3. Construction du modèle	33
III.3.1. Choix de la physique	33
III.3.2. Les paramètres du calcul	34
III.3.3. Les variables dans le calcul	34
III.3.4. La géométrie du modèle	34
III.4. La loi de Darcy	35
III.4.1. Equation du domaine	35
III.4.2. Conditions aux limites du modèle	36
III.4.2.1. Charge hydraulique	36
III.4.2.2. Flux nul	36
III.4.3. Conditions initiales	37
III.4.3.1. Flux de masse	37
III.5. Le maillage	37
III.5.1. Conditions de déplacement	37
III.6. Transport d'espèces diluées en milieu poreux	38
III.6.1. Equation du domaine	38
III.6.2. Propriétés de transport	38
III.6.2.1. La vitesse	38
III.6.2.2. La porosité	38
III.6.2.3. La diffusion moléculaire	39
III.6.2.4. La dispersion cinématique	39
III.6.3. Condition initiale	39

III.6.3.1. Ecoulement entrant	39
III.7. Le calage des paramètres	40
III.8. Etude temporelle	40
III.9. Conclusion	41
Chapitre IV : Résultats et discussions	
IV.1. Introduction	42
IV.2. Ecoulement souterrain vers un puits de pompage	42
IV.2.1. Etude expérimentale de l'écoulement	42
IV.2.2. Etude numérique de l'écoulement	43
IV.2.3. Etude comparative	46
IV.2.4. Discussion des résultats	46
IV.3. Transport de la pollution dans le milieu poreux	46
IV.3.1. Etude expérimentale de la pollution	46
IV.3.1.1. Discussion et interprétation des résultats	50
IV.3.2. Etude numérique	50
IV.3.2.1. Discussion et interprétation des résultats	53
IV.4. Les résultats sur les puits d'observation	53
IV.4.1. Etude expérimentale	53
IV.4.2. Etude numérique	55
IV.4.3. Etude comparative	56
IV.4.3.1. Discussion et interprétation des résultats	58
IV.4. Proposition d'une étude expérimentale	58
IV.5. Conclusion	59
Conclusion générale et perspectives.....	60
Références bibliographiques.....	61

Liste des figures

<i>Figure (I.1) : Détermination de la charge hydraulique dans un piézomètre.....</i>	4
<i>Figure (I.2) : Transfert d'un polluant situé dans la surface vers l'eau souterraine.....</i>	8
<i>Figure (I.3) : Rupture d'un oléoduc dans la réserve des Coussouls.....</i>	9
<i>Figure (I.4) : Effets des principaux processus de transport sur la répartition spatiale d'un panache à un temps donné (Bensard 2003).....</i>	10
<i>Figure (I.5) : Facteurs influençant une dispersion longitudinale à l'échelle de pore.....</i>	11
<i>Figure (I.6) : Organigramme de couplage écoulement-transport.....</i>	14
<i>Figure (II.1) : Le dispositif expérimental.....</i>	17
<i>Figure (II.2) : Les puits d'observation implantés dans le bassin.....</i>	18
<i>Figure (II.3) : Agitateur électrique.....</i>	19
<i>Figure (II.4) : La balance électrique utilisée.....</i>	20
<i>Figure (II.5) : La courbe granulométrique du sable utilisé.....</i>	21
<i>Figure (II.6) : Dispositif expérimental de mesure de la perméabilité.....</i>	22
<i>Figure (II.7) : Perméamètre à charge constante.....</i>	22
<i>Figure (II.8) : La courbe de perméabilité du sable utilisé.....</i>	23
<i>Figure (II.9) : Remplissage du bassin.....</i>	24
<i>Figure (II.10) : Ecoulement vers un puits à deux charges identiques.....</i>	25
<i>Figure (II.11) : Mesure de niveau d'eau les piézomètres.....</i>	26
<i>Figure (II.12) : Injection de la solution concentrée dans le milieu poreux.....</i>	28
<i>Figure (II.13) : Prélèvement des échantillons au niveau des piézomètres.....</i>	29
<i>Figure (II.14) : La filtration des échantillons.....</i>	29
<i>Figure (II.15) : Le spectromètre d'absorption atomique.....</i>	30
<i>Figure (III.1) : La bibliothèque du COMSOL 5.2.....</i>	32
<i>Figure (III.2) : Les interfaces ajoutées pour l'étude.....</i>	33
<i>Figure (III.3) : Représentation du modèle en trois dimensions.....</i>	35
<i>Figure (III.4) : La charge hydraulique.....</i>	36
<i>Figure (III.5) : Les sections de flux nul.....</i>	36
<i>Figure (III.6) : Flux de masse sortant.....</i>	37

Figure (III.7) : Maillage mobile du domaine de calcul.....	38
Figure (III.8) : L'écoulement entrant.....	40
Figures (IV.1) : La ligne piézométrique expérimentale.....	43
Figure (IV.2) : Ligne piézométrique numérique.....	44
Figure (IV.3) : représentation en 3D du rabattement.....	45
Figure (IV.4) : Champ de vitesse selon la direction de l'écoulement.....	45
Figure (IV.5) : Comparaison entre les deux méthodes (expérimentale et numérique).....	46
Figure (IV.6) : Variation de la concentration dans le milieu.....	49
Figure (IV.7) : Propagation de la pollution (mol/m^3) pendant $t= 1500$ secondes.....	50
Figure (IV.8) : Propagation de la pollution (mol/m^3) pendant $t= 2000$ secondes.....	51
Figure (IV.9) : Propagation de la pollution (mol/m^3) pendant $t= 2500$ secondes.....	51
Figure (IV.10) : Propagation de la pollution (mol/m^3) pendant $t= 3000$ secondes.....	52
Figure (IV.11) : Propagation de la pollution (mol/m^3) pendant $t= 3500$ secondes.....	52
Figure (IV.12) : Propagation de la pollution (mol/m^3) pendant $t= 3900$ secondes.....	53
Figure (IV.13) : Résultats expérimentaux pour chaque puits.....	54
Figure (IV.14) : Les résultats numériques pour chaque puits.....	56
Figure (IV.15) : Graphiques de comparaison expérimental-numérique.....	57

Liste des tableaux

<i>Tableau (II.1) : Mesures et calculs effectués pour l'analyse granulométrique.....</i>	20
<i>Tableau (II. 2) : Mesures effectuées pour la mesure de la perméabilité.....</i>	23
<i>Tableau (II.3) : Mesures effectuées pour la détermination de la porosité.....</i>	23
<i>Tableau (II.4) : Mesures et calculs effectués pour la détermination du débit.....</i>	25
<i>Tableau (II.5) : Concentrations des étalons et absorbances obtenues.....</i>	30
<i>Tableau (III.1) : Les paramètres et caractéristiques du modèle.....</i>	34
<i>Tableau (III.2) : Les variables.....</i>	34
<i>Tableau (IV.1) : Les mesures expérimentales de ligne piézométrique.....</i>	42
<i>Tableau (IV.2): Mesures de la ligne piézométrique obtenues avec la simulation numérique.....</i>	44
<i>Tableau (IV.3) : Les puits d'observation choisis.....</i>	47
<i>Tableau (IV.4) : Les résultats expérimentaux de la concentration.....</i>	47
<i>Tableau (IV.5) : Les résultats expérimentaux de la concentration exprimés en mol/m³.....</i>	48

Liste des symboles et abréviations

- A : la section de l'écoulement [L^2].
- B : la largeur du modèle [L].
- b : l'épaisseur de l'aquifère [L].
- C : la concentration molaire [mol.L^3].
- C_m : la concentration massique [ML^3].
- C_u : coefficient de HAZEN [-].
- D : coefficient de dispersion [L^2T].
- D_L : coefficient de dispersion longitudinale [L^2T].
- D_T : coefficient de dispersion transversale [L^2T].
- D₀ : coefficient de diffusion moléculaire [L^2T].
- D₁₀ : diamètre correspondant à 10% de passant (mm).
- D₆₀ : diamètre correspondant à 60% de passant (mm).
- dh : la différence de hauteur [L].
- dz : déplacement suivant z [L].
- e : l'indice des vides [-].
- f : terme source.
- H : la hauteur [L].
- h₁ : la hauteur à l'aval [L].
- h₂ : la hauteur à l'amont [L].
- h_p : la hauteur au niveau de puits [L].
- i : le gradient hydraulique [-].
- K : la conductivité hydraulique [LT^{-1}].
- K_x, K_y, K_z : la conductivité hydraulique selon les axes x ; y et z [LT^{-1}].
- k : la perméabilité intrinsèque [L^2].
- L : la longueur du modèle [L].
- M : la masse atomique [M.mol^{-1}].
- m : la masse de soluté [M].
- N_A : nombre d'Avogadro [-].

- N_0 : flux massique sortant [MT^{-1}].
- n : la porosité [-].
- P : la pression [$MT^{-2}L^{-1}$].
- Q : le débit [L^3T^{-1}].
- r_p : rayon du puits [L].
- S : section latérale du puits [L^2].
- S_r : degré de saturation [-].
- t : temps [T].
- U : vitesse de Darcy [MT^{-1}].
- u : composante de vitesse selon x [LT^{-1}].
- V : le volume [L^3].
- V_s : volume des grains solides [L^3].
- V_v : volume des vides [L^3].
- V_w : volume de l'eau [L^3].
- x ; y et z : directions principales du repère.
- Z_0 : le rabattement [L].
- α_L : dispersivité longitudinale [L].
- α_T : dispersivité transversale [L].
- ε : Porosité géométrique [-].
- μ : viscosité dynamique de l'eau [$ML^{-1}T^{-1}$].
- ρ : La masse volumique de l'eau [ML^{-3}].
- λ : Longueur d'onde du plomb [L].
- ADE : Advection-dispersion equation.
- CI : Condition initiale.
- CL : Condition aux limites.
- EDP : Equation aux dérivées partielles.
- SAA : Spectrométrie d'absorption atomique.

Introduction générale

Introduction générale

L'eau souterraine est devenue un enjeu fort dans le développement durable, une fraction importante de la population dans le monde dépend des nappes d'eaux souterraines pour répondre à leurs besoins en eau potable et en eau d'irrigation. Ce qui montre l'importance de cette ressource.

La préservation de cette ressource naturelle est essentielle pour l'avenir de l'humanité. La présence de plus en plus de pollutions générées en premier lieu par l'homme met la ressource la plus importante sur la planète en danger. Actuellement les aquifères sont vulnérables à plusieurs types de pollution : les pesticides ; les substances chimiques issues de l'industrie et l'intrusion saline qui est le problème majeur des nappes côtières soumises à une surexploitation.

Le polluant crée souvent un panache de contaminants dans un aquifère. Le mouvement de l'eau et la dispersion à l'intérieur de l'aquifère répandent le polluant sur zone plus étendue, sa limite d'avancement, souvent appelée bordure de panache, peut se croiser avec un puits de pompage et rend les réserves d'eau dangereuses pour les humains. Une fois que les eaux souterraines sont souillées, il devient extrêmement coûteux d'enlever la contamination.

Ce travail est une contribution à l'amélioration de la connaissance et la compréhension du phénomène de transport de polluants dans les milieux poreux, notre objectif est d'élaborer un modèle réduit d'une nappe libre dans lequel une étude expérimentale sera menée, et de développer un modèle numérique contribuant à la gestion des ressources en eau et la prévision de la propagation des polluants dans les aquifères.

Le comportement d'un polluant dépend principalement de l'écoulement qui le transporte. La connaissance de l'écoulement et les propriétés physiques et hydrodynamiques du milieu est nécessaire.

Pour atteindre l'objectif, nous avons réparti ce travail en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre de ce manuscrit, nous présenterons les notions de base de l'hydrodynamique et de transport en milieu poreux homogène. Ensuite nous citerons quelques travaux effectués dans cet axe de recherche.

Le deuxième chapitre se concentre sur l'étude expérimentale faite au laboratoire, nous allons présenter le dispositif expérimental ; les principales expériences pour la caractérisation du milieu et la procédure expérimentale adoptée pour l'étude du transport. Nous présenterons aussi les méthodes utilisées pour suivre l'évolution de la pollution en terme de concentration.

Dans le troisième chapitre, nous allons reproduire numériquement les expériences réalisées sur le modèle expérimental avec le code COMSOL Multiphysics.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous présenterons l'ensemble des résultats obtenus dans deux chapitres précédents : études expérimentale et la simulation numérique, et nous ferons une étude comparative pour la validation du modèle numérique.

Chapitre I :
*Généralités sur le transport en milieu
poreux et recherche bibliographique*

I.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'aborder d'une manière générale les milieux poreux: leurs caractéristiques et les lois régissant l'écoulement de l'eau dans ces milieux dans le cas d'un écoulement laminaire dans une nappe libre. Nous aborderons ensuite quelques notions sur la pollution des eaux souterraines, ainsi que les principaux processus et les équations régissant le transport dans les milieux poreux.

On terminera ce chapitre par une recherche bibliographique contenant quelques études et travaux réalisés dans ce domaine de recherche.

I.2. Caractéristiques des milieux poreux

I.2.1. Définition

Un milieu poreux désigne un ensemble de matériaux formés d'une phase solide et un espace libre. Cet ensemble donne lieu à de nombreux phénomènes physiques. On caractérise généralement un milieu poreux par sa granulométrie ; sa porosité et sa perméabilité.

I.2.2. Caractéristiques physiques des sols

I.2.2.1. La porosité

Les portions du sol non occupées par la matière minérale solide peuvent être occupées par des eaux souterraines, ces espaces sont dit vides, interstices ou pores, ces pores et interstices sont créés par les processus géologiques qui sont à l'origine des formations géologiques [1].

La porosité d'un sol est la mesure des vides qu'il contient, elle est définie comme étant le rapport de volume des vides au volume total du sol [2].

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

- n : la porosité ;
- V_v : volume des vides ;
- V : volume total du sol.

Il existe deux types de porosités différentes, la porosité géométrique et la porosité effective définie ci-dessus, elle correspond au produit de la porosité géométrique et du degré de saturation, qui est le rapport du volume de l'eau au volume des vides V_v [3].

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (\text{I.2})$$

Donc :

$$\varepsilon = S_r \cdot n \quad (\text{I.3})$$

Avec :

- ε : la porosité géométrique ;
- S_r : degré de saturation ;
- n : porosité efficace ;
- V_w : volume de l'eau.

1.2.2.2. L'indice des vides

L'indice des vides est le rapport du volume des vides au volume des grains solides d'un sol [2].

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

- e : l'indice des vides ;
- V_s : volume des grains solides.

1.2.2.3. La charge hydraulique

Dans un milieu poreux, l'eau est caractérisée par son état d'énergie. Son potentiel énergétique total résulte de l'addition des forces qui agissent sur elle. On définit alors la charge hydraulique h (ou potentiel énergétique total) d'un fluide incompressible et soumis à la seule gravité par la relation [3,4] :

$$h = h_p + z \quad (\text{I.5})$$

Où, $h_p = \frac{p}{\rho g}$ est la charge de la pression.

Avec :

- h : La charge hydraulique ;
- p : La pression de l'eau ;
- ρ : La masse volumique de l'eau
- g : L'accélération de la pesanteur.

La charge hydraulique en un point du milieu poreux est déterminée par des mesures dans les piézomètres.

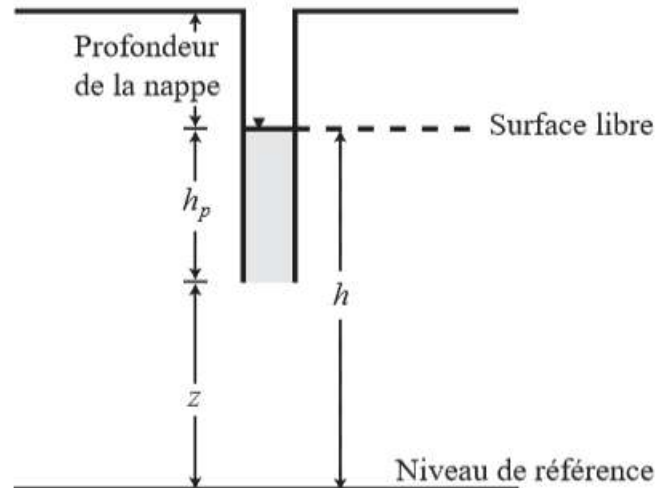


Figure (I.1) : détermination de la charge hydraulique dans un piézomètre.

I.2.2.4. La perméabilité intrinsèque

La perméabilité intrinsèque est la propriété d'un corps poreux à se laisser traverser par un fluide. Cette constante caractéristique d'un milieu poreux est liée à la forme des grains et à la porosité cinématique. Elle est donc indépendante des caractéristiques du fluide et ne dépend que de la structure et de la connectivité des pores [5].

I.2.2.5. La conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique (ou perméabilité) est un paramètre spécifique de l'écoulement de l'eau à travers un milieu poreux. La conductivité hydraulique, contrairement à la perméabilité intrinsèque, dépend des propriétés de fluide et de la perméabilité intrinsèque. Pour un milieu poreux isotrope, la conductivité hydraulique est donnée par la formule [6] :

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (I.6)$$

Avec :

- K : La conductivité hydraulique ;
- k : La perméabilité intrinsèque ;
- ρ : La masse volumique du fluide ;
- g : Accélération de la pesanteur ;
- μ : viscosité dynamique.

I.2.2.6. La transmissivité

La transmissivité c'est un paramètre régissant le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur de la zone saturée d'un aquifère continu, elle est égale au produit du coefficient de perméabilité par l'épaisseur de l'aquifère :

$$T = K \cdot b \quad (I.7)$$

Avec :

- T : la transmissivité ;
- K : le coefficient de perméabilité ;
- b : l'épaisseur de l'aquifère.

1.2.2.7. La granulométrie

La granulométrie a pour but de déterminer les proportions pondérales des grains des différentes tailles dans le sol, on obtient ainsi une courbe granulométrique représentant le pourcentage des éléments dont le diamètre est inférieur à un diamètre donné.

1.2.2.8. Homogénéité et hétérogénéité

Une formation est dite homogène si la conductivité hydraulique K est indépendante de sa position. Et si la conductivité hydraulique dépend de la position dans la formation géologique, la formation est hétérogène [7].

1.2.2.9. Isotropie et anisotropie

Une formation est dite isotrope si la conductivité hydraulique ne dépend pas de la direction de la mesure. Si elle varie avec la direction de mesure en un point, la formation géologique est anisotrope dans ce point.

Si l'on considère un système de coordonnées (xyz), et les valeurs de la conductivité hydraulique suivant les axes x ; y et z sont respectivement K_x ; K_y et K_z .

- Si : $K_x = K_y = K_z$ donc la formation géologique est isotrope ;
- Si : $K_x \neq K_y \neq K_z$ donc la formation géologique est anisotrope ;
- Si : $K_x = K_y \neq K_z$ donc la formation est transversalement isotrope.

1.2.3. L'hydrodynamique dans les milieux poreux

1.2.3.1. La loi de DARCY

L'écoulement de l'eau à travers les formations perméables a été étudié par H.Darcy en 1856. Les vitesses de circulation de l'eau dans les milieux poreux sont très variables. Elles dépendent d'un certain nombre de facteurs, dont évidemment la perméabilité de l'aquifère, mais aussi le gradient hydraulique qui est défini par la différence d'élévation entre deux points de la surface de la nappe, divisé par la distance entre ces deux mêmes points, et la viscosité de l'eau [8].

La loi de Darcy est une loi empirique, obtenue pour un milieu monodimensionnel à travers une colonne de sable homogène et s'écrit comme suit :

$$Q = -K \times A \times \frac{dh}{dl} \quad (I.8)$$

Avec :

- Q : Débit ;
- K : Conductivité hydraulique ou perméabilité ;
- A : Aire de la section perpendiculaire à l'écoulement ;
- dh/dl : Gradient de charge hydraulique.

1.2.3.2. L'équation de continuité

L'équation de continuité exprime le principe de conservation de masse d'un fluide en mouvement. Dans un volume élémentaire, la masse du fluide prélevée ou injecté est égale à la somme de la variation de la masse du fluide durant un intervalle de temps élémentaire et des flux massiques traversant la surface de ce volume [9].

$$\frac{\partial(\omega\rho)}{\partial t} + \nabla(\rho u) = \rho f \quad (\text{I.9})$$

Où, f représente le terme puits/source par unité de volume.

Si le milieu poreux est indéformable, la porosité ω est indépendante du temps. En négligeant la présence de polluant dans le domaine, autrement dit, si l'on ne considère que la partie hydrodynamique, la masse volumique ρ ne dépend que la pression p pour une température constante.

$$\frac{\partial(\omega\rho)}{\partial t} = \frac{\partial(\omega\rho)}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{s}{g} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{I.10})$$

Où, $s = g \frac{\partial(\omega\rho)}{\partial p}$, est le coefficient d'emmagasinement spécifique qui représente la capacité du milieu poreux à libérer du fluide sous l'effet d'une diminution de la pression.

En introduisant cette dernière expression dans l'équation (I.9), on obtient une forme de l'équation de continuité en fonction de la pression. Si l'on admet que la variation spatiale de la masse volumique est négligeable, en simplifiant par ρ , l'équation de continuité devient :

$$\left(\frac{s}{\rho g}\right) \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot u = f \quad (\text{I.11})$$

La forme la plus courante de l'équation de continuité est une expression liant la variation temporelle de charge et la variation spatiale de la vitesse de Darcy. La relation entre la charge et la pression est donnée par :

$$p = \rho g(h - z) \quad (\text{I.12})$$

Soit,

$$\begin{aligned}\frac{\partial p}{\partial t} &= g(h - z) \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho g \frac{\partial h}{\partial t} \\ &= ((h - z) \frac{s}{\omega} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho g \frac{\partial h}{\partial t})\end{aligned}\quad (\text{I.13})$$

D'où,

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \left(\frac{1}{1 - (h - z)s/\omega} \right) + \rho g \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{I.14})$$

Dans la plupart des cas, la quantité $((1 - (h - z)s/\omega))$ est négligeable devant 1. Alors :

$$\frac{\partial p}{\partial t} \approx \rho g \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{I.15})$$

En remplaçant la relation précédente dans l'équation (I.11), l'équation du bilan de masse pour un fluide incompressible dans un milieu poreux indéformable s'écrit sous la forme générale :

$$s \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} = f \quad (\text{I.16})$$

En régime permanent, la charge ne varie pas avec le temps. L'équation (I.16) devient alors :

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = f \quad (\text{I.17})$$

I.3. Généralités sur la pollution des eaux souterraines

La pollution des eaux continentales en général s'effectue soit par infiltration d'eaux météoriques chargée de polluants, soit par déversement direct de polluants liquides à la surface du sol ou encore par contamination indirecte par les eaux de ruissellement qui sont chargées en produits plus ou moins toxiques et qui peuvent atteindre la nappe en traversant la zone non saturée ou par l'intermédiaire des cours d'eau. Après avoir atteint la nappe, le polluant est entraîné par l'écoulement de celle-ci vers l'aval et c'est au cours de ce trajet qu'il voit sa concentration varier en fonction de la circulation des eaux souterraines et des différents facteurs bio-physicochimiques pouvant affecter sa mobilité et sa toxicité [10].

I.3.1. Scénario de pollution des nappes et impacts

La pollution des nappes (ressources en eau souterraine) est le résultat d'une suite d'activités humaines et des phénomènes naturels. On peut simplifier ce scénario comme suit : D'abord, le développement d'une source de pollution (rejets en milieu naturel, dépôt, fuites et ruptures des oléoducs...). Ensuite, les polluants migrent soit en surface pour atteindre le réseau hydrographique qui alimente les nappes, soit ils migrent verticalement en traversant la zone non saturée jusqu'à la

nappe. En fin, les polluants se propagent dans ce milieu et la cible c'est l'eau souterraine destinée à l'alimentation en eau potable et l'industrie.

En général, il existe quatre types de risques qui peuvent découler de cette pollution [11] :

- risque pour la santé humaine ;
- risque pour l'écosystème ;
- risque pour les eaux (dégradation de la qualité de l'eau),
- risque pour les bâtiments, les matériaux et les structures.

La schématisation de ce scénario est illustrée dans la figure (I.2) suivante :

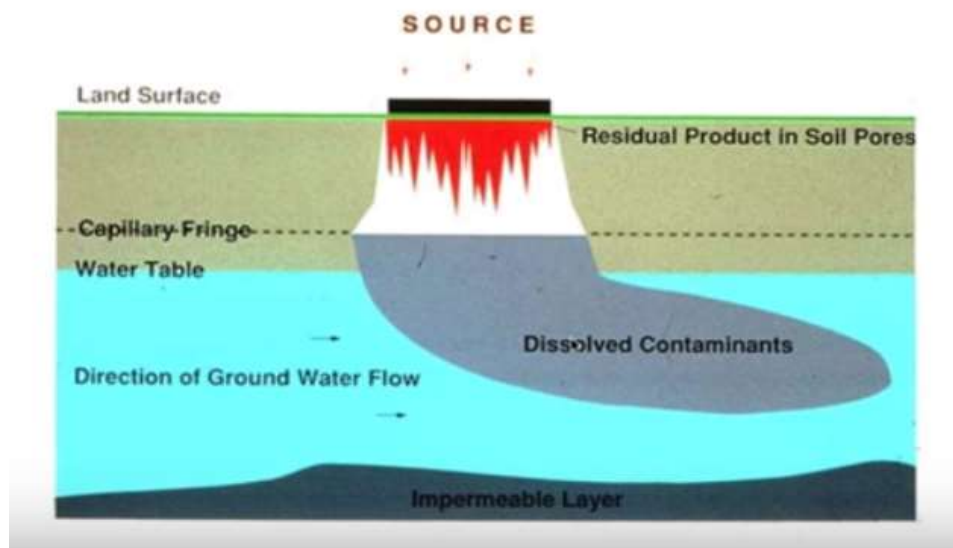


Figure (I.2) : transfert d'un polluant situé dans la surface vers l'eau souterraine.

I.3.2. Les sources de polluants

Les principales sources de polluants proviennent de la production et de l'utilisation des diverses sources d'énergie, des activités industrielles et de l'agriculture.

I.3.2.1. L'industrie

L'industrie chimique ; la métallurgie ; l'électronique et les hydrocarbures mettent en circulation de nombreux composés chimiques, minéraux et organiques de toxicité souvent élevée et peu dégradables ou indestructibles.

Le 7 Août 2009, une rupture d'un oléoduc traversant la réserve naturelle des Coussouls de Crau en France provoquant une grave pollution, environ 4000 m³ du pétrole ont été répandus sur environ 5 hectares (Figure II.3). La nappe phréatique a été touchée par la pollution, des considérables dégâts sont enregistrés ensuite pour la nappe [12].



Figure (I.3) : Rupture d'un oléoduc dans la réserve des Coussouls (France)

I.3.2.2. L'agriculture moderne

L'agriculture moderne représente une importante source de pollution des sols cultivés et des ressources en eau potable. L'usage massif d'engrais chimiques et le recours systématique aux pesticides ont été accompagnés d'une pollution accrue des sols et des eaux continentales spécialement les nappes phréatiques.

I.3.2.3. La pollution organique

C'est le fait exclusif des rejets des égouts ou des rejets organiques des industries agro-alimentaires et papeteries. Les rejets issus des unités de production dans la zone industrielle Thaharach Akbou a provoqué la contamination des eaux dans le cours d'eau de la Soummam. Cette pollution représente une menace pour la nappe Soummam alimentée principalement par ce cours d'eau.

I.3.2.4. L'intrusion marine

Les nappes côtières ne sont pas des ressources infinies, le volume de l'eau prélevée des nappes est compensé par l'apport de la recharge en amont par le cycle naturel de l'eau. Lorsque les besoins en eau augmentent, en particulier durant les périodes sèches, la quantité de l'eau prélevée n'est plus compensée par cet apport de l'eau douce à la nappe. Dans ce cas, le biseau salé (partie de l'aquifère côtier envahie par l'eau saumâtre), avance en direction de l'aquifère et dégrade progressivement la ressource en eau.

Parmi les exemples de l'intrusion marine on cite le cas de la nappe Nador à Tipaza qui a été très sollicitée par les différents usagers depuis 1970. Une surexploitation qui a engendré une inversion du gradient hydraulique, le biseau salé est avancé à l'intérieur du continent d'environ 2 km, Plusieurs ouvrages de captages ont été impérativement abandonnés. En 2011, des études ont montré la présence des fractions de l'eau de mer malgré la mise en service du barrage Boukourdane en 1998 [13].

I.4. Transport de la pollution dans les milieux poreux

Le transport de la pollution dans les milieux poreux est régi par trois principaux mécanismes : la convection; la diffusion moléculaire et la dispersion. La figure (I.4) ci-dessous montre l'influence de ces mécanismes sur le transport :

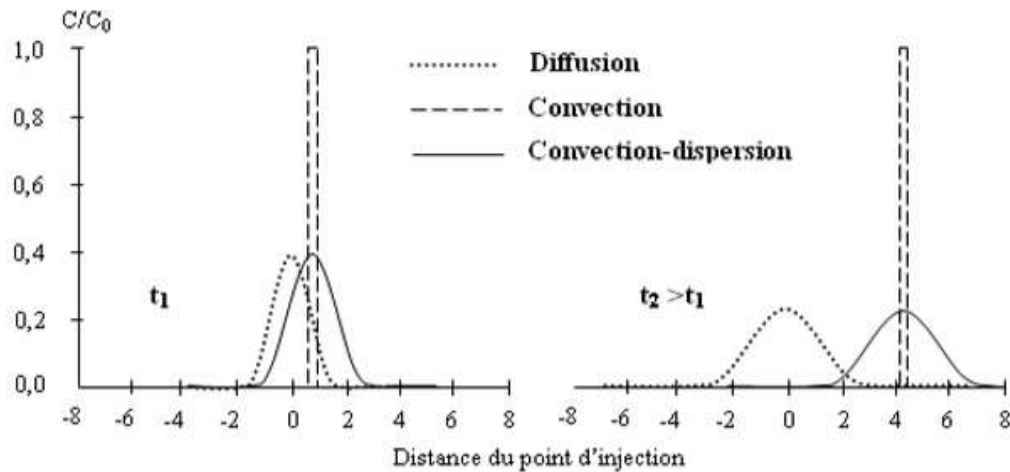


Figure (I.4) : Effets des principaux processus de transport sur la répartition spatiale d'un panache à un temps donné (Bensard 2003).

I.4.1. La convection

La convection (ou advection) représente l'entraînement des éléments en solution dans le mouvement du fluide qui se déplace. L'équation de transport par convection pure dans un milieu monodimensionnel est la suivante [14]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (\text{I.18})$$

Où, C est la concentration au point x à l'instant t et U_x la vitesse selon la direction x .

Le soluté est transporté par l'écoulement de l'eau à la vitesse U définie par la loi de Darcy. Sur la figure (I.4), la forme du panache n'est pas modifiée et le soluté avance à la même vitesse que celle du fluide.

Dans le cas d'un milieu à trois dimensions, et dans le cas d'un fluide incompressible, l'équation (I.18) devient [15] :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \cdot \nabla(C) \quad (\text{I.19})$$

I.4.2. La diffusion moléculaire

La diffusion moléculaire est un phénomène indépendant de la vitesse du fluide car elle se produit même en l'absence de l'écoulement. Elle est liée à l'existence de gradient de concentration dans le fluide et provient de l'agitation des molécules qui tend à homogénéiser la concentration de soluté

dans le milieu (migration des molécules des zones à fortes concentrations vers celles à faibles concentrations). La diffusion moléculaire est exprimée selon la loi de Fick [16]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \vec{\nabla}(D_0 \vec{\nabla} C) \quad (\text{I.20})$$

Où D_0 est le coefficient de diffusion moléculaire.

I.4.3. La dispersion cinématique

La dispersion cinématique c'est l'effet de l'absence d'uniformité des champs des vitesses intergranulaires des particules d'eau en mouvement dans un milieu poreux considéré à l'échelle microscopique, elle se traduit par une dispersion aléatoire de ces vitesses réelles particulières autour de la vitesse moyenne de déplacement de fluide. Ces variations de vitesses entraîne une dilution de soluté, dite dispersion cinématique [9].

Les principaux facteurs qui influencent cette dilution de soluté sont liés au milieu poreux lui-même. Premièrement, la friction due à la viscosité du fluide entraîne une hétérogénéité des vitesses à l'intérieur de pore, la répartition des vitesses suit une forme parabolique, la vitesse est maximale au milieu de pore. Deuxièmement, la différence des dimensions (ouvertures et longueurs des trajets), et aussi, les particules suivent des chemins plus ou moins sinueux, ce qui engendre une variation des vitesses moyennes d'un pore à un autre. Et enfin, la fluctuation des lignes du courant autour de la direction principale de l'écoulement due aux hétérogénéités dans le milieu poreux. Ces principaux facteurs sont résumés dans la figure (I.5) ci-après :

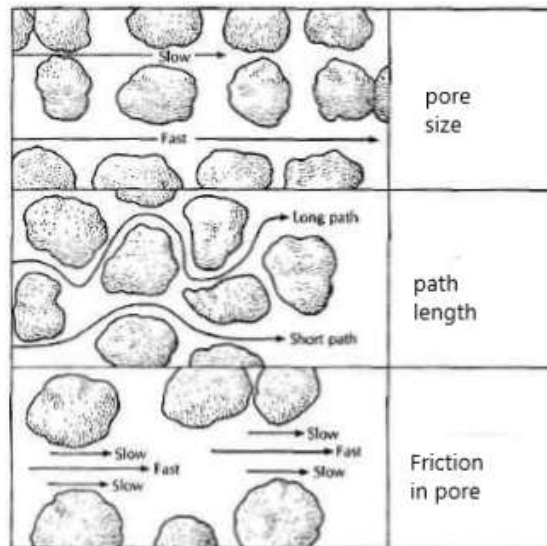


Figure (I.5) : Facteurs influençant une dispersion longitudinale à l'échelle de pore (Ahfir, 2006)

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

$$\bar{\bar{D}}' = \begin{pmatrix} D_L' & 0 & 0 \\ 0 & D_T' & 0 \\ 0 & 0 & D_T' \end{pmatrix} \quad (\text{I.21})$$

Où, D_L' : Coefficient de dispersion cinématique longitudinal dans le sens de l'écoulement. D_T' : Coefficient de dispersion transversal, dans les deux plans perpendiculaires à l'écoulement.

I.4.4. La dispersion hydrodynamique

la dispersion hydrodynamique dans un milieu poreux c'est le processus par lequel la concentration en soluté non réactif d'un fluide diminue avec la distance de transport, cette diminution est le résultat de l'association de la diffusion moléculaire et la dispersion cinématique, c'est pourquoi elles sont généralement décrites par une équation unique, la loi de diffusion de Fick, avec un coefficient de diffusion commun D appelé coefficient de dispersion hydrodynamique, regroupant le coefficient de diffusion moléculaire D_0 et la dispersion cinématique D' [14]:

$$D_L = D_L' + D_0 \quad (\text{I.22})$$

$$D_T = D_T' + D_0 \quad (\text{I.23})$$

Où, D_L et D_T sont respectivement les coefficients de dispersion hydrodynamique longitudinale et transversale. Scheidegger (1961), a établi que la dispersion cinématique est proportionnelle au module de la vitesse linéaire de Darcy (U) [17].

$$D_L' = \alpha_L |U| \quad (\text{I.24})$$

$$D_T' = \alpha_T |U| \quad (\text{I.25})$$

α_L : représente la dispersivité longitudinale ; et α_T : est la dispersivité transversale (sur les deux plans perpendiculaires à l'écoulement).

La variation de la concentration dans le temps et l'espace est due uniquement à la dispersion dans un milieu poreux peut s'écrire :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(\bar{\bar{D}} \overrightarrow{\text{grad}C}) \quad (\text{I.26})$$

I.4.5. L'équation d'advection-dispersion

L'équation qui décrit le transport d'un soluté inerte (conservatif), dite ADE (Advection-dispersion equation), dans un milieu poreux homogène, isotrope et saturé, et dans lequel la loi de Darcy est valide, s'écrit [5,17,18,20]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(\bar{\bar{D}} \overrightarrow{\text{grad}C} - C\vec{U}) \quad (\text{I.27})$$

Avec :

- C : Concentration en solution de l'espèce considérée ;
- U : Vitesse moyenne du fluide (dans les pores).

Cette équation est à la base de traitement du transport, elle intègre les phénomènes d'advection, de diffusion moléculaire et de la dispersion cinématique.

1.4.5.1. Les conditions initiales et aux limites

Les conditions initiales doivent être spécifiées sur tous les points de domaine, elles représentent: la charge initiale ; la pression et la concentration initiale dans le domaine [20].

Les conditions aux limites sont de trois types :

- ❖ de type Dirichlet (concentration imposée) : lors de l'injection d'un soluté sur une surface, elle sera immédiatement soumise à une concentration C_0 .
- ❖ de type Neumann : elle impose un gradient de concentration.
- ❖ de type Cauchy : elle exprime le flux de continuité de la solution et de la concentration à l'entrée du domaine.

I.5. Couplage écoulement- transport

Le couplage des équations d'écoulement et de transport est représenté dans un organigramme comme le montre la figure (II.6). Pour résoudre le problème de transport il faut connaître le champ de vitesse en résolvant l'écoulement (résolution de la loi de Darcy) qui permet ensuite la résolution de l'équation Advection-Dispersion du transport.

Ce couplage écoulement-transport est valable dans le cas d'un écoulement à charge constante d'un fluide incompressible dont les processus du transport n'affectent pas l'hydrodynamique.

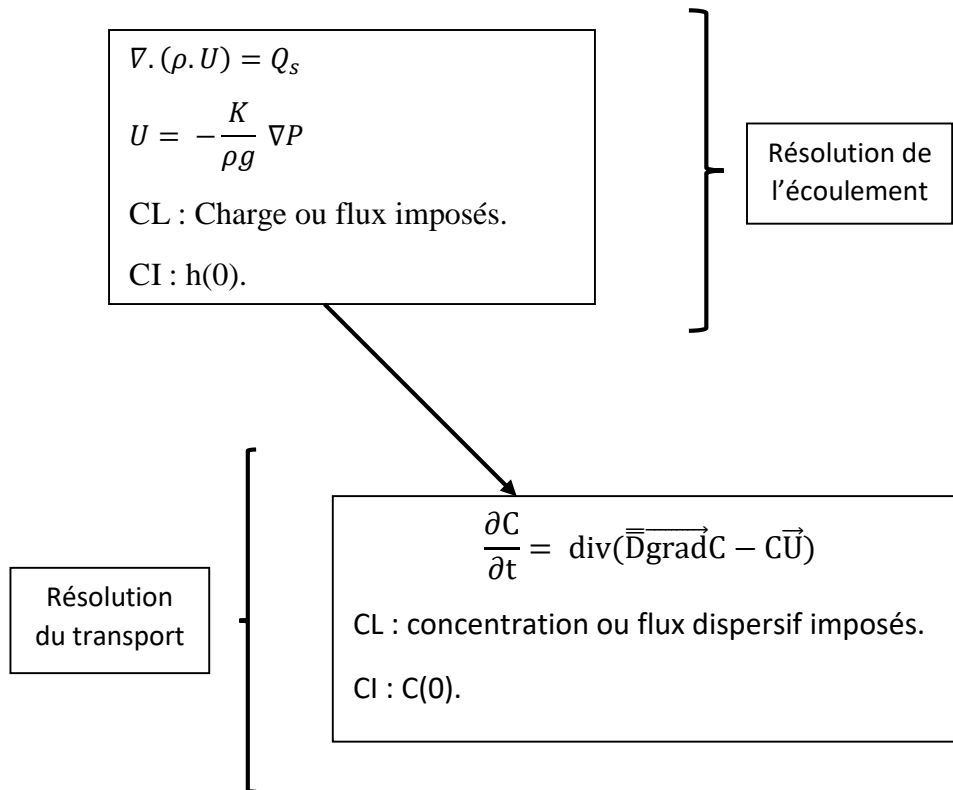


Figure (I.6) : Organigramme de couplage écoulement-transport

I.6. Travaux effectués

Les études de transport de polluants dans les milieux poreux ne sont pas nombreuses, les études faites dans ce contexte ne sont pas complètes, chaque travail est une contribution à l'amélioration de la connaissance et de la maîtrise de ce phénomène.

(Hoteit, 2002) a fait une étude sur l'écoulement et le transport de polluants en milieu poreux, l'objectif de cette étude était de développer des outils numériques fiables pour la gestion des eaux souterraines et la prévision de la propagation des polluants dans les milieux poreux. Pour résoudre l'équation de transport, il a utilisé la méthode des éléments finis mixte hybrides pour approcher le terme dispersif, et la méthode des éléments finis discontinus pour l'approche du terme convectif. Ensuite, cette méthode a été utilisée pour résoudre les deux cas tests Couplex 2 et 3 proposés par l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs [9].

(Danquigny, 2002) a mené une étude expérimentale sur le transfert de masse en milieu poreux hétérogène sur un modèle d'analyse et de recherche sur la contamination des eaux souterraines (MARCEAUS). Le but de ce travail était la détermination des paramètres équivalents d'un milieu poreux (perméabilité ; dispersivité et vitesse du pore) à grande échelle à partir d'un modèle expérimental au laboratoire. Cette étude est l'une des rares études en tridimensionnel, les résultats expérimentaux obtenus ensuite simulés avec le code TRACES. A la fin de ce travail, Danquigny conclut que le calcul de la concentration avec TRACES ne correspond pas aux mesures effectuées expérimentalement [16].

(Besnard, 2003) a fait une étude dans le but de déterminer les lois macroscopiques de transport réactif dans un milieu poreux hétérogène. Cette étude s'est concentrée sur le processus d'adsorption cinétique non linéaire. Elle a montré d'après la modélisation numérique faite que le comportement d'un soluté soumis à une sorption non linéaire n'a pas d'effets sur le panache de la pollution par rapport aux solutés soumis à une sorption linéaire. Besnard dans ce même travail, a fait une étude expérimentale dont le milieu poreux est représenté par un milieu constitué principalement des billes en verre, pour suivre l'intensité du colorant injecté un laser numérique a été utilisé. Les résultats obtenus de cette expérience n'étaient pas satisfaisants à cause de la transparence du milieu et l'arrangement des billes [17].

(Ahfir, 2006) dans son étude des mécanismes de transport et la cinétique de dépôt des particules, dans le but de la caractérisation des différents mécanismes de transport dans les milieux poreux, a effectué des expériences sur des colonnes. Les essais de traçage dans cette étude ont été réalisés sur milieu poreux naturel (gravier) et sur un milieu poreux artificiel constitué principalement des billes en verre sphériques. Pour approcher le cas d'une nappe captive les colonnes ont été placées horizontalement. Les résultats issus des expériences ont été bons par rapport aux résultats théoriques basés sur la solution de l'équation advection convection avec la cinématique de dépôt [14].

(Höhener, 2010) a fait une modélisation des panaches de pollution dans les nappes phréatiques, dans cette étude le code MODFLOW a été utilisé, ce logiciel est basé sur la méthode des différences finies. Ce code a été utilisé MODFLOW pour calculer l'écoulement dans la nappe phréatique étudiée. En utilisant le code MT3D couplé avec MODFLOW, Höhener a calculé le transport de la pollution dans la nappe. Dans le cadre de la même étude, une modélisation de panache de vapeur (Hexane) est faite avec le code MOFAT qui est un code à 2D basé sur la méthode des éléments finis. Les résultats sont comparés aux observations enregistrées dans une base d'une pollution contrôlée, les prédictions avec cette modélisation ont bien représenté les données observées après plusieurs mois [12].

(Seghir, 2013) a fait une modélisation numérique de la propagation de la pollution dans son études des transferts de pollution rivière-nappe phréatique, cette modélisation consistait à la simulation en bidimensionnel avec le code COMSOL Multiphysics de l'évolution de la pollution dans une nappe phréatique en tenant compte du rabattement de la nappe et la présence d'un puits de pompage, Ce modèle a été ensuite utilisé pour la détermination de l'influence de la perméabilité et le coefficient de diffusion sur le transport de la pollution. Cette étude a montré que pour les sols de faible perméabilité la propagation de la pollution est proche de la surface, d'après cette étude on conclut aussi que le coefficient de diffusion est un paramètre important pour l'estimation de devenir de la pollution [20].

(Ikni, 2014) a simulé la pollution dans la nappe Sébaou, le couplage de la partie hydrodynamique au modèle de transport de la pollution avec le code COMSOL Multiphysics, a permis de suivre en 2D l'évolution de la propagation d'un traceur conservatif dans la nappe Sébaou. Le modèle numérique a permis aussi d'estimer le temps nécessaire pour que la pollution atteigne la mer méditerranée [15].

I.7. Conclusion

Les équations de l'hydrodynamique et de transport dans les milieux poreux que nous avons présentées dans ce chapitre sont liées aux différentes caractéristiques physiques du sol. Les principales propriétés que nous devons déterminer sont : la perméabilité ; la granulométrie ; la porosité et les coefficients de dispersion.

D'après la recherche bibliographique faite dans ce chapitre, on conclut que l'étude de transport dans les milieux poreux est très complexe et n'est pas encore maîtrisée.

Chapitre II :
Etude expérimentale

II.1. Introduction

L'étude expérimentale consiste à reproduire un phénomène au laboratoire, et tester la validité des hypothèses et des modèles numériques. Dans ce chapitre on propose d'étudier expérimentalement l'évolution de la concentration d'un polluant se propageant dans un modèle d'une nappe libre muni de plusieurs puits d'observation et d'un puits de pompage au niveau de laboratoire d'hydrologie.

Dans ce chapitre, nous aborderons deux étapes : la préparation du modèle expérimental et la description des essais effectués sur le modèle au niveau des laboratoires de l'université de Bejaia.

II.2. Objectif de l'expérience

L'objectif de cette expérience c'est de déterminer la concentration d'un polluant injecté sur la surface, au niveau des puits d'observation en différents instants donnés. Cette expérience nous permettra d'obtenir des données expérimentales nécessaires pour la validation du modèle numérique.

II.3. Le dispositif expérimental

II.3.1. Banc d'essais d'hydrologie H 313

Le dispositif expérimental est un appareil d'hydrologie ayant comme dimensions 1450*1050*1500mm et poids net de 340kg, il comporte un bassin de dimension 2000*1050mm pouvant contenir jusqu'à 200mm du sable (Bulletin technique du banc d'essais H 313), le dispositif est représenté dans la figure (II.1) suivante :



Figure (II.1) : Le dispositif expérimental

II.3.2. Caractéristiques du banc

- 20 Prises de pression situées le long de la ligne médiane du bassin, comportant des joints à rainure pour empêcher l'entrée de sable (les distances entre les piézomètres sont données dans l'annexe 01);

- 2 sources d'alimentation aux deux extrémités et des manchons trop-plein réglables permettant de spécifier les charges en amont et en aval ;
- 2 Puits de diamètre 30mm sur l'axe longitudinal ;
- Un réservoir de 220 litres et de la tuyauterie pour former un système d'alimentation fermé ;
- Un mécanisme d'inclinaison (jusqu'à 40%) ;
- Et, nous avons implanté des piézomètres qui nous permettront de prélever des échantillons pour mesurer la concentration à côté de la ligne médiane du bassin.

La figure (II.2) suivante montre l'emplacement des piézomètres :



Figure (II.2) : Les puits d'observation implantés dans le bassin

II.3.3. Etudes réalisables sur l'appareil

Cet appareil peut être utilisé dans plusieurs cas d'études, on cite :

- Etude de la relation pluie-débit ;
- Etude des écoulements souterrains ;
- Etude des lignes de partage des eaux.

II.4. Propriétés physiques du milieu

Pour la caractérisation du sable que l'on a utilisé dans cette expérience, nous avons procédé par une série de mesures et calculs qui ont pour but l'identification de milieu.

II.4.1. L'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique sert à déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leurs dimensions. Dans notre cas, il s'agit d'un sable, donc l'analyse granulométrique par tamisage est recommandée. Le tamisage se fait à l'aide d'une série de tamis montés les uns sur les autres dans l'ordre décroissant des ouvertures,

Pour cette étude, nous avons utilisé l'agitateur électrique au laboratoire de mécanique des sols, comme le montre la figure (II.3), il est composé de 8 tamis dont les diamètres sont les suivants : 2.5, 2.0, 1.25, 1.0, 0.63, 0.4, 0.2 et 0.04mm. Au fond de la colonne est placé un bac destiné à recevoir les particules qui passent à travers les mailles du dernier tamis.



Figure (II.3) : Agitateur électrique

Dans cette expérience, nous avons pris une quantité représentative d'un échantillon de sable, les particules les plus fines ont été éliminées par lavage de l'échantillon avec l'eau.

Pour un tamisage par voie sèche, cet échantillon a été mis dans une étuve à 105°C pendant 24 heures. Après le séchage, la quantité du sable à tamiser est égale à 2065g.

Nous avons ensuite mis en marche la tamiseuse pendant 10 minutes.

En utilisant une balance électrique (figure (II.4)), nous avons pesé les refus de chaque tamis, la quantité de sable que l'on a récupéré de bac de fond est nulle, donc le diamètre des grains du sable est supérieur à 0.04mm.



Figure (II.4) : La balance électrique utilisée

Les résultats de l'expérience, ainsi que les calculs effectués sont donnés dans le tableau (II.1) suivant :

Tableau (II.1) : Mesures et calculs effectués pour l'analyse granulométrique

Diamètre des tamis (mm)	Refus (kg)	Refus cumulés (kg)	Refus %	Refus cumulés%	tamisât cumulés %
2.5	0.03	0.03	1.45	1.45	98.54
2	0.135	0.165	6.53	7.99	92.00
1.25	0.475	0.64	23.00	30.99	69.00
1	0.17	0.81	8.23	39.22	60.77
0.63	0.315	1.125	15.25	54.48	45.52
0.4	0.415	1.54	20.10	74.58	25.42
0.2	0.41	1.95	19.85	94.43	5.57
0.04	0.115	2.065	5.57	100	0

A partir des résultats de ce tableau, nous avons tracé la courbe granulométrique (figure (II. 5)), elle représente le pourcentage des tamisât cumulés (échelle arithmétique) en fonction du diamètre des tamis en mm (échelle logarithmique) [22].

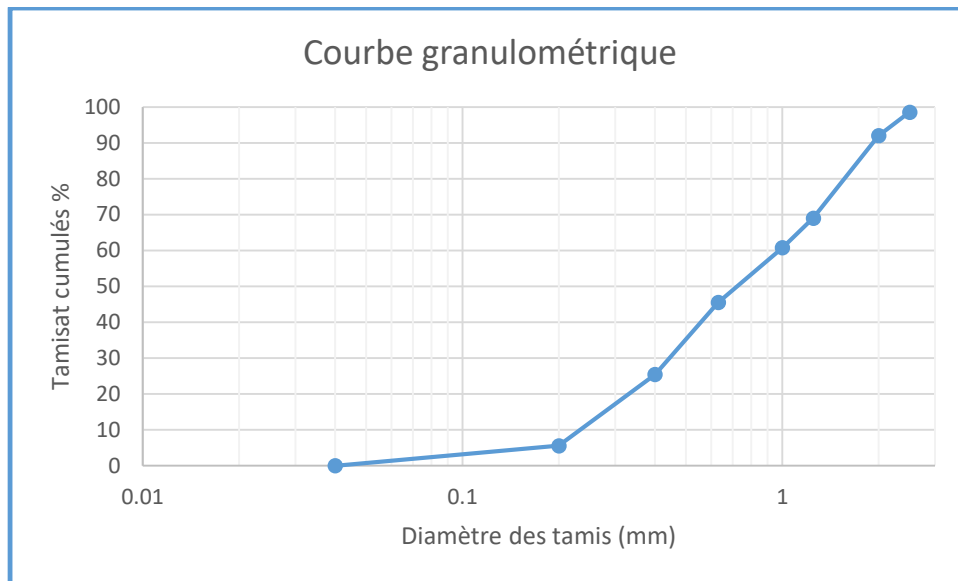


Figure (II. 5) : La courbe granulométrique du sable utilisé

Cette courbe nous permet de préciser le degré d'étalement de la granulométrie du sable utilisé en déterminant le coefficient de HAZEN C_u .

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- D_{60} : le tamis correspondant à 60% du passant cumulé sur la courbe granulométrique;
- D_{10} : le tamis correspondant à 10% du passant cumulé sur la courbe granulométrique.

Donc : $C_u = 2.5 < 3$

Le sable utilisé a une granulométrie uniforme.

II.4.2. La perméabilité

La perméabilité c'est la vitesse de l'écoulement d'eau à travers le milieu poreux, nous avons déterminé cette vitesse avec des essais expérimentaux au laboratoire d'irrigation. Pour cette expérience, un perméamètre à charge constante a été utilisé (figure (II. 6)).



Figure (II. 6) : dispositif expérimental de mesure de la perméabilité

Le schéma du dispositif expérimental utilisé est présenté sur la figure (II. 7). Il est constitué d'une colonne de diamètre 93mm remplie du sable sur une hauteur de 200mm. Cette colonne est alimentée à la base pour éliminer l'air dans l'échantillon, avec une alimentation à niveau constant. elle est équipée de 2 piézomètres qui permettent de mesurer la charge imposée sur un parcours de longueur $l = 160\text{mm}$.

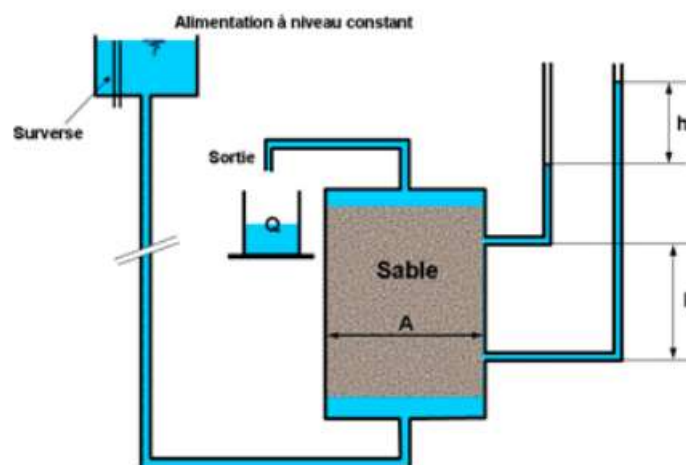


Figure (II. 7) : Perméamètre à charge constante

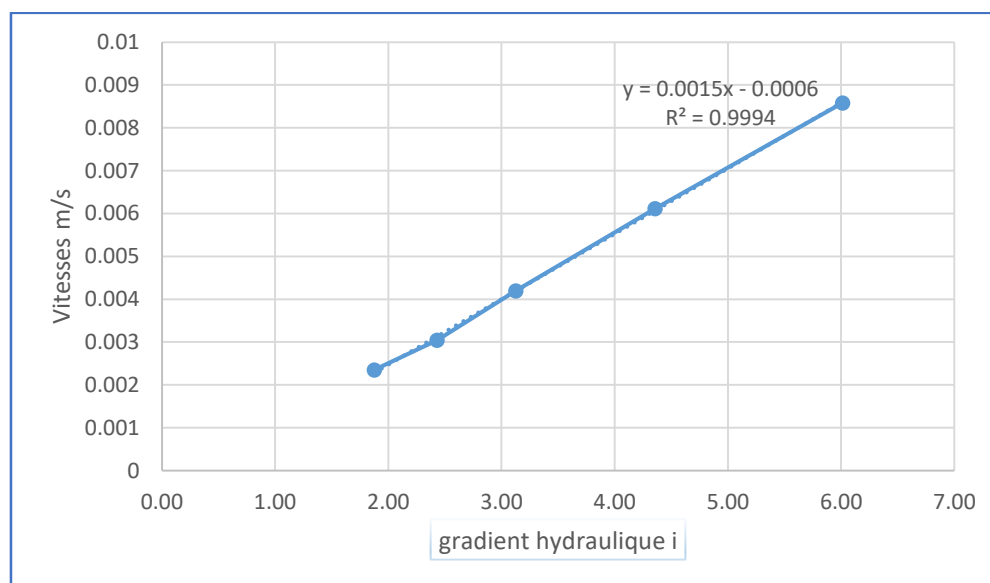
On mesure la quantité d'eau percolant dans l'échantillon pendant un temps donné t en utilisant un bécher gradué et un chronomètre, et on fait la lecture sur les deux piézomètres. Les mesures pour 5 différentes hauteurs du réservoir sont données dans le tableau (II. 2) ci-après :

Tableau (II. 2) : Mesures effectuées pour la mesure de la perméabilité

h1	h2	dh(m)	dv(m ³)	dt(s)	Q(m ³ /s)	A(m ²)	v(m/s)	l(m)	i=dh/l
0.3	0.675	0.3	4.93E-05	31.35	1.57E-06	6.70E-	2.35E-	1.60E-	1.88
0.3	0.764	0.389	4.50E-05	22.08	2.04E-06	6.70E-	3.04E-	1.60E-	2.43
0.3	0.857	0.5	4.50E-05	16.02	2.81E-06	6.70E-	4.19E-	1.60E-	3.13
0.3	1.053	0.697	6.20E-05	15.14	4.10E-06	6.70E-	6.11E-	1.60E-	4.36
0.3	1.341	0.962	6.60E-05	11.48	5.75E-06	6.70E-	8.58E-	1.60E-	6.01

Où, dh c'est la différence de hauteur et i est le gradient hydraulique.

Nous avons tracé la courbe des vitesses en fonction du gradient, la courbe est présentée dans la figure (II.8) suivante :

**Figure (II. 8) : La courbe de perméabilité du sable utilisé**

D'après la courbe, la vitesse varie linéairement en fonction du gradient hydraulique, ce qui implique que le régime de l'écoulement est laminaire. Donc la loi de darcy est valide pour le cas d'un milieu poreux composé du sable choisi.

La pente de cette courbe représente la perméabilité du sable [23]. Pour notre cas, $K = 0.0015\text{m/s}$.

II.4.3. La porosité

La détermination de la porosité a été faite simplement en utilisant deux béchers gradués. D'abord, un échantillon du sable utilisé pour remplir le bassin du modèle est mis dans l'étuve pour son séchage, nous avons mesuré le volume total occupé par le sol, et mesuré aussi le volume de l'eau versée dans le récipient contenant ce sol jusqu'à saturation. Les mesures effectuées dans le but de déterminer la porosité sont montrés dans le tableau (II.3) suivant :

Tableau (II.3) : Mesures effectuées pour la détermination de la porosité

Essai N°	Volume total (ml)	Volume d'eau (ml)
1	1200	380
2	1400	440

$$n_{\text{moy}} = \frac{1}{2} (n_1 + n_2) \quad (\text{II.2})$$

$$n_{\text{moy}} = \frac{1}{2} \left(\frac{380}{1200} + \frac{440}{1400} \right)$$

$$n = 0.32$$

La porosité du milieu est de 32%.

II.4.4. Le remplissage du bassin

Le remplissage du bassin a été fait dans les conditions de saturation. Avant de déverser le sable, une quantité d'eau est versée dans le bassin dans le but d'évacuer l'air et chasser les bulles d'air éventuellement présentes (figure (II.9)). Le remplissage s'est fait en couches, chaque couche est légèrement compactée à la main pour assurer une compacité uniforme.



Figure (II.9) : Remplissage du bassin

Une fois le modèle est mis en place, nous avons mis en marche le système d'alimentation et ouvert les sorties des deux puits centraux. Et, on a laissé l'eau s'écouler à travers le milieu poreux vers les puits jusqu'à ce que l'eau est devenue claire.

II.5. Hypothèses

- Le sol est complètement saturé ;
- Milieu homogène et isotrope ;
- Répartition hydrostatique des pressions ;
- L'écoulement est permanent ;
- Le substratum est horizontal ;
- La source de la pollution n'influe pas sur le débit de l'écoulement ;
- Les effets de capillarité sont négligés.

II.6. Etude de l'écoulement souterrain

En raison de piégeage éventuel de la pollution dans le milieu lors du premier essai, qui influencera sur la concentration dans les prochains essais, et la difficulté de reconstruire le modèle, il est nécessaire d'effectuer un seul essai. Donc il faut traiter un seul cas.

II.6.1. Ecoulement vers un puits dans une nappe libre

Cet écoulement est caractérisé par deux charges identiques en amont et en aval $h_1=h_2= 0.194\text{m}$. L'écoulement se fait vers un seul puits, la charge imposée au niveau de ce puits est 0.122m .

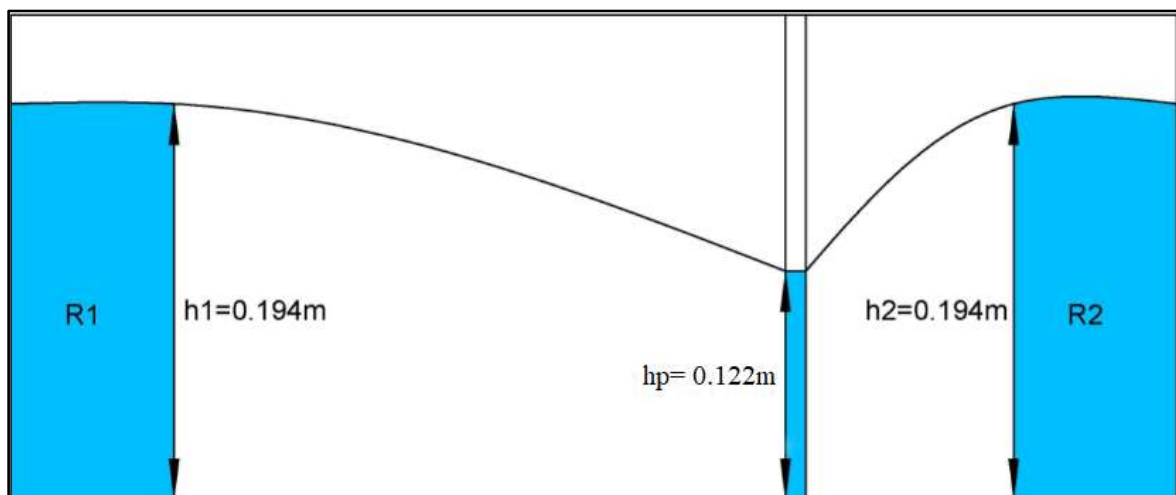


Figure (II.10) : Ecoulement vers un puits à deux charges identiques

II.6.1.1. Mesure de débit

Le débit est la quantité d'eau qui s'écoule à travers une section (puits) par une unité de temps.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

- Q : Débit ;
- V : Volume ;
- t : Temps.

Pour mesurer le débit sortant de la nappe à travers le puits, nous avons utilisé un béccher pour recueillir l'eau pendant un certain temps mesuré par le chronomètre. Les mesures effectuées et les calculs sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau (II.4) : Mesures et calculs effectués pour la détermination du débit

N° d'essai	1	2	3	4	5
Temps (s)	34.79	37.32	29.5	32.93	40.47
Volume (ml)	340	360	300	320	390
Débit (ml/s)	9.772923	9.646302	10.16949	9.717583	9.636768

Le débit moyen de l'écoulement est : $Q=9.79 \text{ ml/s} = 9.79 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

II.6.1.2. La ligne piézométrique

La prise de mesure des hauteurs d'eau à l'intérieur du milieu se fait à l'aide des piézomètres installés le long du modèle, et qui sont fixés sur une table munie de règles comme montré dans la figure suivante :

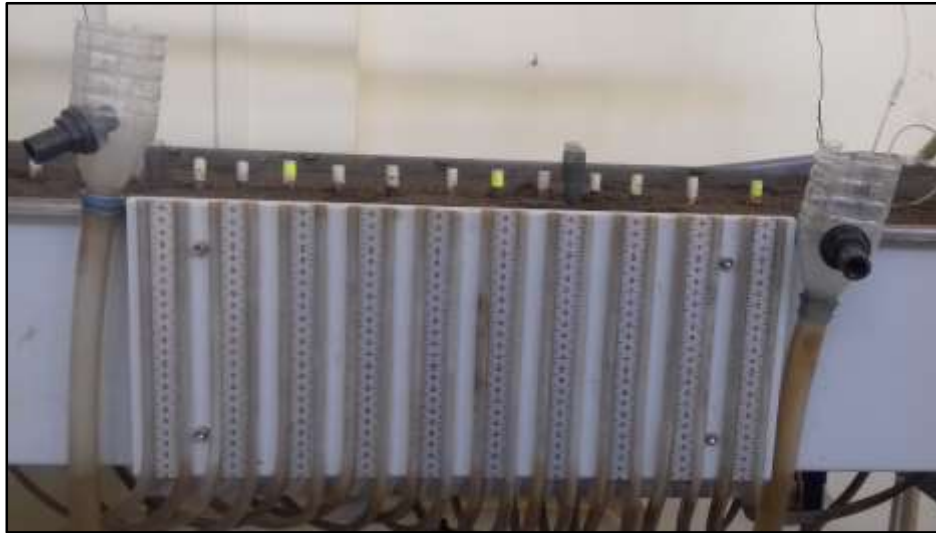


Figure (II.11) : Mesure du niveau d'eau dans les piézomètres

II.7. Etude de transfert de la pollution

II.7.1. Choix du polluant

L'élément choisi comme polluant dans cette étude c'est le Plomb (Pb^{++}), ce choix est justifié en premier lieu par la disponibilité. Il répond à deux critères essentiels ; d'une part le plomb est un élément toxique portant des effets considérables pour l'environnement et la santé humaine ; et d'autre part les techniques de dosage du Plomb sont connues et disponibles.

Le Plomb (symbole dans le tableau périodique des éléments: Pb) est un élément métallique de numéro atomique 82 et de masse atomique 207.2g/mol (métal lourd).

II.7.2. La concentration massique

La concentration massique d'un soluté en solution est le rapport de la masse de ce soluté au volume total de la solution, cette concentration est calculée avec la formule suivante :

$$C_m = \frac{m}{V} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- C_m : La concentration massique ;
- m : La masse de soluté ;
- V : Le volume total de la solution.

Nous avons dissout une quantité du plomb égale à 588 mg dans 0.5 litre d'eau distillée. Donc la concentration massique obtenue est $C_m = 1176 \text{ mg/l}$.

II.7.3. La mole

La mole est la quantité de matière d'un système. Elle est définie comme le nombre d'atomes que contient 12 grammes de carbone 12, une mole d'atomes contient environ $6.02 \cdot 10^{23}$ atomes, ce nombre est dit nombre d'Avogadro (N_A).

II.7.4. La concentration molaire

La concentration molaire ou la molarité est la quantité de matière de soluté dissout par litre de solution. Elle est exprimée par la formule :

$$C = \frac{n}{V} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

- C : La concentration molaire en mol/l ;
- n : La quantité de matière en mol ;
- V : Le volume total de la solution en litres.

La quantité de matière n est définie comme le rapport de la masse de cette matière à la masse molaire de l'élément considéré :

$$n = \frac{m}{M} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

- m : La masse en (g) ;
- M : la masse molaire en (g/mol).

La quantité de matière contenue dans 588 g de Plomb, dont la masse molaire est 207.2 g/mol égale à 2.838 mol

Donc la concentration molaire de la solution utilisée comme polluant est $C = 5.676$ mol/l.

II.7.5. Injection de la solution concentrée

Nous avons mis les 500 ml de la solution concentrée dans une bouteille de 5 litres, ce qui permet d'avoir une hauteur faible dans le récipient, donc la variation du débit due à la variation de la hauteur est négligeable. La bouteille est munie d'un tube ayant un régulateur de débit pour assurer un débit faible et constant, le dispositif est montré dans la figure suivante :



Figure (II.12) : Injection de la solution concentrée dans le milieu poreux

L'écoulement de la solution polluante est permanent, le temps ($t = 0$ seconde) de cette étude est considéré le début de l'injection. nous avons injecté un volume de 465ml pendant 20 minutes.

II.7.6. Le prélèvement

Le prélèvement est l'opération la plus sensible de cette expérience, il consiste à extraire une quantité d'eau à partir des 6 piézomètres choisis comme points de control. Pour ce fait, nous avons utilisé des seringues pour le prélèvement. Chaque quantité prélevée est stockée dans une bouteille pour la préparer à l'analyse.

Le prélèvement ainsi que les outils utilisés sont montrés dans la figure (II.12) suivante :



Figure (II.13) : Prélèvement des échantillons au niveau des piézomètres

Pour chacun des laps du temps choisis, les prélèvements sont faits au même temps.

II.7.7. La filtration

Les échantillons prélevés contenaient des matières en suspension, ce qui augmente considérablement leur turbidité.

La plupart des appareils de détection et/ou estimation de la concentration des espèces chimiques au laboratoire nécessitent une eau non turbide. La filtration consiste à éliminer toutes les particules en suspension dans les échantillons. Pour cela, nous avons utilisé un papier filtre (Figure (II.14)), le papier filtre possède des micropores qui ne laisse passer que les particules d'eau et de Plomb.



Figure (II.14) : La filtration des échantillons

Pour la détermination de la concentration des filtrats nous avons opté pour l'analyse chimique des filtrats par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) au niveau de laboratoire d'analyse par SAA au département de génie des procédés.

II.8. La spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA)

II.8.1. Définition

C'est une méthode d'analyse physico-chimique servant pour la détermination de la concentration des éléments métalliques et non métalliques (plus de 70 éléments), la sensibilité importante de l'appareillage permet de quantifier des éléments à l'état de trace (p.p.m) et même à l'état d'ultra trace (p.p.b) [24]. Le spectromètre utilisé pour l'analyse chimique dans notre étude est montré dans la figure suivante :



Figure (II.15) : Le spectromètre d'absorption atomique

II.8.2. La détermination de la concentration

II.8.2.1. Courbe d'étalonnage

Pour introduire une courbe d'étalonnage, nous avons préparé une solution mère à 1g/l de Pb, (le solvant c'est l'eau distillée), avec la dilution et en utilisant la relation $C_1.V_1 = C_2.V_2$, nous avons obtenu les six étalons utilisés pour tracer la courbe d'étalonnage.

Les échantillons ont été passés pour l'analyse en deux séries, donc pour chaque analyse nous avons tracé une courbe en passant les étalons l'un après l'autre, la longueur d'onde du plomb est $\lambda = 283.3$ nanomètre. Les concentrations des étalons utilisés et les résultats de leurs absorbances pour les deux cas sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau (II.5) : Concentrations des étalons et absorbances obtenues

N° étalon	1	2	3	4	5	6
C (g/l)	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1
A (série 1)	0.002	0.003	0.003	0.005	0.006	0.007
A (série 2)	0.001	0.002	0.002	0.004	0.005	0.007

Les deux courbes d'étalonnage sont données dans les annexes 02 et 03.

II.8.2.2. dosage par SAA

Pour le dosage du plomb dans les échantillons nous avons suivi les principales étapes suivantes :

- Choisir l'élément à doser (plomb) ;
- Spécifier la longueur d'onde de cette élément ($\lambda(\text{Pb})=283.3 \text{ nm}$) ;
- Choisir la lampe à cathode creuse (numéro correspondant) ;
- Le nombre et les concentrations des étalons ;
- Pour chaque concentration, on introduit le capillaire dans la fiole qui lui correspond pour tracer la courbe d'étalonnage.

Après quelques minutes la ligne de base du signal sera ramenée à zéro et elle sera donc corrigée. Ensuite, il faut introduire le capillaire dans chacun des tubes contenant les filtrats. Les valeurs des concentrations obtenues sont calculées par rapport à l'eau distillée (blanc).

II.9. Les difficultés rencontrées dans l'étude expérimentale

Dans cette étude expérimentale nous avons rencontrés plusieurs difficultés, nous citons principalement :

- Les fuites et la présence des bulles d'air dans le dispositif de détermination de la perméabilité ;
- Absence d'un dispositif de détermination de la porosité (porosimètre), nous avons utilisé une méthode manuelle, mais la valeur trouvée reste approximative ;
- Nous avons opté pour des seringues à aiguilles fines pour prélever les échantillons à des profondeurs déterminées. Malheureusement, elles se sont colmatées. Ce qui a conduit à l'utilisation des seringues munies des tubes pour récupérer des échantillons à partir des puits d'observation implantés (prélèvement manuel) ;
- Pour la filtration des échantillons : Vu le coût élevé des filtres et le nombre important des échantillons, nous avons utilisé un papier filtre, qui est un procédé long, et aussi il retient des particules du plomb ;
- Les analyses des échantillons avec la SAA au niveau d'un autre laboratoire nécessite un programme et impose une limite de nombre d'échantillons à analyser ;
- Manque des appareils de détection instantanée de la pollution au niveau des piézomètres, on a testé plusieurs solutions concentrées comme le sel et le lait, malheureusement le turbidimètre disponible au laboratoire ne détecte pas cette pollution.

Pour le prélèvement des échantillons, il était difficile de pomper simultanément un même volume dans un même instant par différentes personnes en plusieurs points.

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'objectif de l'expérience, et le dispositif expérimental mis en place pour cette étude. Nous avons ensuite décrit les appareils et les techniques utilisées pour caractériser le milieu poreux. Ce milieu a été utilisé pour étudier l'écoulement souterrain vers un puits de pompage, et d'étudier expérimentalement l'évolution d'une pollution dans l'espace et dans le temps. Les résultats obtenus seront représentés dans le chapitre IV.

Dans le chapitre suivant, nous allons développer un modèle numérique avec le logiciel COMSOL Multiphysics , un modèle dans lequel nous simulerons cette étude avec les mêmes caractéristiques.

Chapitre III :
Simulation numérique

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons reproduire les deux phénomènes que l'on a étudiés dans le chapitre précédent sur un modèle numérique. Ce chapitre se compose de trois étapes principales, nous allons d'abord présenter le logiciel COMSOL Multiphysics que nous avons choisi pour cette étude, ensuite nous allons simuler l'écoulement souterrain et enfin reproduire le phénomène de transport de la pollution sur le modèle numérique.

Le but de cette simulation est de tracer la ligne d'eau et la détermination du champ de vitesse pour l'étude de l'écoulement, et de déterminer la concentration de la pollution dans la nappe pour l'étude du transport.

III.2. Le logiciel COMSOL Multiphysics

COMSOL est un logiciel de simulation numérique et de résolution des systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP). Ce code est basé sur la méthode des éléments finis, il permet la simulation d'un système multiphasiques (cas compliqués) et le couplage des physiques simples.

Le logiciel COMSOL a été créé en 1986 par les étudiants de Germunt Dahlquist à l'institut de royal de technologie à Stockholm en suède, sa première version est sortie en 1998 [1].

La bibliothèque du COMSOL comprend une variété de modules d'application dans plusieurs domaines (mécanique ; chimie ; écoulement...), chaque module comprend des branches, et la branche à son tour est composée des interfaces. La figure suivante montre la bibliothèque de COMSOL 5.2 (version utilisé dans notre étude).

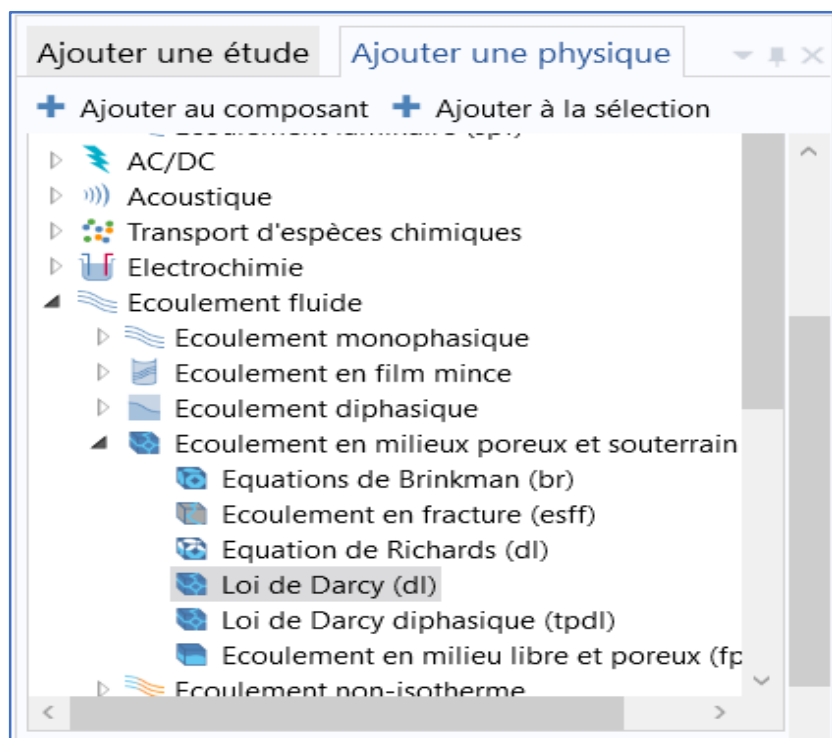


Figure (III.1) : La bibliothèque du COMSOL 5.2

III.2.1. Traitement de l'écoulement dans les milieux poreux

Pour la simulation de l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux, COMSOL propose les six interfaces suivantes : équation de Brinkman (br) ; écoulement en fracture (esff) ; équation de Richards (dl) ; loi de Darcy (dl) ; loi de Darcy diphasique (tpdl) et l'écoulement en milieu libre et poreux (fp).

Dans notre cas, pour la simulation de l'écoulement d'un fluide incompressible dans un milieu poreux saturé, nous avons opté pour l'interface : loi de Darcy (dl).

III.2.2. Traitement de transport de la pollution dans les milieux poreux

Pour la simulation de transport dans le milieu poreux nous avons choisi l'interface : transport d'espèces diluées en milieu poreux (tds), elle contient les mécanismes de transport suivants : Advection ; Migration en présence d'un champ électrique ; Adsorption en milieu poreux ; Dispersion en milieu poreux et la diffusion.

III.3. Construction du modèle

Le système étudié représente un modèle réduit d'une nappe libre, dans le cas d'un écoulement en présence d'un puits, cet écoulement aura des composantes de vitesse suivant les trois directions de l'espace. Ce qui impose le choix de la dimension 3D.

III.3.1. Choix de la physique

La résolution des problèmes de transport des espèces chimiques (pour nous, elles représentent une source pollution) en milieu poreux, nécessite le couplage écoulement-transport. Les interfaces ajoutées sont montrées dans la figure ci-après :

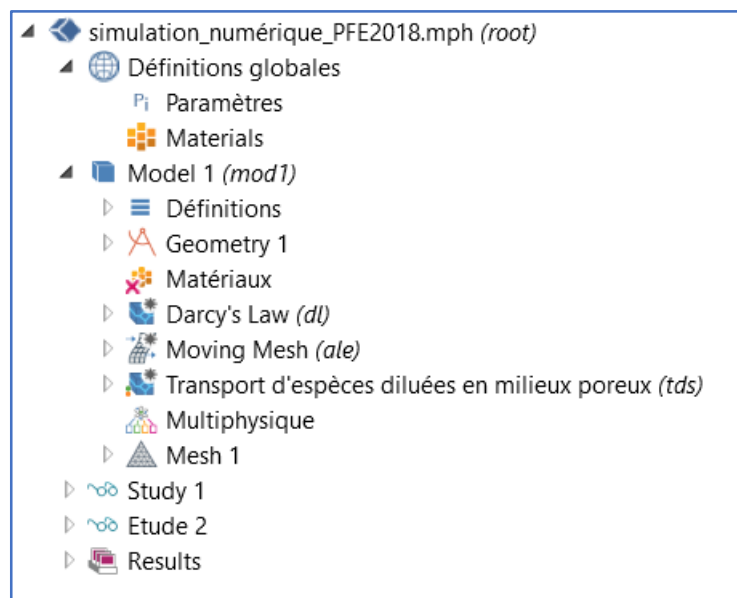


Figure (III.2) : Les interfaces ajoutées pour l'étude

La loi de Darcy (dl) est l'interface qui représente le mieux le phénomène de l'écoulement d'un fluide incompressible dans un milieu poreux saturé, le type de cette étude est stationnaire. Le transport d'espèces diluées dépend de l'espace et le temps, donc nous avons choisi un type d'étude temporel.

III.3.2. Les paramètres du calcul

Les paramètres et caractéristiques physiques et géométriques utilisés dans les calculs sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau (III.1) : Les paramètres et caractéristiques du modèle

Paramètre	Valeur	Description
L	2000[mm]	Longueur
B	1050[mm]	Largeur
H	194[mm]	Hauteur
r_p	15[mm]	Rayon du puits
X_p	300[mm]	x du puits
Y_p	0	y
Z_p	0	z
rho	1000[kg/m ³]	masse volumique de l'eau
n	0.32	porosité
K	0.0015[m/s]	conductivité hydraulique
Q	9.79E-6[m ³ /s]	débit de pompage
X_sp	800mm	x de la source de pollution
Y_sp	30[mm]	Y
z_sp	0[mm]	Z
C ₀	5.6mol/l	Concentration initiale

III.3.3. Les variables dans le calcul

Le tableau suivant montre les variables utilisées pour le calcul de l'écoulement vers un puits :

Tableau (III.2) : Les variables

Paramètre	Expression	description
S	$2 \cdot \pi \cdot r_p \cdot (H - Z_0)$	Section de l'écoulement dans le puits
Z ₀	abs(aveop1(dl.H))	le rabattement au niveau du puits
N ₀	$\rho \cdot Q / S$	Flux massique sortant

III.3.4. La géométrie du modèle

Le système étudié est défini par l'ensemble des géométries suivantes : un bloc ; un cylindre et un cercle, représentant respectivement : la nappe ; le puits et la source de la pollution. La géométrie du modèle et le repère choisi sont donnés dans la figure suivante :

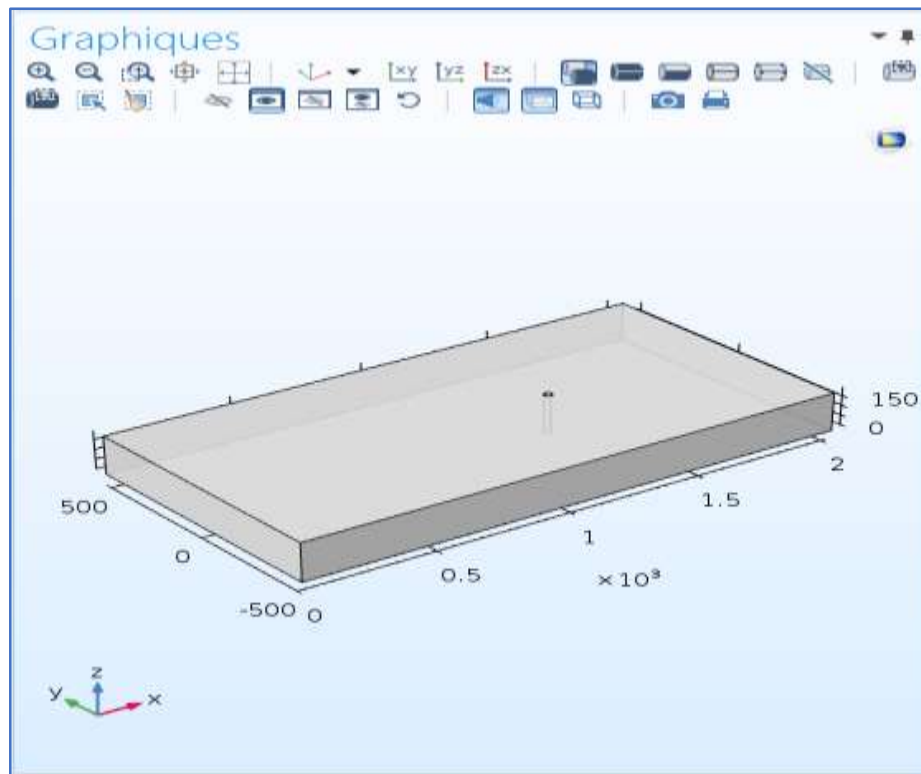


Figure (III.3) : Représentation du modèle en trois dimensions

III.4. La loi de Darcy

III.4.1. Equation du domaine

L'écoulement de l'eau dans le milieu poreux est décrit par la loi de Darcy qui se traduit comme suit :

$$\mathbf{u} = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad (\text{III.1})$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = Q_m \quad (\text{III.2})$$

Avec :

- \mathbf{u} : La vitesse de Darcy ;
- Q_m : le terme source ;
- P : La pression ;
- ρ : La masse volumique du fluide ;
- μ : La viscosité dynamique du fluide.

La perméabilité ; la porosité ; la conductivité hydraulique et viscosité dynamique de l'eau ont été ensuite introduits.

III.4.2. Conditions aux limites du modèle

III.4.2.1. Charge hydraulique

Nous avons introduit deux charges hydrauliques identiques sur les deux entrées du modèle, $H_0=194\text{mm}$ (Figure III.4).

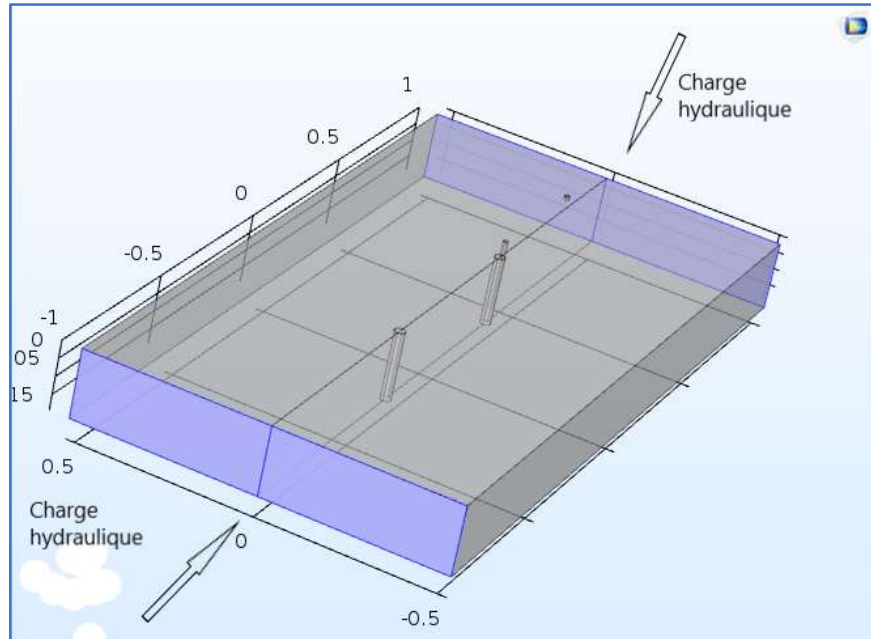


Figure (III.4) : La charge hydraulique

III.4.2.2. Flux nul

Les deux parois latérales ; le fond et la surface libre du modèle sont soumis à la condition « pas d'écoulement », aucun écoulement ne se fait à travers ces sections.

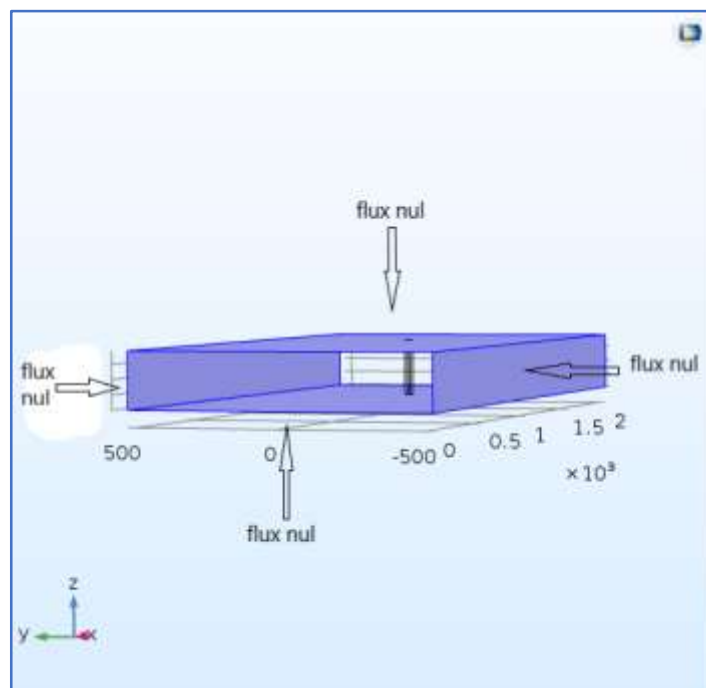


Figure (III.5) : Les sections de flux nul

III.4.3. Conditions initiales

Trois types de conditions initiales peuvent être introduites, la pression ; la charge de pression et la charge hydraulique. Nous avons choisi la condition de pression P sur tout le domaine :

$$P = 0 \text{ Pa.}$$

III.4.3.1. Flux de masse

Le débit de pompage est introduit comme un flux massique N_0 , il représente la masse de l'eau par une unité de surface et par une unité de temps, le pompage s'est fait au niveau du puits comme le montre la Figure(III.6) :

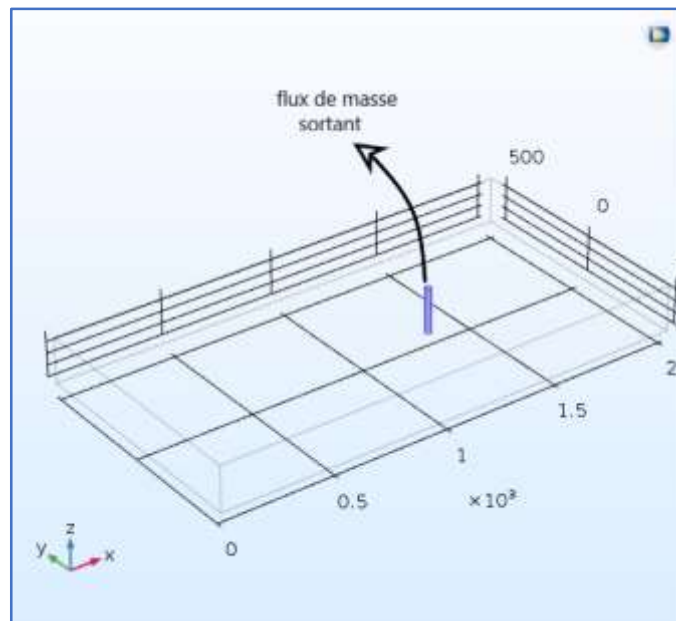


Figure (III.6) : Flux de masse sortant

III.5. Le maillage

Le maillage est la discrétisation spatiale du domaine d'étude. Le maillage utilisé est un maillage contrôlé par la physique, il consiste en éléments tétraèdres de taille normale (Figure II.7).

L'écoulement se fait en rabattement en présence d'un puits. Donc la surface libre n'est pas localisée, ce qui nous impose le choix d'un maillage mobile.

III.5.1. Conditions de déplacement

Pour simuler l'écoulement dans la nappe, les conditions suivantes sont imposées au déplacement du maillage :

- ❖ Un déplacement de la frontière de dessus selon z , $d_z = 100 * (d_l * H - z)$. et nul selon x et y .
- ❖ Un déplacement libre de l'ensemble des frontières latérales selon z , et nul selon x et y .
- ❖ Aucune déformation du maillage selon les trois axes.

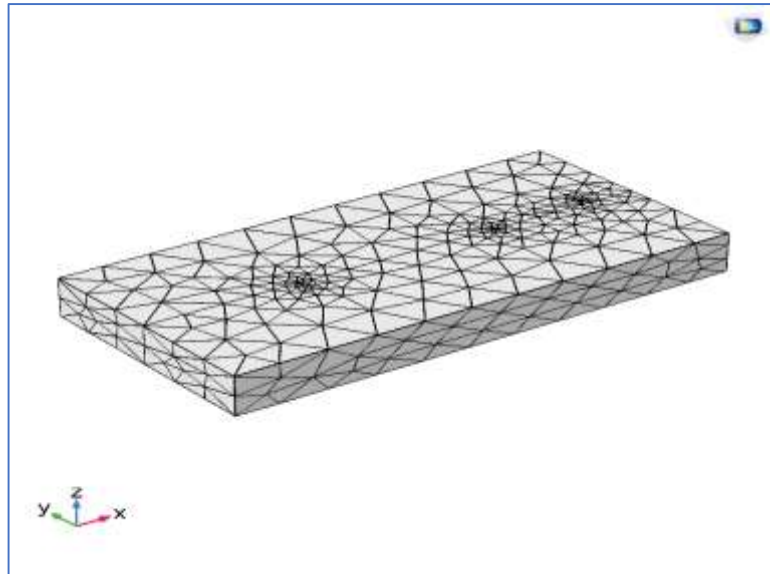


Figure (III.7) : Maillage mobile du domaine de calcul

III.6. Transport d'espèces diluées en milieu poreux

III.6.1. Equation du domaine

Ce modèle décrit le transport des espèces diluées dans milieu poreux avec l'équation suivante :

$$P_{1j} \frac{\partial C}{\partial t} + P_{2j} + \nabla \cdot \Gamma_i + u \nabla c_i = R_i + S_i \quad (\text{III.4})$$

$$\Gamma_i = -(D_{Dj} + D_{ej}) \nabla c_i \quad (\text{III.5})$$

Avec :

- P_{1j} : Facteur de sorption du sol selon la direction j ;
- P_{2j} : Equation cinétique de la réaction chimique ;
- u : la vitesse ;
- c_i : la concentration de l'espèce i ;
- S_i : Un terme source ;
- D_{Dj} : Coefficient de dispersion selon la direction j ;
- D_{ej} : Coefficient de la diffusion moléculaire.

III.6.2. Propriétés de transport

III.6.2.1. La vitesse

La convection est le principal mécanisme du transport dans le milieu poreux, pour le calcul de la variation de la concentration nous avons utilisé un champ de vitesses à partir de la loi de Darcy calculé dans l'étude de l'écoulement.

III.6.2.2. La porosité

Nous avons aussi introduit la valeur de la porosité, $n = 0.32$

III.6.2.3. La diffusion moléculaire

La diffusion moléculaire ne devient importante que dans le cas d'un écoulement lent ($V < 2.78 \cdot 10^{-13} \text{ m/s}$) [15]. Les vitesses obtenues à partir de la simulation de loi de Darcy sont de l'ordre 10^{-4} m/s (Figure (IV.4)). Donc la diffusion moléculaire est négligeable et le coefficient de diffusion égal à 0.

III.6.2.4. La dispersion cinématique

Nous avons choisi un modèle de dispersivité pour introduire la valeur de coefficient de dispersion, ce modèle consiste en deux coefficients : coefficient de diffusivité longitudinale et transversale.

Les valeurs de la diffusivité ne sont pas précises, elles sont liées aux propriétés du milieu (compacité du sol) [15], les valeurs de la diffusivité suivantes sont obtenues avec le calage du modèle numérique aux résultats expérimentaux obtenus au niveau du puits 02 :

$$\alpha_L = 0.5 \text{ m} \text{ et } \alpha_T = 0.005 \text{ m}.$$

III.6.3. Condition initiale

Pour estimer la teneur en Pb initiale du milieu avant l'injection de polluants, nous avons prélevé deux échantillons d'eau sur les puits d'observation. Nous avons fait une analyse chimique avec la SAA, ainsi qu'un échantillon de l'eau utilisée pour l'alimentation. Les concentrations obtenues sont égales à zéro.

La concentration initiale dans le milieu poreux est nulle : $C_0 = 0 \text{ mol/m}^3$.

III.6.3.1. Ecoulement entrant

L'écoulement entrant c'est le flux de concentration entrant à travers une la source de la pollution, il est donné par la formule :

$$C_{0,c} = C_0^*(t < 1200[\text{s}]) \quad (\text{III.6})$$

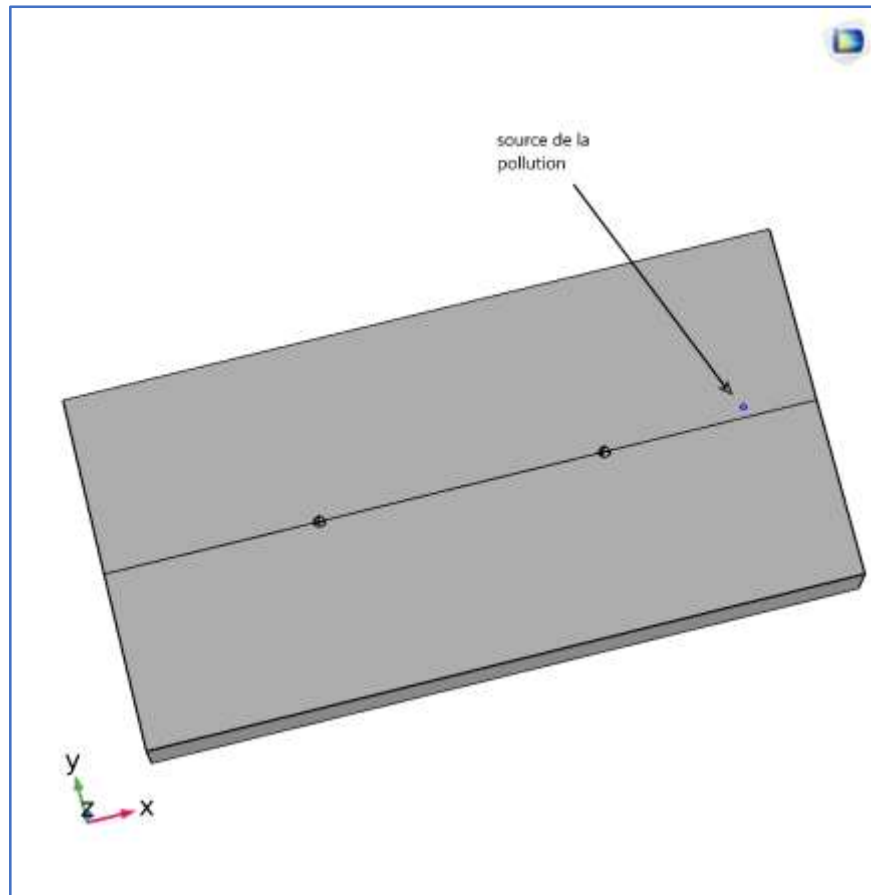


Figure (III.8) : L'écoulement entrant

III.7. Le calage des paramètres

Pour une bonne correspondance entre les données obtenues avec les différentes expériences et les données simulées, nous avons ajusté deux paramètres essentiels : la perméabilité du milieu et les coefficients de la dispersivité.

III.8. Etude temporelle

Pour lancer l'étude temporelle de transport d'espèces diluées en milieu poreux il faut choisir un pas de temps pour le calcul, plus le pas de temps est petit plus les résultats sont précis.

Vu le temps que mis le code COMSOL pour l'exécution des calculs, un pas de temps $dt=1s$ a été choisi, nous avons simulé le transport pendant un temps : $t=65min = 3900s$. la commande introduite est la suivante :

Temps : `range(0,1,3900)`

III.9. Conclusion

En utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics nous avons réalisé une simulation numérique pour le phénomène de transport de la pollution dans un milieu poreux, nous avons utilisé deux interfaces pour la résolution de ce problème : la loi de Darcy qui nous a fourni le champ de vitesse qui est le principal paramètre dans la seconde interface qui est le transport d'espèces diluées en milieu poreux.

Les résultats obtenus ainsi que la discussion et interprétation de ces résultats seront donnés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV :
Résultats et discussions

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons les résultats expérimentaux et numériques obtenus pour les deux études : l'écoulement de l'eau et transport de la pollution dans un milieu poreux. Pour l'étude de l'écoulement nous nous intéressons à la ligne d'eau et nous allons représenter la variation de la charge hydraulique, pour l'étude de transport de la pollution nous allons présenter la variation de la concentration du polluant dans le milieu en fonction de temps.

Ensuite, nous allons discuter et interpréter les résultats obtenus en faisant une étude comparative entre les deux modèles étudiés.

IV.2. Ecoulement souterrain vers un puits de pompage

IV.2.1. Etude expérimentale de l'écoulement

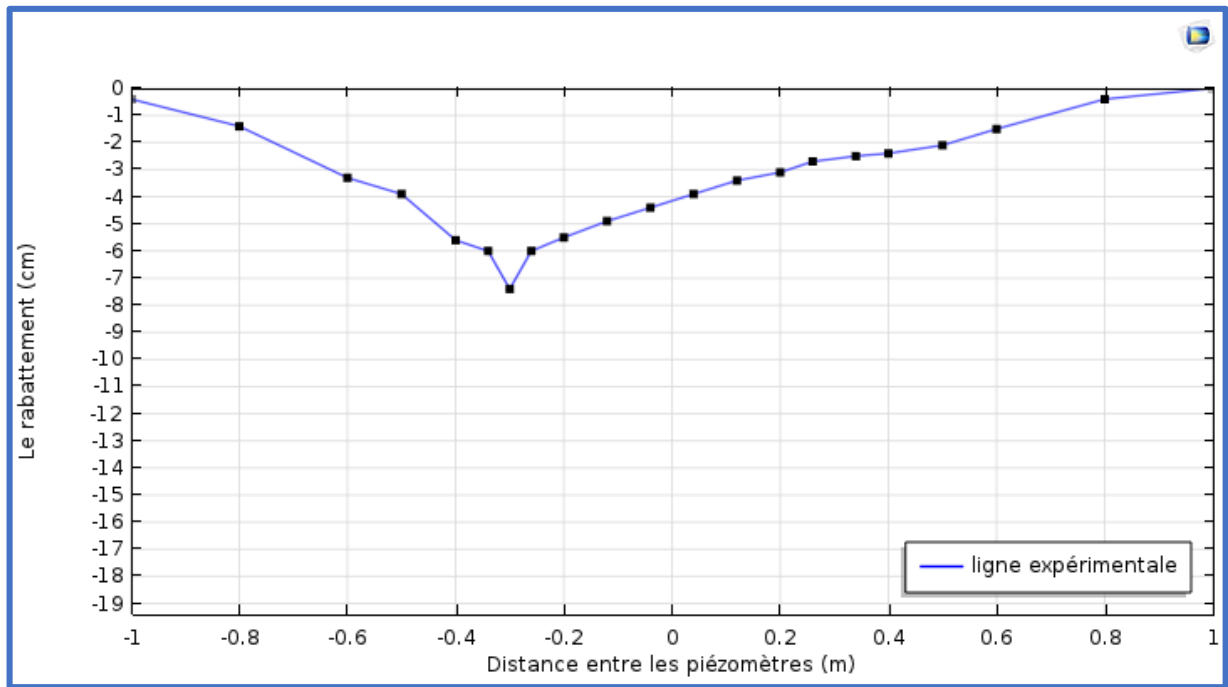
dans cette étude nous avons traité l'écoulement souterrain de l'eau vers un puits de pompage dans un modèle réduit d'une nappe libre, le dispositif expérimental et la procédure ont été présentés dans le chapitre II. Nous avons fixé la charge au niveau de puits à $h_p = 12.2\text{cm}$, et une hauteur d'eau à l'amont et à l'aval identique et égale à 19.4cm .

Les mesures effectuées sont représentées dans le tableau (IV.1) suivant :

Tableau (IV.1) : Les mesures expérimentales de ligne piézométrique

N° du piézomètre	X (m)	Y (m)	Charge (cm)
P1	1	0	19.4
P2	0.8	0	19
P3	0.6	0	17.9
P4	0.5	0	17.3
P5	0.4	0	17
P6	0.34	0	16.9
P7	0.26	0	16.7
P8	0.2	0	16.3
P9	0.12	0	16
P10	0.04	0	15.5
P11	-0.04	0	15
P12	-0.12	0	14.5
P13	-0.2	0	13.9
P14	-0.26	0	13.4
F2	-0.3	0	12.2
P15	-0.34	0	13.4
P16	-0.4	0	13.8
P17	-0.5	0	15.5
P18	-0.6	0	16.1
P19	-0.8	0	18
P20	-1	0	19

Les coordonnées x des piézomètres sont exprimées par rapport au centre du milieu. Ce tableau nous a permis de tracer la ligne piézométrique expérimentale dans la figure (IV.1) ci-après :



Figures (IV.1) : La ligne piézométrique expérimentale

IV.2.2. Etude numérique de l'écoulement

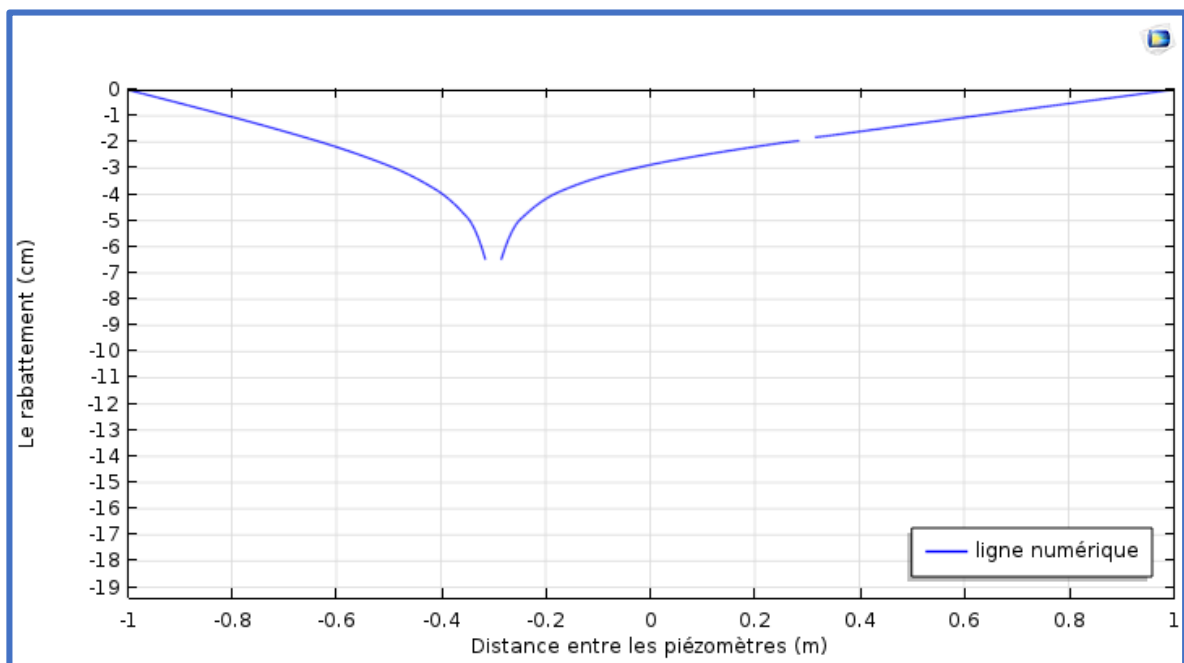
Pour simuler cet essai nous avons utilisé les mêmes paramètres du modèle expérimental, la simulation a duré 4 secondes en temps d'exécution.

Les résultats de la simulation sont donnés dans le tableau (IV.2) suivant :

Tableau (IV.2) : Mesures de la ligne piézométrique obtenues avec la simulation numérique

N° du piézomètre	X(m)	Y(m)	Charge (cm)	Rabattement(cm)
P1	1	0	19.4	0
P2	0.8	0	18.8	-0.6
P3	0.6	0	18.2	-1.2
P4	0.5	0	17.9	-1.5
P5	0.4	0	17.6	-1.8
P6	0.34	0	17.4	-2
P7	0.26	0	17.2	-2.2
P8	0.2	0	16.9	-2.5
P9	0.12	0	16.7	-2.7
P10	0.04	0	16.4	-3
P11	-0.04	0	16	-3.4
P12	-0.12	0	15.4	-4
P13	-0.2	0	14.8	-4.6
P14	-0.26	0	13.5	-5.9
Puits de pompage	-0.3	0		
P15	-0.34	0	13.6	-5.8
P16	-0.4	0	15	-4.4
P17	-0.5	0	16.1	-3.3
P18	-0.6	0	16.9	-2.5
P19	-0.8	0	18.2	-1.2
P20	-1	0	19.4	0

La ligne piézométrique obtenue avec la simulation numérique est donnée dans la figure (IV.2). Ce modèle numérique nous permet d'obtenir la valeur de rabattement en tout point de la nappe, la figure (IV.3) est une représentation de la nappe en 3D.

**Figure (IV.2) : Ligne piézométrique numérique**

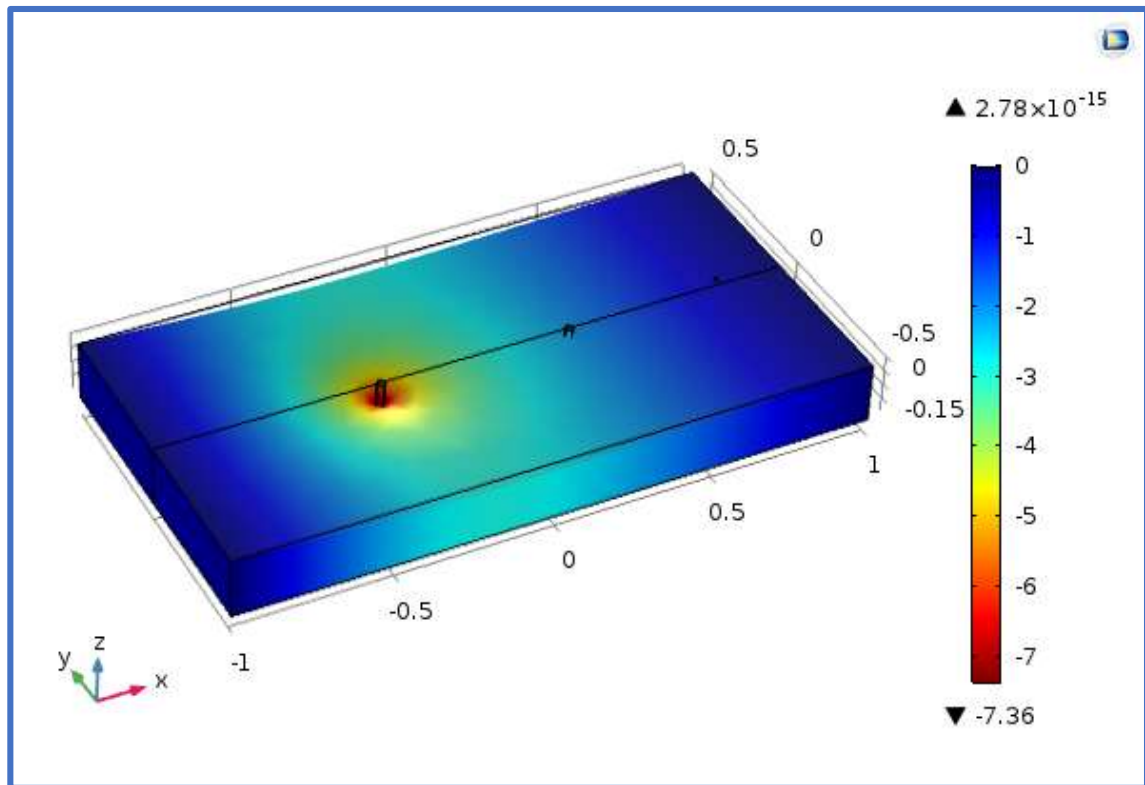


Figure (IV.3) : représentation en 3D du rabattement

Nous avons aussi visualisé le champ de vitesse de Darcy, la figure suivante est une représentation de la vitesse selon la direction de l'écoulement :

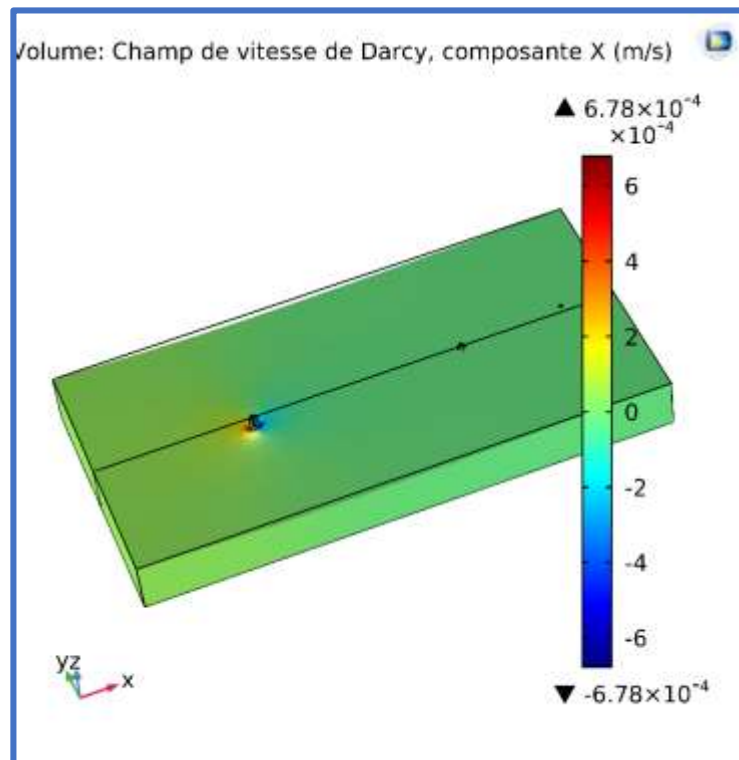


Figure (IV.4) : Champ de vitesse selon la direction de l'écoulement

IV.2.3. Etude comparative

La figure (IV.4) suivante est une représentation des deux lignes expérimentale et numérique sur le même graphe, elle sert à la comparaison entre les résultats donnés par les deux méthodes.

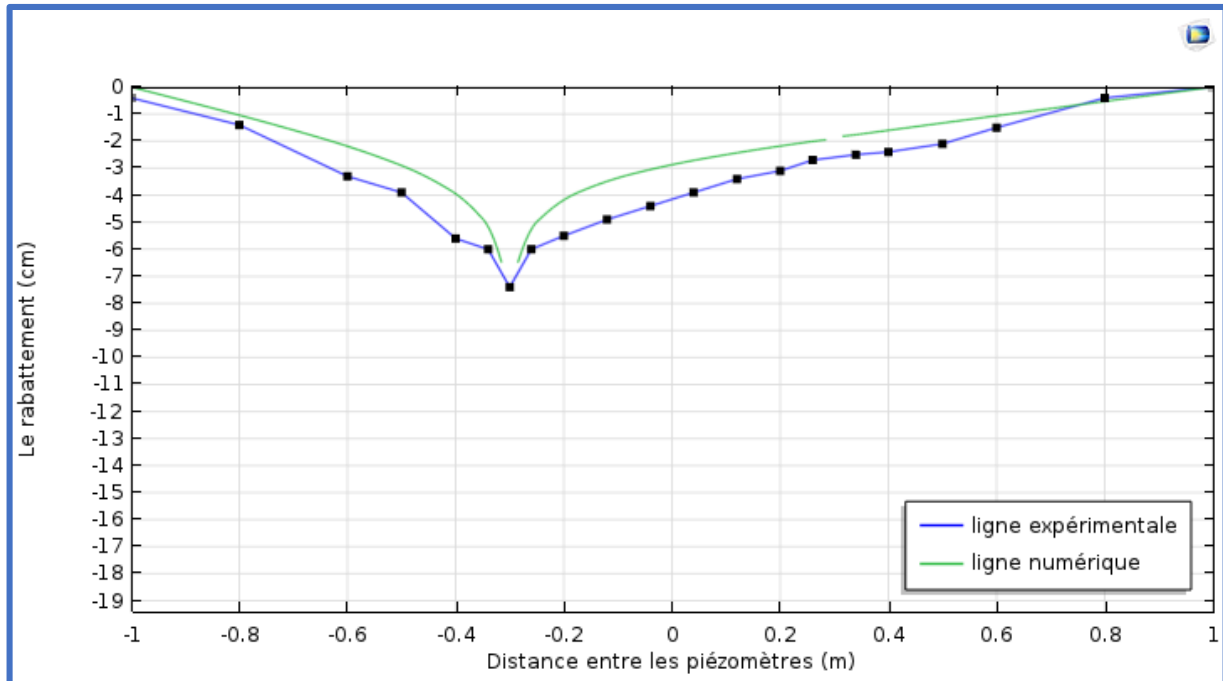


Figure (IV.5) : Comparaison entre les deux méthodes (expérimentale et numérique)

IV.2.4. Discussion des résultats

On remarque une différence entre les deux courbes, plus on s'approche vers le puits plus l'écart est important. Cette différence est justifiée par :

- La perméabilité qui a certainement changée à cause de la différence entre le compactage lors de remplissage de la colonne (perméamètre) et du banc expérimental, et aussi le tassement du sol lors de l'expérience.
- L'écart de la ligne expérimentale au niveau du puits de pompage est dû à une hétérogénéité du milieu, aux alentours de ce puits un sable plus grossier est mis pour empêcher le colmatage des ouvertures.
- Les fuites et les erreurs de mesure dues aux différents dispositifs expérimentaux et l'observation des utilisateurs ont influencées sur les résultats obtenus.

IV.3. Transport de la pollution dans le milieu poreux

IV.3.1. Etude expérimentale de la pollution

Dans cette étude nous avons injecté un polluant (solution en plomb) d'une concentration de 1.176g/l sur une surface circulaire avec un diamètre de 1.5 cm, ayant les coordonnées suivante : $x=0.8$; $y=0.03$ et $z=0$. Les puits d'observation choisis ainsi que leurs coordonnées sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau (IV.3) : Les puits d'observation choisis

N° du puits	x (m)	y (m)
1	0.6	-0.03
2	0.4	-0.03
3	0.2	-0.03
4	0.04	-0.03
5	-0.12	-0.03
6	-0.26	-0.03

Les résultats obtenus après le dosage avec la spectrométrie d'absorption atomique sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau (IV.4) : Les résultats expérimentaux de la concentration

temps (m)	Concentration (grammes/ litre)					
	Puits 1	Puits 2	Puits 3	Puits 4	Puits 5	Puits 6
0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.0027	0.0299	0.0263	0.0266	0.0181	0.01186
1	0.0196	0.0232	0.0393	0.0217	0.005	0.0175
2	0.0211	0.0205	0.0251	0.0065	0.0132	0.0139
3	0.0408	0.0159	0.0317	0.0367	0.0276	0.0029
5	0.035	0.0171	0.0165	0.0001	0.0483	0.0091
7	0.0169	0.0275	0.0132	0	0.0309	0.0192
13	0.005	0.0164	0.0212	0.0134	0.0008	0.0325
21	0.0682	0.0077	0	0	0.0319	0.064
25	0.0257	0.0617	0.2172	0.392	0.0342	0.0779
30	0	0	0.0148	0.1008	0.0126	0.0216
35	0.0019	0.0429	0.0583	0.0763	0.0671	0.0308
40	0.0432	0.0355	0	0.0849	0	0.0289
45	0	0.1236	0	0	0.0213	0.0393
55	0.0877	0.0563	0.0612	0.0193	0.0456	0.0202
65	0	0	0	0.0119	0.0132	0.0312

Les résultats expérimentaux obtenus sont exprimés en g/l, l'unité de concentration utilisée par le code COMSOL est mol/m³ (concentration molaire). Donc une conversion d'unités est nécessaire, l'équation suivante exprime la relation entre les deux concentrations (massique et molaire) (voir annexe 04) :

$$C = \frac{C_m}{M} \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

- C : La concentration molaire en mol/m³ ;
- C_m : La concentration massique en g/m³ ;
- M : La masse molaire en g/mol.

Les résultats obtenus après cette transformation sont donnés dans le tableau (IV.5) :

Tableau (IV.5) : Les résultats expérimentaux de la concentration exprimés en mol/m³

Temps (m)	Concentration (mol/m ³)					
	Puits 1	Puits 2	Puits 3	Puits 4	Puits 5	Puits 6
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5	0.013	0.144	0.127	0.128	0.087	0.057
1	0.095	0.112	0.190	0.105	0.024	0.084
2	0.102	0.099	0.121	0.031	0.064	0.067
3	0.197	0.077	0.153	0.177	0.133	0.014
5	0.169	0.083	0.080	0.000	0.233	0.044
7	0.082	0.133	0.064	0.000	0.149	0.093
13	0.024	0.079	0.102	0.065	0.004	0.157
21	0.329	0.037	0.289	0.069	0.154	0.309
25	0.124	0.298	0.000	0.000	0.165	0.376
30	0.000	0.000	0.071	0.486	0.061	0.104
35	0.009	0.207	0.281	0.368	0.324	0.149
40	0.208	0.171	0.000	0.410	0.000	0.139
45	0.000	0.597	0.000	0.000	0.103	0.190
55	0.423	0.272	0.295	0.093	0.220	0.097
65	0.000	0.000	0.000	0.057	0.064	0.151

La figure (IV.5) suivante est une représentation graphique des résultats du ce tableau :

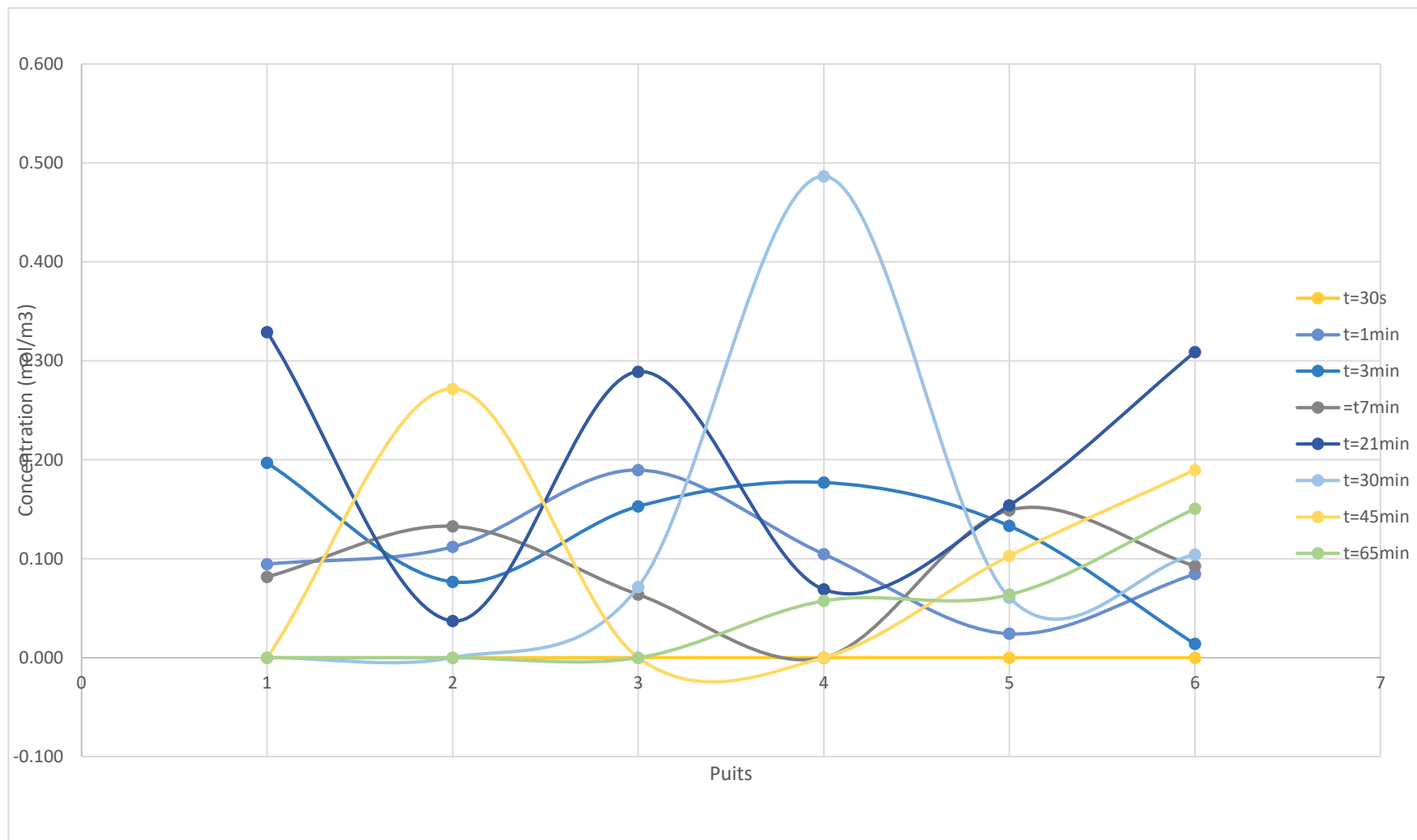


Figure (IV.6) : Variation de la concentration de polluant dans le milieu

IV.3.1.1. Discussion et interprétation des résultats

On remarque que la concentration varie d'une façon aléatoire dans le milieu en fonction de temps.

Pour chaque instant t , la variation de la concentration dans le milieu est analogue à l'allure d'une fonction sinusoïdale, autrement dit, si on enregistre une concentration élevée dans un puits, la concentration dans le puits qui le précède et celui qui le suit sera diminuée, ce qui signifie qu'une interaction importante entre les puits a eu lieu lors des prélèvements.

Nous avons refait un prélèvement sur les six puits avec les mêmes conditions de l'écoulement, nous avons constaté que le niveau d'eau diminue dans quelques piézomètres aux cotés de chaque puits d'observation. Donc cette interaction est due au volume prélevé qui est supérieur au volume contenu dans le puits.

Les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants pour réaliser une étude comparative satisfaisante. En effet, les mesures expérimentales demandent beaucoup de temps et mobilisent les services de laboratoire d'analyse par spectrométrie d'absorption atomique de département de génie des procédés que nous remercions pour une centaine d'analyses effectuées.

Un deuxième test est pratiquement impossible dans les délais impartis à ce travail. Cela demande de mettre en place un deuxième banc d'essai ou de retirer tout le sable et le remplacer par un nouveau non contaminé par la pollution.

IV.3.2. Etude numérique

Le couplage de l'étude hydrodynamique avec l'étude de transport basée sur la résolution de l'équation advection-dispersion a permis de suivre la propagation de la pollution dans la nappe.

Les figures (IV.7) à (IV.12) montrent la propagation de la pollution pendant différents temps en fonction de la distance :

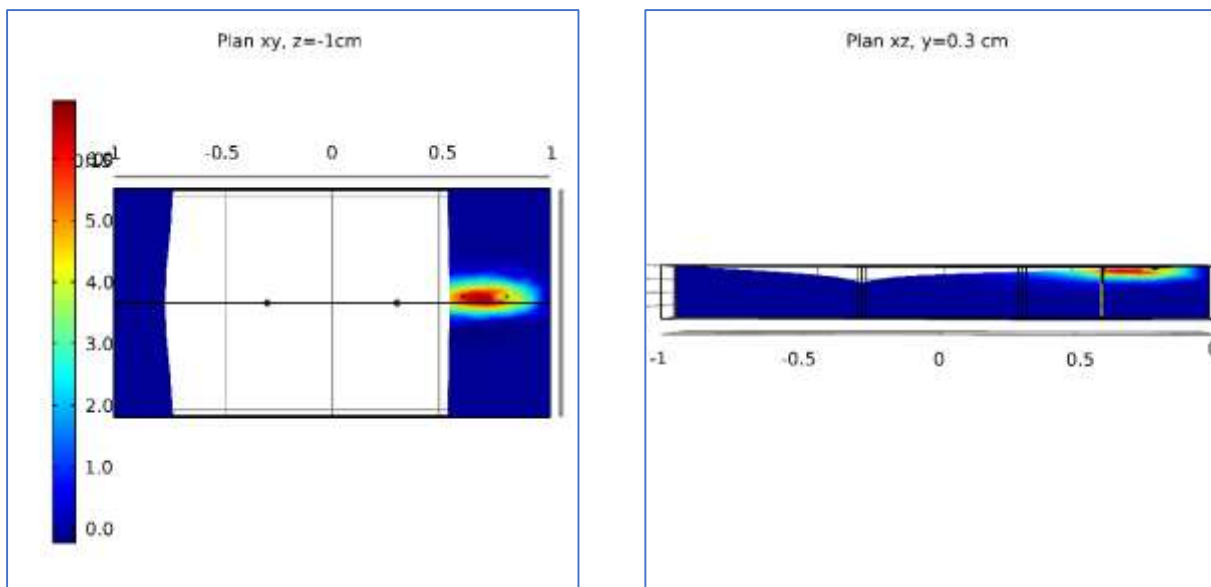


Figure (IV.7) : Propagation de la pollution (mol/m^3) pendant $t= 1500$ secondes

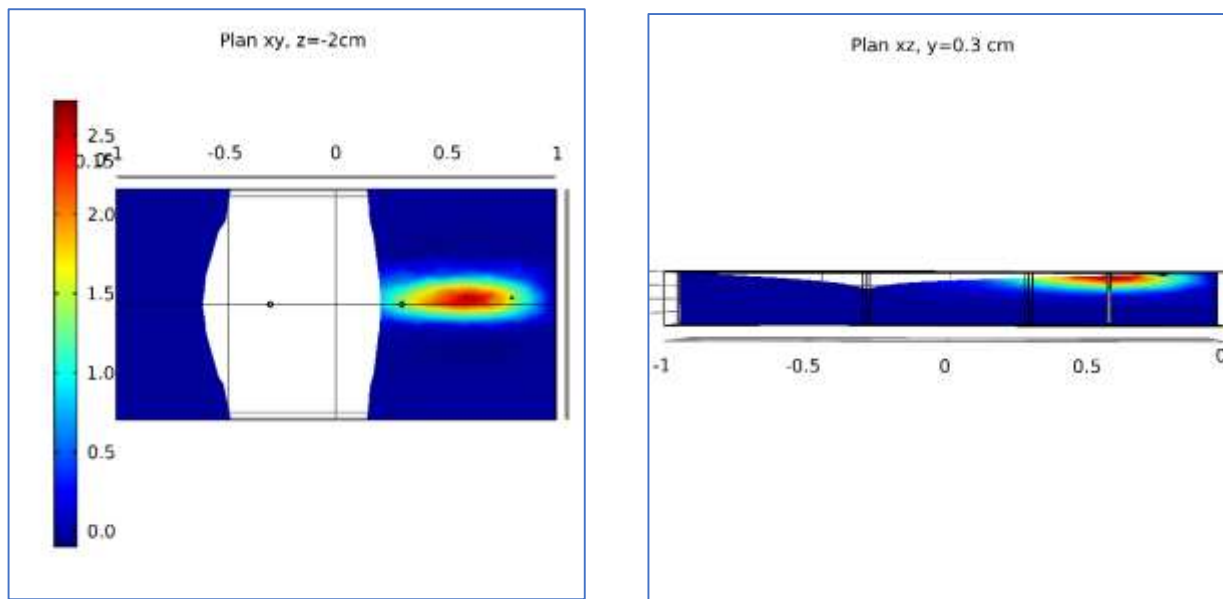


Figure (IV.8) : Propagation de la pollution (mol/m^3) pendant $t= 2000$ secondes

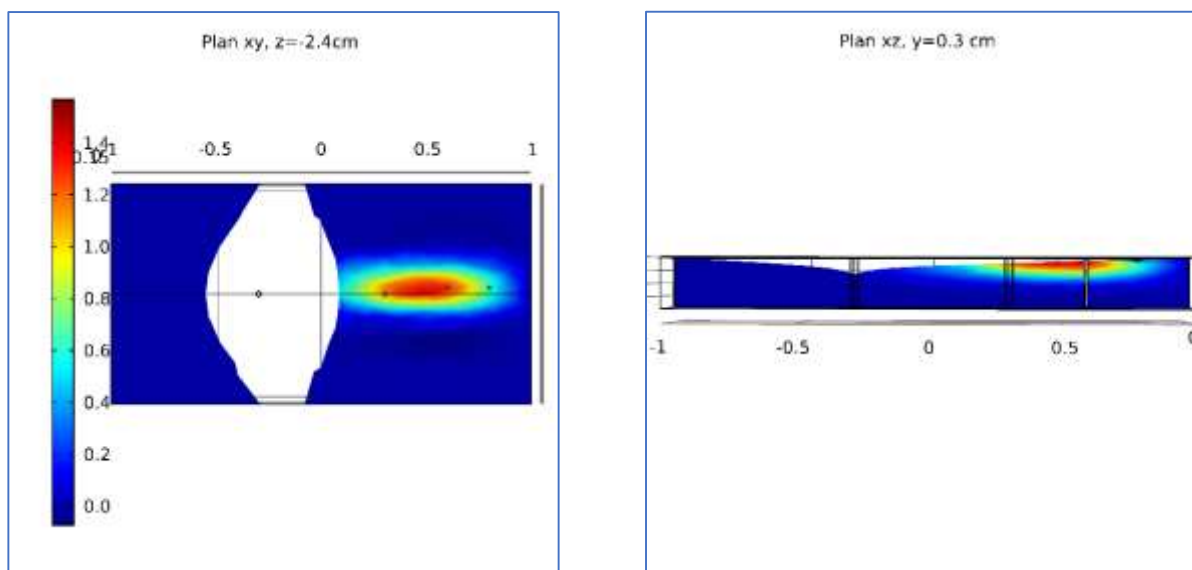


Figure (IV.9) : Propagation de la pollution (mol/m^3) pendant $t= 2500$ secondes

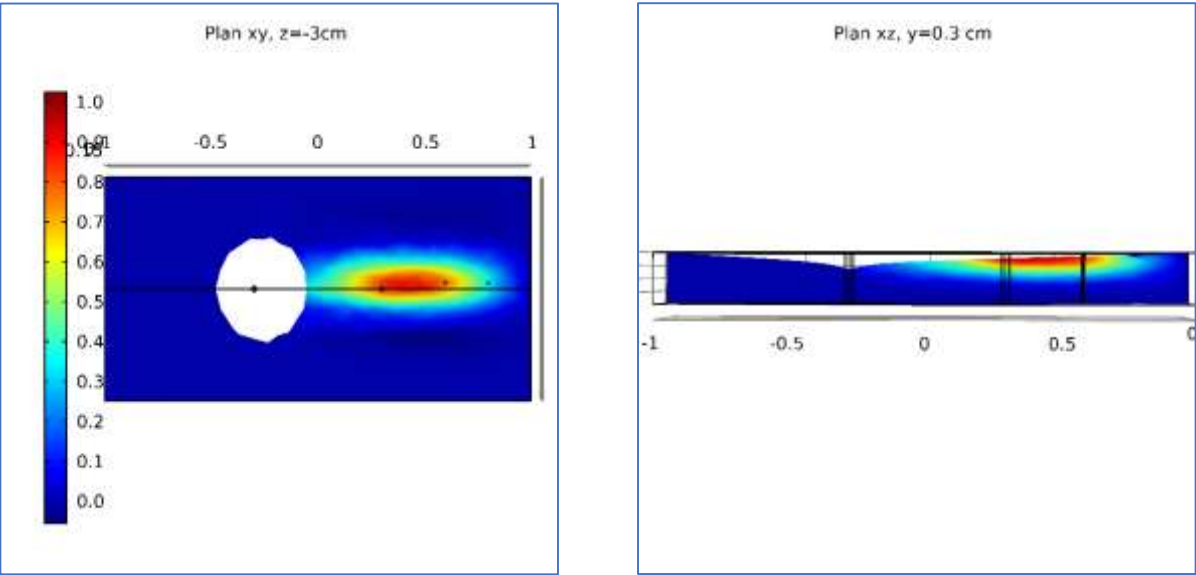


Figure (IV.10) : Propagation de la pollution (mol/m^3) pendant $t= 3000$ secondes

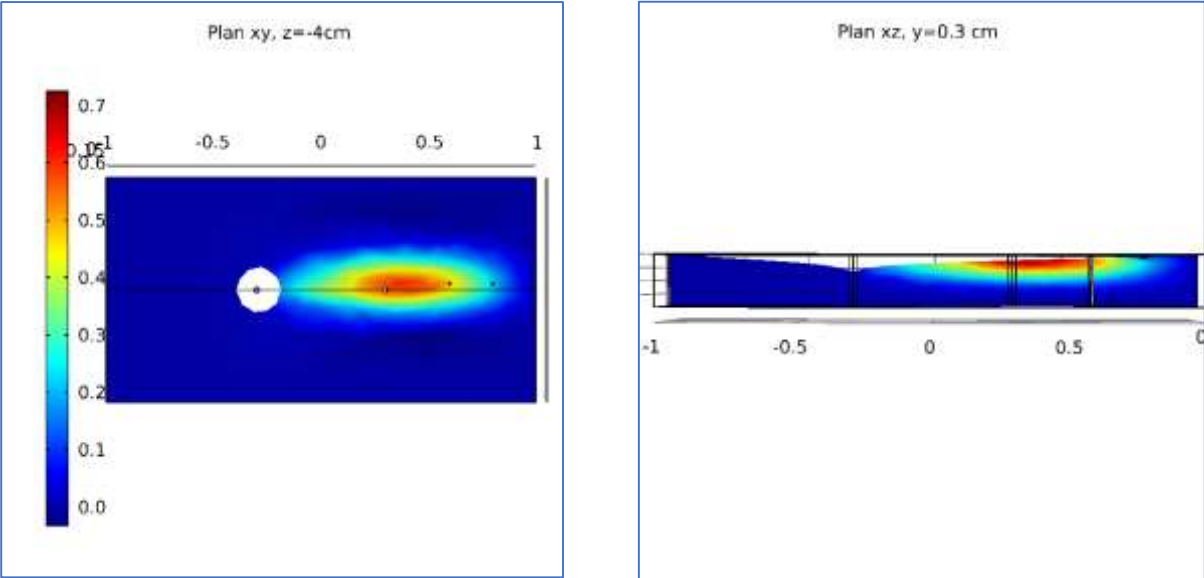


Figure (IV.11) : Propagation de la pollution (mol/m^3) pendant $t= 3500$ secondes

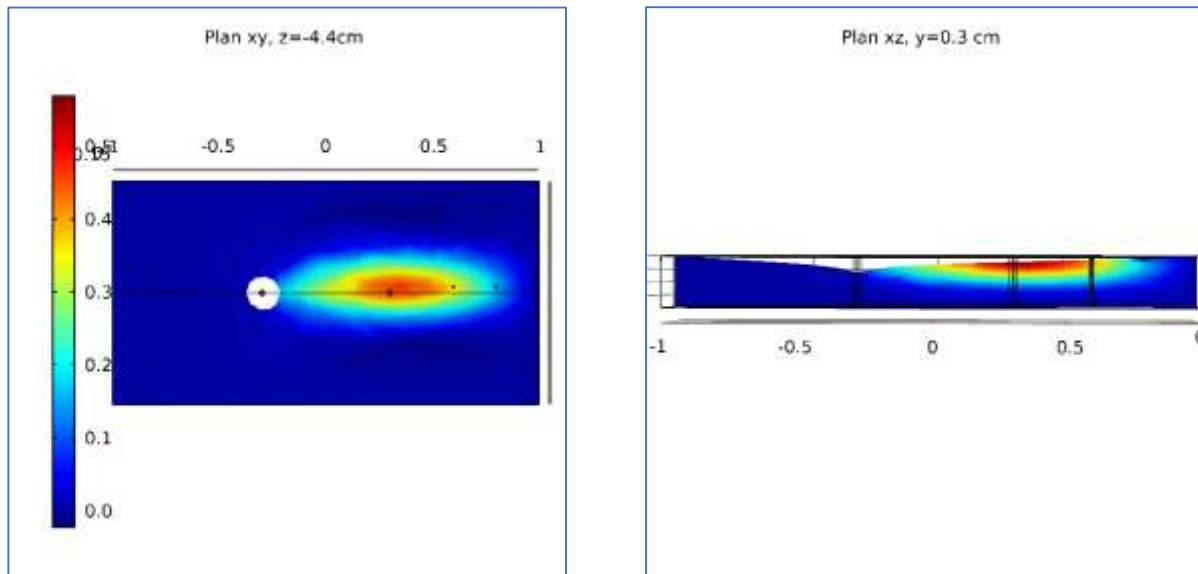


Figure (IV.12) : Propagation de la pollution (mol/m^3) pendant $t= 3900$ secondes

IV.3.2.1. Discussion et interprétation des résultats

Nous avons décalé à chaque instant considéré le plan xy vers le bas, ce qui nous permet de bien suivre la propagation de la pollution en fonction du temps selon la direction de l'écoulement et les deux directions transversales.

On remarque que après l'arrêt de l'injection de la pollution, la concentration diminue en fonction de la distance (horizontale et verticale), ce résultat est tout à fait logique puisque plus le temps s'écoule plus la pollution se mélange avec le fluide qui la transporte donc la concentration sera diminuée.

On remarque aussi que la pollution se propage selon la direction de l'écoulement plus rapidement que sa propagation dans les directions transversales, ce résultat est logique, puisque c'est l'écoulement de l'eau qui transporte la pollution, cette dernière suit le sens de l'écoulement.

On remarque aussi que la propagation de la pollution selon les deux directions transversales est identique, cela est dû à l'égalité des coefficients de diffusivité longitudinale.

IV.4. Les résultats sur les puits d'observation

La représentation des résultats expérimentaux obtenus pour chaque puits en fonction de temps nous permettra de faire une étude comparative entre les résultats de l'étude expérimentale et la simulation numérique faite.

IV.4.1. Etude expérimentale

A partir du tableau (IV.5) et en utilisant les valeurs qui permettent d'obtenir une monotonie des courbe de la concentration en un point sur deux intervalles : avant et après l'arrêt de l'injection, nous avons pu représenter les résultats sur les courbes de la figure (IV.13). Cette considération est basée sur les résultats disponibles dans la littérature [21].

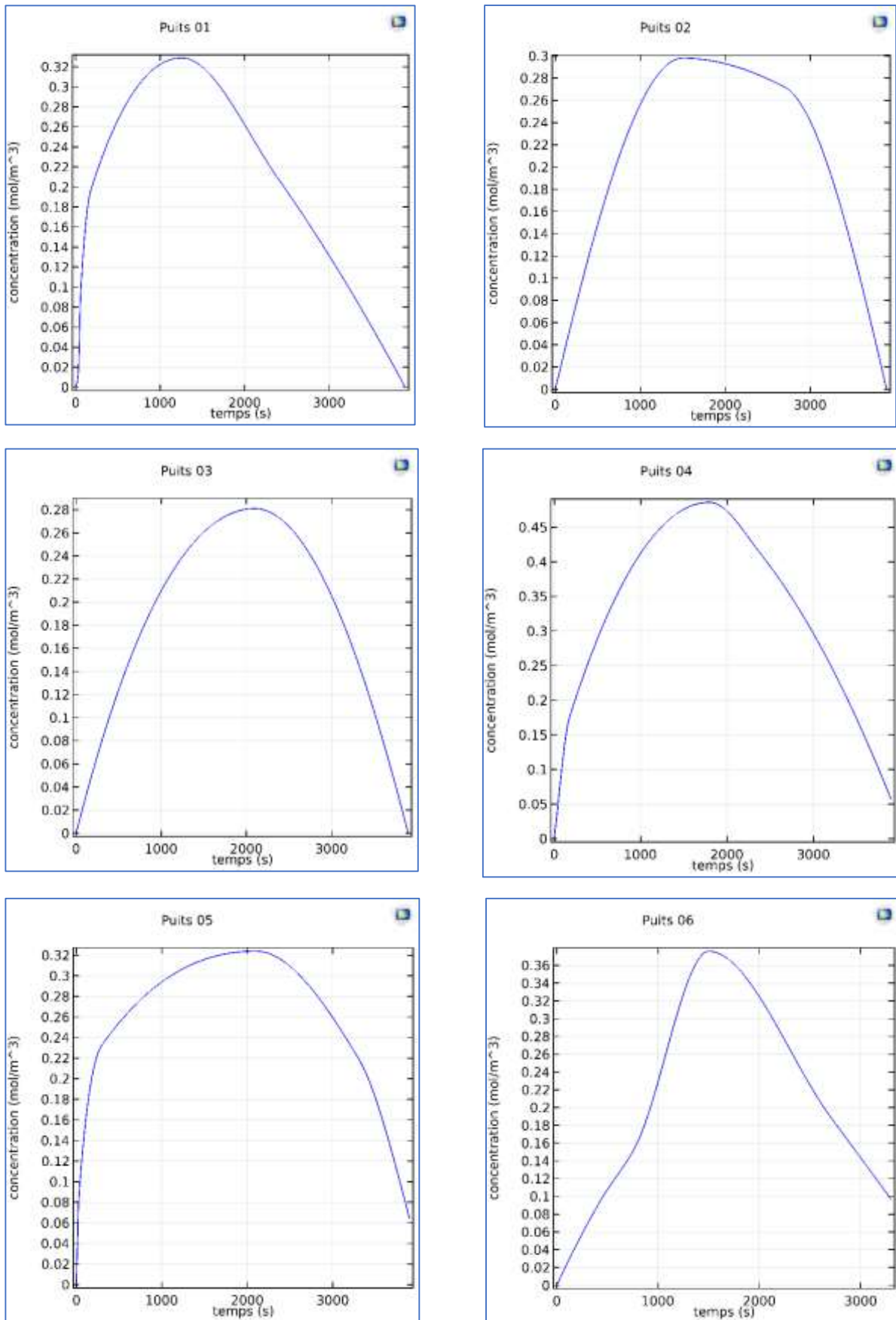
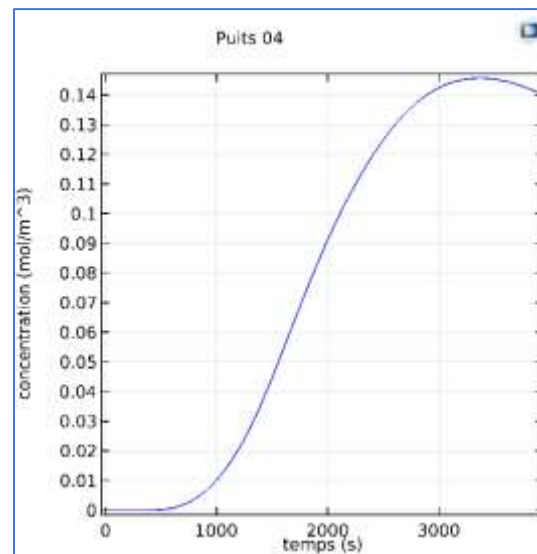
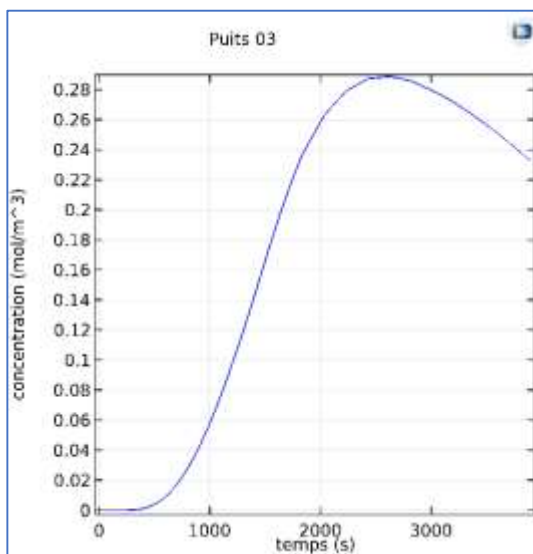
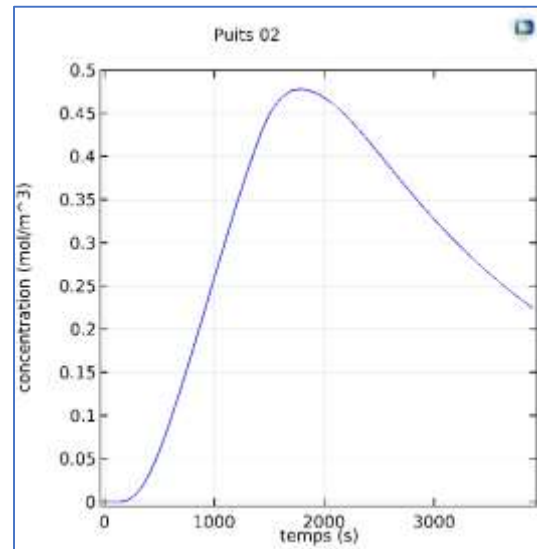
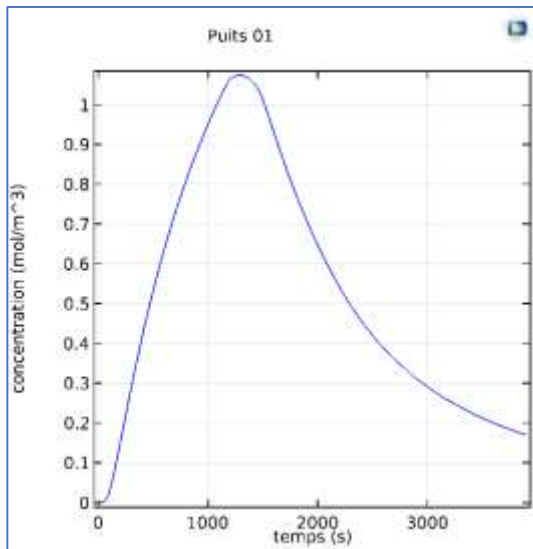


Figure (IV.13) : Résultats expérimentaux pour chaque puits

IV.4.2. Etude numérique

Pour calculer la concentration dans les puits pour en fonction de temps, le code COMSOL nous a permis de calculer la concentration moyenne traversant la surface latérale de chaque puits et pour chaque instant.

Les résultats obtenus sont représentés dans la figure suivante :



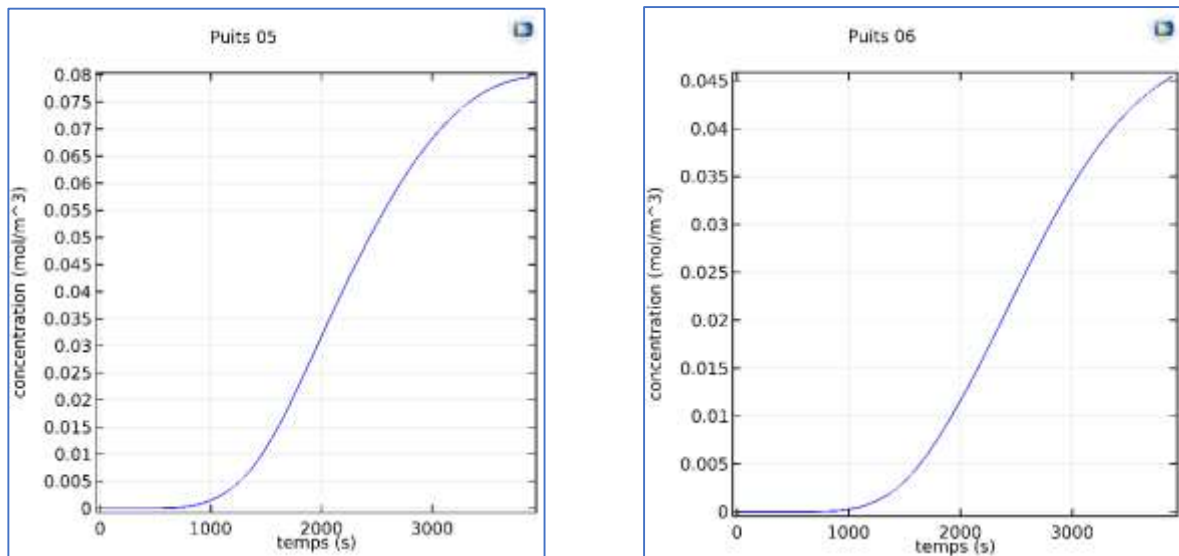


Figure (IV.14) : Les résultats numériques pour chaque puits

IV.4.3. Etude comparative

Cette étude consiste en la comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus et les résultats de la simulation numérique pour chaque puits d'observation. Les graphiques dans la figure (IV.15) suivante montrent la comparaison entre ces deux méthodes pour chaque puits :

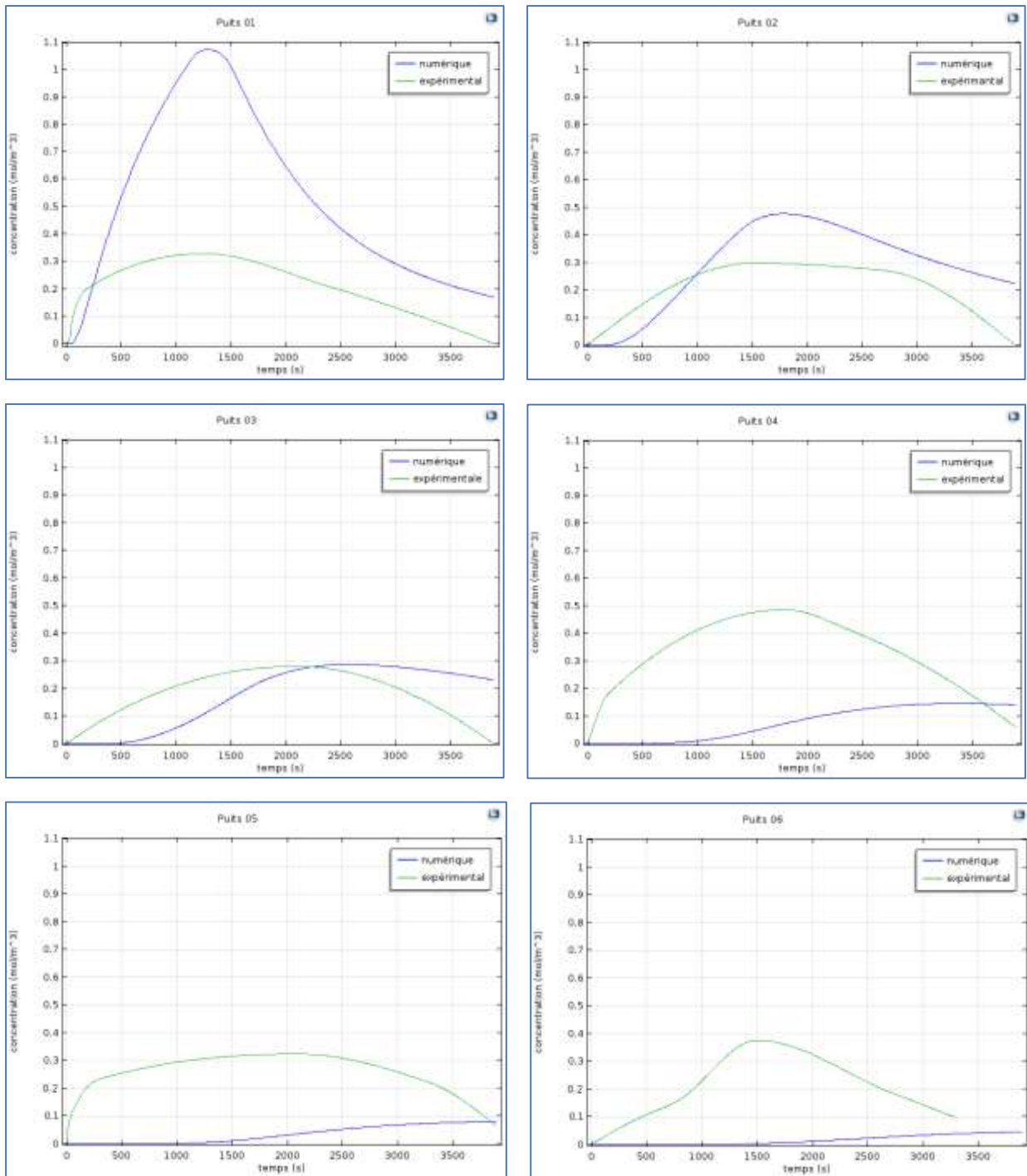


Figure (IV.15) : Graphiques de comparaison expérimental-numérique

IV.4.3.1. Discussion et interprétation des résultats

D'après les résultats de l'étude comparative (figure (IV.15)), on remarque que seulement deux puits 02 et 03 ont été calés avec les valeurs des paramètres utilisés.

On remarque aussi une différence entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux pour le puits 02, cette différence est due aux erreurs de mesure et de prélèvement d'une part, et aux différents processus physiques ; chimiques et biologiques que nous n'avons pas pris en considération dans le modèle numérique.

En ce qui concerne le puits 01, cet écart observé entre les deux courbes expérimentale et numérique est dû soit :

- La possibilité que nous avons raté un prélèvement, ce qui signifie une valeur importante de la concentration n'est pas prise en compte.
- Le prélèvement s'est fait à une profondeur que la pollution n'a pas atteinte.

Enfin, concernant les trois derniers puits 04 ; 05 et 06, on remarque que les résultats numériques sont trop éloignés des résultats expérimentaux. Cette différence est due à :

- Un déséquilibre de l'écoulement à cause du prélèvement (pompage d'un volume d'eau supérieur au volume des puits), ce qui a provoqué une inversion de gradient hydraulique empêchant la pollution de s'écouler normalement vers le puits de pompage.
- L'influence des propriétés physiques du milieu : la présence d'hétérogénéités dans milieu qui ont influencé sur l'écoulement ont influencé aussi sur le transport de la pollution en changeant les coefficients de dispersion que nous avons supposés constants sur le modèle numérique.

IV.4. Proposition d'une étude expérimentale

Dans le but de valider d'avantage le modèle numérique élaboré, on propose une expérience dans laquelle il sera possible de suivre la propagation de la pollution dans un milieu poreux en tridimensionnel. Cette expérience sera une amélioration de l'expérience faite dans le cadre de ce mémoire.

Le dispositif sera constitué principalement d'un bassin de dimensions 2m*1m*0.25m rempli d'un sol. Les deux réservoirs d'alimentation seront gardés, l'eau s'écoule depuis les réservoirs vers un puits de pompage situé sur la ligne médiane du bassin. Pour faire des prélèvements des échantillons permettant de suivre la propagation de la pollution localement i.e. la détermination de la concentration en un point choisi, des cylindres creux de petit volume seront implantés dans le milieu lors du remplissage du bassin. Les cylindres seront fermés des deux côtés d'en haut et d'en bas, toute la surface latérale sera munie des pores dont la taille est en fonction de la granulométrie de sol utilisé. Chaque cylindre est relié par un tube fibre en verre de 2 mm (disponibles sur le marché) à une seringue à la surface pour permettre le pompage d'un échantillon d'environ 3 ml (volume nécessaire pour effectuer un dosage pas SAA).

Pour simuler la source de la pollution, un réservoir muni d'un trop plein sera mis en place, ce dispositif permet de garder un débit constant de la solution concentrée.

Les points d'observation seront placés suivant deux plans parallèles au fond du bassin tout en gardant une distance de 10 cm entre eux. Sur chaque plan sont placés 08 cylindres en deux lignes parallèles distantes.

Enfin, pour simuler le transport dans la zone saturée, la hauteur d'eau dans le puits de pompage sera ajustée pour que tous les points de prélèvement soient dans la zone de l'écoulement.

Les échantillons prélevés seront soumis à l'analyse chimique avec la spectrométrie d'absorption atomique après leur filtration.

IV.5. Conclusion

L'étude expérimentale de l'écoulement en milieux poreux ainsi que le transport de la pollution a permis de représenter les principaux résultats obtenus. D'après les résultats de l'étude comparative de l'écoulement étudié avec deux méthodes différentes et les hypothèses simplificatrices imposées, on se permet de dire que le modèle numérique a bien représenté le transport de polluant.

Le modèle numérique élaboré dans cette étude nous a permis de suivre la propagation du polluant dans le milieu étudié, d'après les résultats de l'étude comparative faite pour l'ensemble des résultats de transport de polluant, le modèle numérique est valide pour le cas étudié.

L'analyse des résultats obtenus de cette étude a montré que comportement de la pollution dans les milieux poreux est très complexe, plusieurs paramètres influent sur le transport.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Dans ce travail, nous avons développé un modèle de simulation d'un problème physique complexe concomitant: le transfert de polluant dans un milieu poreux saturé, ce modèle nous a permis de détecter la concentration et la limite du panache de la pollution en fonction du temps dans une nappe libre. Ce travail s'est appuyé sur deux approches : une approche expérimentale et une approche numérique.

L'approche expérimentale effectuée est une étude de propagation d'un polluant dans un modèle d'une nappe libre. Nous avons utilisé des outils et des techniques manuels pour déterminer la concentration du polluant à travers les piézomètres implantés dans le milieu. Plusieurs difficultés ont été rencontrées dans cette étude, principalement relatives au matériel utilisé.

Par ailleurs, le modèle numérique de simulation a été réalisé sous le code de calcul COMSOL Multiphysics qu'est basé sur la résolution des équations aux dérivées partielles avec la méthode des éléments finis. Ce modèle permet la simulation de transport de polluants en milieux poreux, et nous avons reproduit le phénomène étudié sur un banc expérimental. Les principaux mécanismes de transport simulés dans cette étude numérique sont : la convection ; la dispersion et la diffusion moléculaire. Le modèle élaboré permet la prise en compte d'autres processus physiques et chimiques, mais il reste difficile de les déterminer.

La détermination de quelques paramètres relatifs au transport en milieux poreux tel que le coefficient de dispersion et les processus physico-chimiques éventuellement présents dans le sol, s'est confrontée à plusieurs limites, notamment dans le temps imparti à ce travail et le matériel disponible. La détermination de la dispersion est faite par calage des résultats. En ce qui concerne les processus chimiques, nous n'avons pas pu effectuer des analyses. La compréhension et la maîtrise de phénomène de transport de polluants en milieux poreux est d'autant plus complexe que plusieurs processus impliqués dans l'hydrodynamique et le transport s'interagissent simultanément.

En ce qui concerne les perspectives de ce travail, nous pensons que le protocole expérimental peut être amélioré, l'étude expérimentale proposée dans ce mémoire pourrait donner des résultats plus satisfaisants. Ce travail peut donner suite à plusieurs travaux :

- Extension de cette modélisation à des modèles de nappes captives et des milieux poreux hétérogènes.
- Extension de cette modélisation à un modèle d'une nappe côtière en s'approchant du cas réel d'une intrusion marine.
- Suivre l'avancement d'un polymère injecté dans le but de former une matrice immobilisant le polluant de se propager d'avantage dans les milieux poreux.

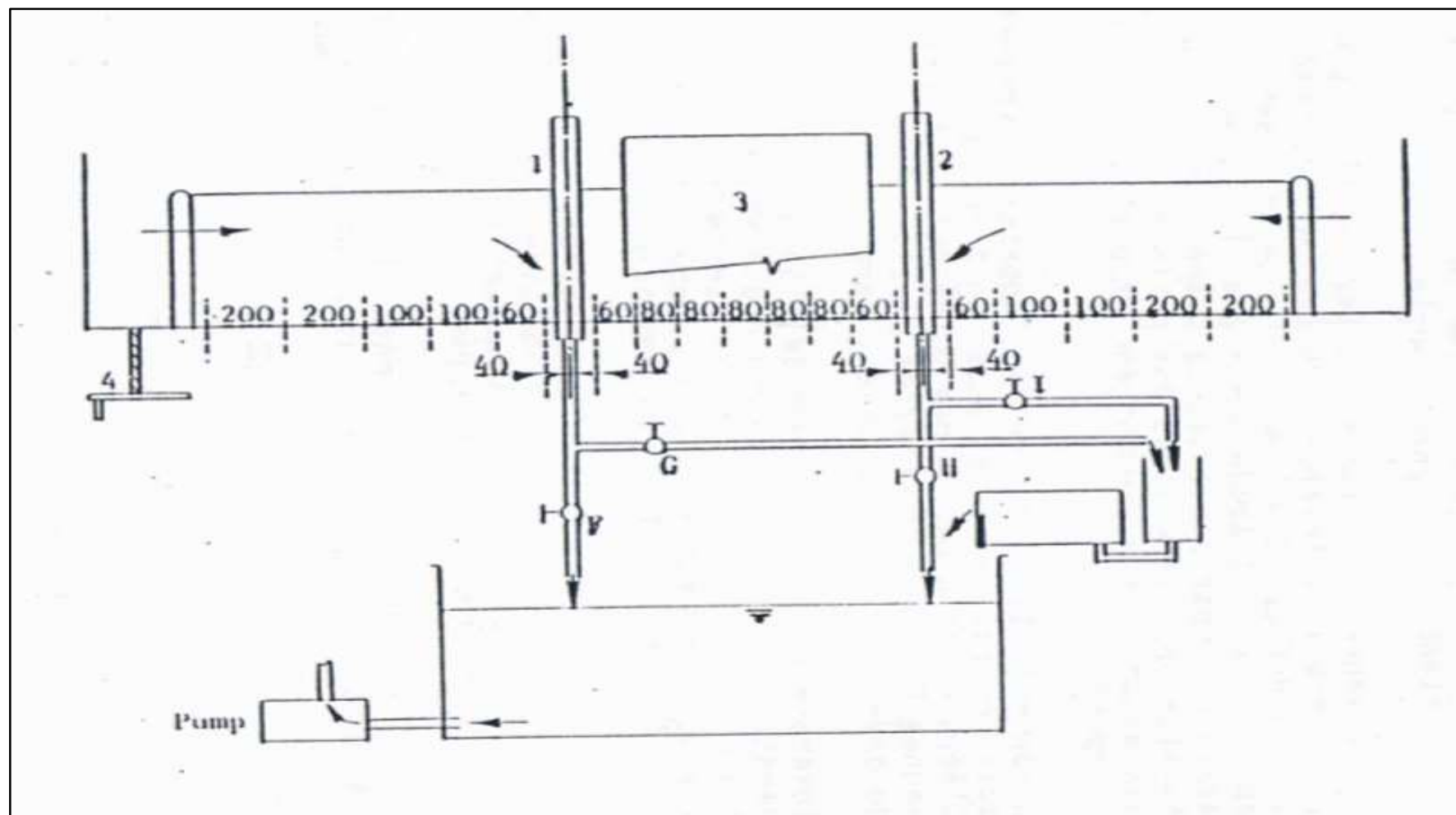
Références bibliographiques

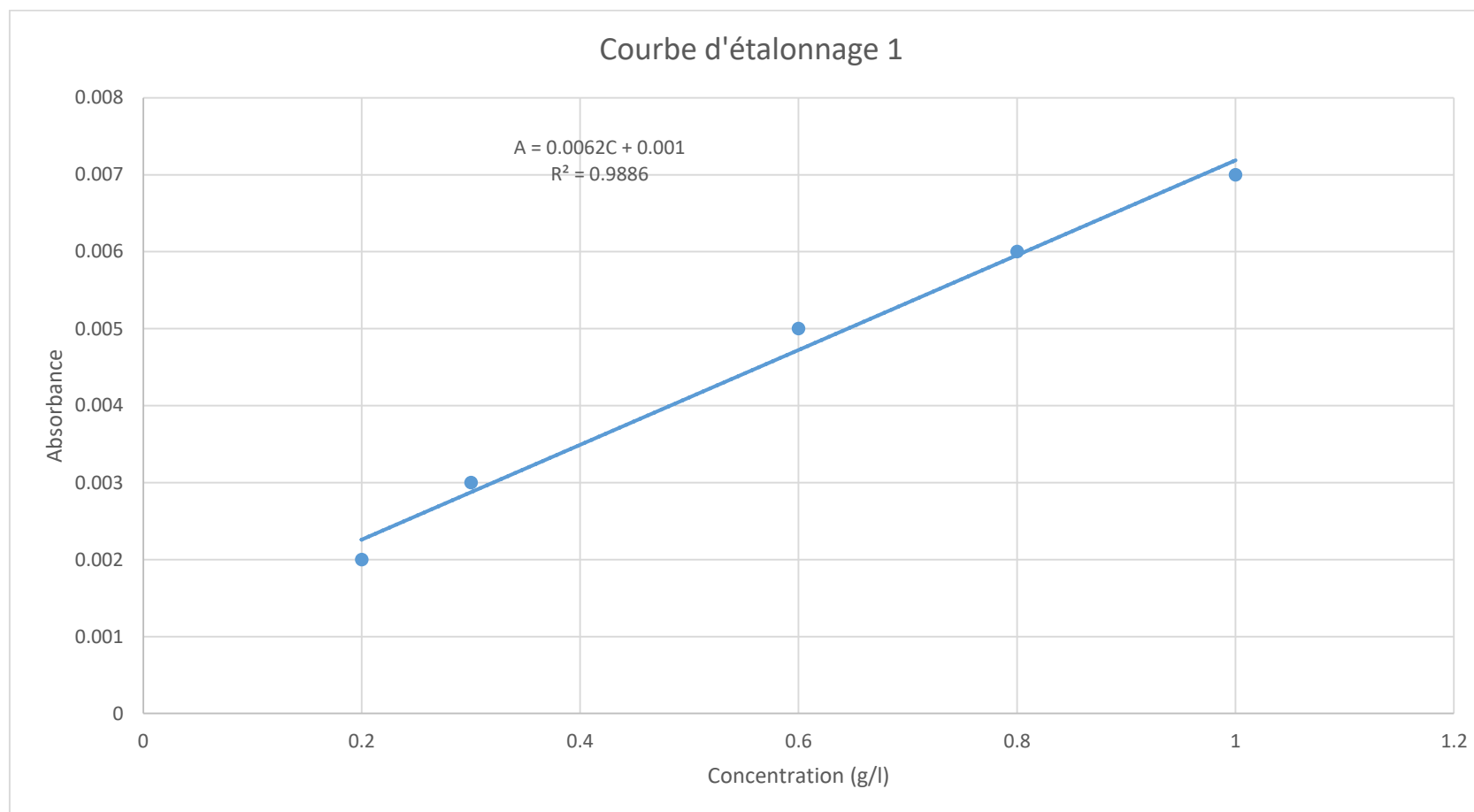
Références bibliographiques

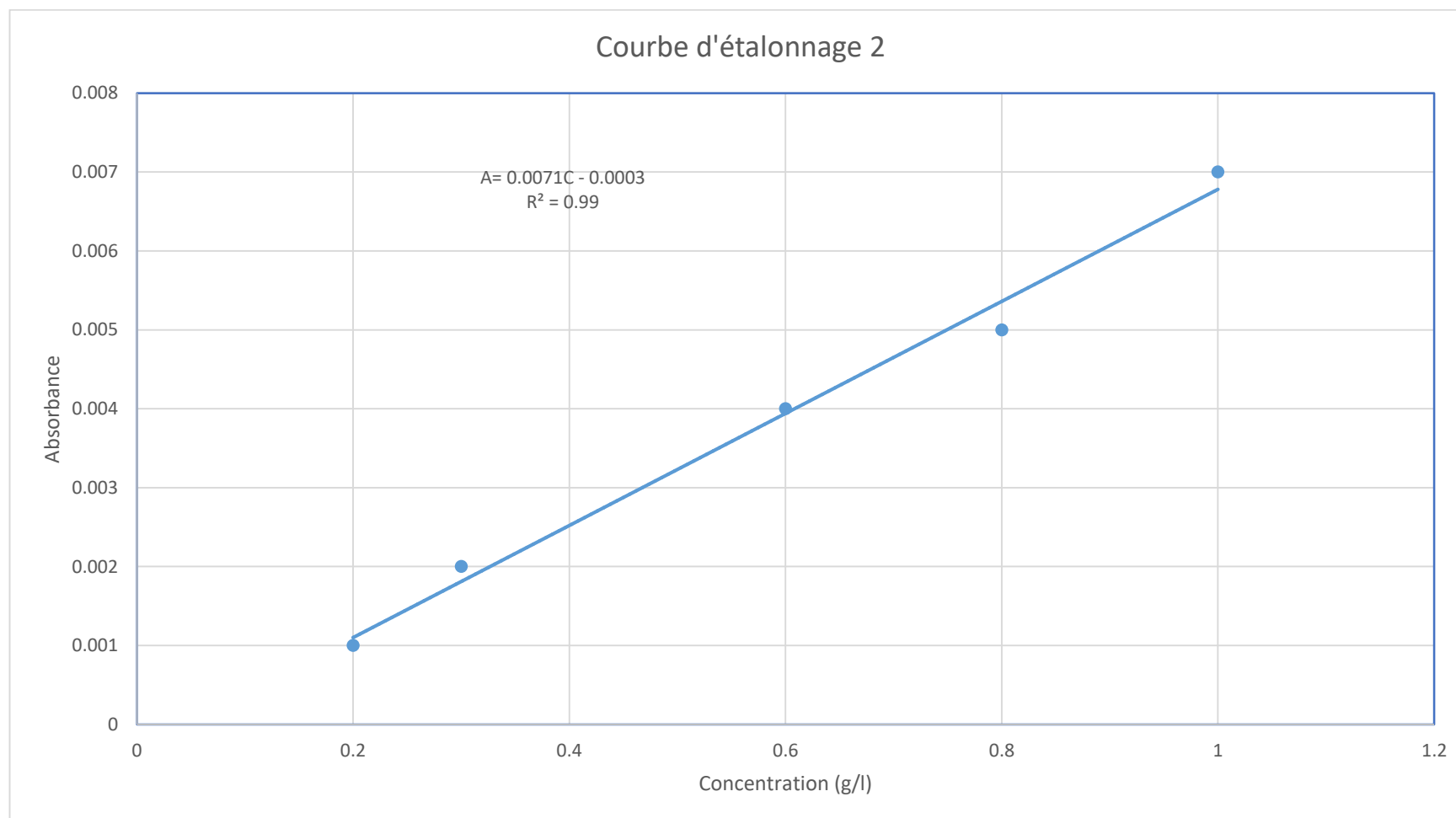
- [1] Todd, D. K., et Mays, L.W., Groundwater hydrology, *Edition Phoenix Color Corporation*, USA, 2005.
- [2] Maurice, C., Aide-mémoire d'hydraulique souterraine, *Edition presse de l'école nationale Ponts et Chaussées*, France, 1993.
- [3] Mohellebi, S. et Belkacem, C., Etude expérimentale et simulation numérique des écoulements souterrains (écoulement vers un puits dans une nappe libre), *Mémoire de fin d'études*, Université de Bejaia, Algérie, 66 pages, 2016.
- [4] Suski, B., Caractérisation et suivi des écoulements hydriques dans les milieux poreux par la méthode du Potentiel Spontané, *Thèse de doctorat*, Université d'Aix-Marseille III, France, 183 pages, 2005.
- [5] Romazomanana, F., Modélisation de transport réactif dans les eaux souterraines: Généralisation des méthodes ELLAM, *Thèse de doctorat*, Université de Strasbourg, France, 162 pages, 2012.
- [6] Charles, R.F., Groundwater science, Academic press, London, 450 pages, 2002.
- [7] Shneebeli, G., Hydraulique souterraine, *Edition Eyrolles*, France, 1978.
- [8] Bendahmane, I., Modélisation et simulation numérique de l'écoulement dans un milieu poreux : Application pour la nappe alluviale du Sebaou Tizi-Ouzou en vue de la prévention du niveau d'eau dans chaque période de l'année, *Thèse de Magister*, Université de Bejaia, Algérie 2010.
- [9] Hoteit, H., Simulation d'écoulements et de transports de polluants en milieu poreux : application à la modélisation de la sûreté des dépôts de déchets radioactifs, *Thèse de doctorat*, Université de Rennes 1, France, 261 pages, 2002.
- [10] Bourgois, J. et Moszkowicz, P., Rapport final : simulation des transferts de polluants dans les sols, Ecole des mines de Saint-Etienne, 65 pages, 1997.
- [11] Lemièrre, B., Seguin, J.J., et Le Guern, C., Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes : Applications dans un contexte d'évaluation détaillée des risques pour les ressources en eau, Bureau de recherches géologiques et minières, France, 103 pages, 2001.
- [12] Höhener, P., Modélisation des panaches de pollution dans des nappes phréatiques et des sols, *Journée modélisation CEREGE*, Université de Provence Aix-Marseille, France, 69 pages, 2010.
- [13] Bouderbala, A., Remini, B. et Saaed-hamoudi, A., Etude de l'évolution de l'intrusion marine dans l'aquifère côtier de Nador (Tipaza, Algérie), *Deuxième colloque international sur les ressources en eau « Evaluation, Economie et Protection »*, Université de Ouargla, Algérie, 2016.

- [14] Ahfir, N-D., Etude des mécanismes de transport et la cinétique de dépôt des particules en suspension dans un milieu poreux saturé, *Thèse de doctorat*, Université de Havre, France, 179 pages, 2006.
- [15] Ikni, T., Etude des transferts surface-nappe dans le lit de l'oued Sebaou, *Thèse de doctorat*, Université de Bejaia, Algérie, 141 pages, 2014.
- [16] Danquigny, C., Etude expérimentale du transfert de masse dans un milieu poreux hétérogène, *Thèse de doctorat*, Université Louis Pasteur de Strasbourg, France, 199 pages, 2003.
- [17] Bensard, K., Modélisation du transport réactif dans les milieux poreux hétérogènes (Application aux processus d'adsorption cinétique non linéaire), *Thèse de doctorat*, Université de Rennes1, France, 251 pages, Décembre 2003.
- [18] Ahfir, N-D. Benamar, A. Alem, A. et Wang, H.Q., Influence of internal structure and medium length on transport and deposition of suspended particles: A laboratory study, *Springer science*, pp. 289-307, 2009.
- [19] Bear, J., Dynamics of fluids in porous media, *Edition American Elsevier*, New-York, 756 pages, 1972.
- [20] Ghouli, A., Modélisation mathématique et numérique de la pollution dans un milieu poreux non saturé: application milieux poreux stratifiés, *Thèse de doctorat*, Université Mohamed V-AGDAL, Maroc, 145 pages, 2009.
- [21] Seghir, A., Modélisation et validation expérimentale des transferts en milieux poreux, *Rapport de recherche Post-Doctorat*, Université de Havre, France, 44pages, 2013.
- [22] Degoutte, G. et Royet, P., Aide-mémoire de mécanique des sols, *Edition ENGREF*, France, 98 pages, 2005.
- [23] Bouali, H. et Boutata, Y., Etude expérimentale et simulation numérique de l'écoulement dans les milieux poreux (Application nappe libre – nappe captive), *Mémoire de fin d'études*, Université de Bejaia, Algérie, 95 pages, 2017.
- [24] Chebbi, S. et Kernou, Y., Extraction et analyse physico-chimique des métaux lourds ; toxiques et indésirables « Cr, Pb, Fe, Zn et Co » du Kaolin (KT3) d'El Milia, *Mémoire de fin de cycle*, Université de Bejaia, Algérie, 107 pages, 2010.

Annexes

Annexe1 : Distances entre les piézomètres

Annexe 2 : Première courbe d'étalonnage du Plomb ($\lambda=283.3$)

Annexe 3 : Deuxième courbe d'étalonnage du Plomb ($\lambda=283.3$)

Annexe 4 : La relation entre concentration massique et concentration molaire

Nous avons (II.5) :

$$C = \frac{n}{V}$$

Et (II.6) :

$$n = \frac{m}{M}$$

En remplaçant (II.6) dans (II.5) on obtient :

$$C = \frac{\frac{m}{M}}{V} \longrightarrow C = \frac{m}{M.V}$$

Avec : $C_m = \frac{m}{V}$... (II.4)

Donc on aura :

$$C = \frac{C_m}{M}$$

Résumé

Ce travail est une contribution à l'amélioration de la connaissance et la maîtrise de phénomène du transport de la pollution dans les milieux poreux, un phénomène essentiellement provoqué par l'activité humaine. Les caractéristiques physiques du milieu étudié ont été déterminées par une série d'essais expérimentaux faits au niveau des laboratoires de l'université de Bejaia. Afin de suivre la propagation d'un polluant injecté, nous avons mis en place un banc d'essais sur lequel une étude expérimentale est menée. Ensuite, un modèle numérique a été développé pour simuler l'écoulement et le transport de polluants à travers le milieu poreux. Cette modélisation permet de déterminer les limites du panache de la pollution en fonction de temps dans les milieux poreux en 3D.

Mots clés: Milieu poreux, pollution, transport en milieu poreux, modèle numérique, étude expérimentale.

Abstract

This work is a contribution to the improvement of the knowledge and control of pollution transport phenomena in porous media, a phenomenon essentially caused by human activity. The physical characteristics of the medium studied were determined by a series of experimental tests conducted in the laboratories of the University of Bejaia. In order to follow the propagation of an injected pollutant, we have set up a test bench on which an experimental study is conducted. Then, a numerical model was developed to simulate the flow and transport of pollutants through the porous medium. This modeling allows to determine the limits of the pollution as a function of time in 3D porous media.

Key words: porous media, pollution, transport in porous media, digital model, experimental study.

Agzul

Amahil-a d tiwsi i usnerni n tmussni d umallayti n temsalt n tuddma d tiwin n wammus deg lqa3 n tmurt , aya d ayen i d-iga umdan s timmad-is. Tulmisiin n wakal iwumi nga tazrewt d tid yersen yakan deg umazrar n tarmit yemmugen deg tnaremt n Tesdawit n Bgayet. Akken ad nedfer anufed n wammus, nesses-d imenzayen n tezrewt tarmitant. Syin yer-s nesses tamuddemt tumḍint i usedreg d usizzel n wammusen deg wadgen . Asmuddem-a ad d-yeg tilisa i wammus yer sdat deg lqa3 n tmourt 3D.

Tisura: lqa3 n tmourt (akal), ammus (iḍumman), tiwin (asizzel) deg lqa3 (deg akal), tamuddemt tumḍint, tazrewt tarmitant.

ملخص:

هذا العمل هو مساهمة في تحسين المعرفة والسيطرة على ظاهرة نقل التلوث في اوساط مسامية، وهي ظاهرة ناجمة أساسا عن النشاط البشري. تم تحديد الخصائص الفيزيائية للوسط المدروس من خلال سلسلة من اختبارات تجريبية أجريت في مختبرات جامعة بجاية. من أجل متابعة انتشار ملوث محقون، أنشأنا منصة اختبار أجريت عليها دراسة تجريبية. ثم تم تطوير نموذج رقمي لمحاكاة تدفق ونقل الملوثات عبر الوسط المسامي. هذه النمذجة تمكن تحديد حدود التلوث بدلالة الوقت في اوساط مسامية ثلاثية الأبعاد.

الكلمات المفتاحية: وسط مسامي، تلوث، النقل في الاوساط المسامية، نموذج رقمي، دراسة تجريبية.