

Mag. Bio - 183 / 03

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID- TLEMCEN
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

4 / 51 / 009 / 5

MEMOIRE DE MAGISTER

Option

Hydrogéologie

Présenté par :

Lamia YEBDRI

**L'ETUDE DU COMPORTEMENT DE QUELQUES TRACEURS
EN HYDROGEOLOGIE
SUR BANC D'ESSAI AU LABORATOIRE**

Soutenu le 02 / 07 / 2008, devant les membres du jury :

Mr. BENSALAH M., Professeur, Univ. Tlemcen
Mr. BOUANANI A., Maître de conférences, Univ. Tlemcen
Mr. HAREK Y., Maître de conférences, Univ. Tlemcen
Mme. BABA-HAMED K., Docteur, chargée de cours, Univ. Tlemcen
Mr. HASSANI M.I., Maître de conférences, Univ. Oran

Président
Rapporteur
Co-rapporteur
Examineur
Examineur

DEDICACES

Au Nom de Dieu tout puissant, qui nous a éclairé les chemins du savoir et de la sagesse, je dédie cet ouvrage :

Aux deux personnes précieuses, et envers lesquelles aucun d'entre nous ne pourrait s'acquitter de sa dette, pour leur soutien et leur confort apportés avec amour et attention durant toute notre existence : mes très chers et chaleureux parents ;

A mes deux sœurs et leurs époux, pour leur soutien et encouragements ;

A mon adorable nièce, qui m'est très chère, ainsi que toute ma famille ;

A tous mes amis et collègues ;

Enfin, à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser cet ouvrage.

*"Si la matière grise était plus rose, le monde
aurait moins d'idées noires"*

Pierre Dac

AVANT-PROPOS

Au moment de conclure ce travail, il ne fait aucun doute qu'il a une dimension collective qu'il convient de souligner.

Avant tout, je souhaite témoigner toute ma gratitude à mes parents, qui m'ont, tout au long de ces années, fourni les moyens nécessaires pour mener à bien mes études, et qui ont eu la patience et la confiance nécessaire pour me permettre de les pousser dans les meilleures conditions.

Je m'en voudrais d'attendre plus longtemps pour exprimer ma reconnaissance à mes encadreurs **M. BOUANANI A.**, Maître de conférences à l'université de Tlemcen et **M. HAREK Y.**, Maître de conférences à l'université de Tlemcen.

Tous deux ont su diriger, orienter ces travaux de recherche et manifester un intérêt constant et constructif pour ce projet. Mes remerciements pour leur aide, leurs disponibilités et leurs précieux conseils tout au long de la réalisation de ce travail.

Une mention spéciale est accordée à **M. BESSEDIK M.**, Chef de département d'hydraulique de Tlemcen, pour m'avoir facilité l'accès au laboratoire d'hydrologie et d'hydrogéologie des écoulements à surface libre et souterrains et d'avoir rendu possible la réalisation de la partie expérimentale de ce travail.

Je tiens aussi à remercier tout particulièrement **M. BENSALAH M.**, Professeur à l'université de Tlemcen, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je remercie vivement **Mme. BABA HAMED K.**, Docteur, chargée de cours et **M. HASSANI M I.**, Maître de conférences à l'université d'Oran, d'avoir marqué leur intérêt pour mes travaux en acceptant d'être membres du jury.

Je voudrais aussi ne pas oublier tous les ingénieurs et techniciens des laboratoires d'hydraulique et de génie civil à leur tête **Mme. SAHI F.**, qui ont consacré beaucoup de leurs temps pour les mesures, les analyses, les conseils, etc.

A toutes les personnes du **Laboratoire 25** qui de près ou de loin ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Finalement, pour les enseignements dispensés et pour leurs encouragements, je tiens à remercier l'ensemble des enseignants du département des sciences de la terre.

A tous, je réitère mes sincères remerciements.

ملخص

لدراسة سلوك و تحركات بعض الدلائل الكيميائية (كلور الصوديوم، رودامين، و ملون نسيجي) داخل الوسط المتجانس و كذلك الوسط غير المتجانس لجانا إلى عمليات تجريبية ضمن نموذج مصغر ممثل في خزانين مائيين ذات منسوب سطحي.

يتشكل النموذجان من خزان رملي (وسط متجانس) و آخر من نفس الطبيعة مضاف إليه عدسة طينية ذات نسبة نفاذية أضعف (وسط غير متجانس) .

سمحت الدراسات التجريبية المطبقة على هذين النموذجين باستعمال المسارين – المستمر و المتغير – بمعرفة خصائصها الهيدروديناميكية و الهيدروانتشارية.

أظهرت النتائج المتحصل عليها بأن مسار الدلائل الكيميائية يتم حسب المسار الرئيسي للمياه الجوفية، و أن كلور الصوديوم له خاصية التحفظ ، بينما رودامين – ب- و الملون النسيجي لهما خاصية الامتصاص من قبل الخزانين .

لقد سمحت النمذجة الرياضية المتعلقة بتنقل الأجزاء الكيميائية عن طريق البرنامج ASM 5 بتصديق النتائج المحصل عليها سابقا.

الكلمات المفتاحية : نموذج تجريبي – الدلائل – الأوساط – المسار – التحفظ – الامتصاص – النماذج الرياضية.

Résumé

Deux aquifères à nappe libre, ont été simulés dans un banc d'essai hydrologique au laboratoire, visant à étudier les comportements de quelques traceurs (Chlorure de sodium, Rhodamine-B, Colorant textile) dans des milieux homogènes et hétérogènes.

Les milieux étudiés concernent une formation sableuse (milieu homogène) et une formation de même nature renfermant une lentille de perméabilité plus faible (milieu hétérogène).

Les études expérimentales réalisées sur ces milieux, en écoulement permanent et transitoire, ont permis la détermination des paramètres hydrodynamiques (coefficient de perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement, diffusivité, débits et vitesse d'écoulement) et hydrodispersifs par l'utilisation de trois traceurs (chlorure de sodium, rhodamine-B et colorant textile).

L'interprétation des résultats obtenus a permis de mettre en évidence que le transfert des traceurs utilisés se fait principalement par convection (selon l'axe de drainage des écoulements souterrains) et que le chlorure de sodium présente des caractères conservatifs (pas d'adsorption), tandis que, la rhodamine-B et le colorant textile présentent des propriétés sorptifs.

La modélisation mathématique du transport des substances chimiques par l'utilisation du programme ASM.5 a été réalisée pour la validation des résultats expérimentaux obtenus.

Mots clés : Banc d'essai– Traceurs – Milieux – Ecoulement – Convection – Conservatif – Sorptif – Modélisation.

Abstract

Two unconfined aquifers were simulated in a hydrologic test bench in the laboratory, in the perspective to study the behaviors of a few tracers (Sodium chloride, Rhodamine-B, Dye textiles) in the homogeneous and heterogeneous porous media.

The studied medium relate to a sandy formation (homogeneous media) and a formation of the similar nature containing a lens of a lower permeability (heterogeneous media).

The experimental studies realized on these soils, in steady state and time varying flow , have permitted the determination of hydrodynamic parameters (permeability coefficient, transmissivity, storage coefficient, diffusivity, discharge and flow speed) and hydrodispersives by the use of three Tracers (sodium chloride, Rhodamine-B and textile dye).

The interpretation of the results has proved that the transfer of the tracers used mainly by convection (axially drainage underground flows), and the sodium chloride presents conservative characters (no adsorption), otherwise, Rhodamine-B and textile dye present sorptive properties.

Mathematic modelisation of chemicals transports through the use of software **ASM.5** was conducted for the validation of the experimental results obtained.

Key-words: Test bench –Tracer – medium – flow – Convection – Conservative – Sorptive – Modelisation.

TABLE DES MATIERES

	Page
RESUME	
TABLE DES MATIERES	1
INTRODUCTION	5
Partie I : GENERALITES	
Chapitre I : COMPORTEMENTS HYDRODYNAMIQUES DU MILIEU POREUX	7
I. ETUDE DE LA FONCTION CAPACITIVE (RESERVOIR)	7
I.1 ETUDE GRANULOMETRIQUE ET CARACTERISTIQUE DU MILIEU POREUX	7
I.2 POROSITE EFFICACE	9
I.3 EMMAGASINEMENT SOUTERRAIN	9
II. ETUDE DE LA FONCTION CONDUCTRICE DU RESERVOIR	9
II.1 COEFFICIENT DE PERMEABILITE	10
II.2 TRANSMISSIVITE ET DIFFUSIVITE	10
II.2.1 Transmissivité	10
II.2.2 Mesure de transmissivité et du coefficient d’emmagasinement par essai de pompage	10
II.2.3 Diffusivité	11
Chapitre II : COMPORTEMENTS HYDRO-DISPERSIFS DU SYSTEME	12
I. RAPPELS SUR LE TRANSFERT D’UNE MASSE EN MILIEU POREUX	12
I.1 LA CONVECTION	12
I.2 LA DIFFUSION MOLECULAIRE	12
I.3 LA DISPERSION CINEMATIQUE	13
I.4 RELATIONS GENERALES	14
I.5 PARAMETRES INFLUENÇANT LA DISPERSION	15
II. L’ASPECT MATHEMATIQUE DE LA DISPERSION	15
III. METHODES DE TRAÇAGE	16
III.1 REALISATION DE TRAÇAGE D’ESSAI	16
III.1.1 Traceur	16
III.1.1.1 Les traceurs naturels	17
III.1.1.2 Les traceurs artificiels	17
III.2 TYPES DE TRAÇAGE	17
III.2.1 Test avec un gradient hydraulique naturel	17
III.2.2 Test pulsé sur un puits unique	17
III.2.3 Test avec injection sur un puits unique (ou pompage) et des observations multiples sur piézomètres	18
III.2.4 Test de traçage avec deux puits (le doublet)	19
III.3 INTERPRETATION DES ESSAIS DE TRAÇAGES	19

III.3.1	Méthode dite "Ecart- type" (Fried et Combarous, 1971)	21
III.3.2	Méthode dite de la variance réduite	23
III.3.3	Méthode "Inverfc" (Gupta et al., 1980)	23
III.3.4	Méthode des abaques de Sauty, 1977 et de Crampon, 1983	24
III.3.5	Méthode graphique linéaire (Wang, 1987)	24
III.3.6	Méthode des moments	26
III.3.6.1	Écoulement radial convergent, injection instantanée	26
III.3.6.2	Écoulement monodimensionnel, injection instantanée	27

Partie II : EXPERIMENTATIONS, RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Chapitre III : ESSAIS HYDRODYNAMIQUES SUR LES AQUIFERE SIMULES A NAPPE LIBRE		28
I.	DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI HYDROLOGIQUE	28
II.	FONCTIONNEMENT DU BANC D'ESSAI	29
III.	LE CHOIX DU MATERIAU POUR LES ESSAIS	30
III.1	Méthode granulométrique par sédimentométrie	30
III.2	Préparation de l'échantillon	30
III.3	Réalisation des mesures	30
III.3.1	Calcul du diamètre D des particules et des tamisats cumulés	31
III.3.2	Calcul des tamisats cumulés	31
III.4	Résultats	32
IV.	ETUDE PIEZOMETRIQUE	32
IV.1	CAS DU MILIEU HOMOGENE	32
IV.1.1	Régime permanent	32
IV.1.2	Régime transitoire	33
IV.2	CAS DU MILIEU HETEROGENE	35
IV.2.1	Cas de la lentille constituée de sable et du calcaire argileux à 15% du mélange placée au milieu de la formation sableuse	35
IV.2.2	Cas de la lentille constituée de sable et du calcaire argileux à 30% du mélange placée au milieu de la formation sableuse	36
IV.2.2.1	Régime permanent	36
IV.2.2.2	Régime transitoire	37
V.	DETERMINATION DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES	38
V.1	COEFFICIENT DE PERMEABILITE.....	38
V.1.1	Détermination de la perméabilité à partir de la granulométrie	38
V.1.2	Détermination de la perméabilité à partir du perméamètre	39
V.1.3	Détermination de la perméabilité à partir du banc	39
V.2	TRANSMISSIVITE ET COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT.....	40
V.2.1	Utilisation de l'expression de Darcy.....	40
V.2.2	Détermination par essai de pompage	40
V.2.2.1	Milieu homogène	41
a.	Essai de pompage au puits « A »	41
b.	Essai de pompage au puits « B ».....	42

V.2.2.2 Milieu hétérogène	43
a. Formation sableuse avec lentille à 15 % de calcaire argileux	43
b. Formation sableuse avec lentille à 30 % de calcaire argileux	45
V.3 DIFFUSIVITE	46
Chapitre IV : ESSAI DE TRAÇAGE SUR BANC D'ESSAI HYDROLOGIQUE	48
I. ESSAI DE TRAÇAGE EN MILIEU HOMOGENE	48
I.1 TRAÇAGE D'ESSAI EN ECOULEMENT NATUREL	48
I.1.1 Conditions expérimentales	49
I.1.1.1 Injection des traceurs	49
I.1.1.2 Echantillonnages	49
I.1.2 Résultats et analyses	49
I.2 TRAÇAGE D'ESSAI EN ECOULEMENT RADIAL CONVERGENT	51
I.2.1 Conditions expérimentales	51
I.2.1.1 Régime d'écoulement	51
I.2.1.2 Injection des traceurs	51
I.2.1.3 Echantillonnages	51
I.2.2 Les expériences réalisées	51
I.2.3 Résultats et analyses	52
I.2.3.1 Pompage au puits « A »	52
I.2.3.2 Pompage au puits « B »	53
I.3 COMPORTEMENT PHYSICO–CHIMIQUE DES TRACEURS INJECTES ...	55
I.4 DISCUSSION DES RESULTATS	56
II. ESSAI DE TRAÇAGE EN MILIEU HETEROGENE	56
II.1 CONDITIONS EXPERIMENTALES	56
II.2 RESULTATS ET ANALYSES	57
II.2.1 Milieu hétérogène avec lentille de 15 % de calcaire argileux	57
II.2.2 Milieu hétérogène avec lentille à 30 % de calcaire argileux	59
II.3 COMPORTEMENT PHYSICO–CHIMIQUE DES TRACEURS INJECTES ...	60
II.4 DISCUSSION DES RESULTATS	61
III. DETERMINATION DES PARAMETRES DE DIFFUSION ET DE DISPERSION	62
III.1 MILIEU HOMOGENE	62
III.1.1 Ecoulement monodimensionnel	62
III.1.2 Ecoulement radial convergent (provoqué)	62
III.1.2.1 Pompage « A »	62
III.1.2.2 Pompage « B »	64
III.2 MILIEU HETEROGENE	65
III.2.1 Milieu hétérogène avec lentille à 15 % de calcaire argileux	65
III.2.2 Milieu hétérogène à une Lentille à 30 % de calcaire argileux	66

Partie III : MODELISATION

Chapitre VI : MODELISATION HYDRODYNAMIQUE	67
I. OBJECTIFS	67
II. PRESENTATION DU MODELE ASM	67
II.1 Disponibilité des données	67
II.1.1 Géométrie	67
II.1.2 Paramètres physiques et calage	68
II.3 Validation des résultats	68
 Chapitre VII : MODELISATION DU TRANSFERT : MODELE HYDRODYSERSIF	 70
I. APPLICATION DE LA METHODE DES DIFFERENCES FINIES A LA RESOLUTION DE L'EQUATION DE LA DISPERSION	 70
I.1 Calcul du flux dispersif	71
I.2 Calcul du flux convectif	71
I.3 Résolution du système d'équations discrétisées	72
II. APPLICATIONS DU MODELE HYDRODISPERSIF (Utilisation du logiciel A.S.M. 5)	 72
III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS	73
III.1 Cartes des transferts des substances chimiques sur milieu homogène	73
III.2 Evolution spatio-temporelle du traceur (NaCl) dans le milieu homogène	75
III.3 Rayon d'influence du panache de pollution	78
III.4 Interprétations des courbes de restitution données par le modèle ASM.5	79
III.4.1 Ecoulement naturel	79
III.4.2 Ecoulement radial convergent	81
 CONCLUSION GENERALE	 83
 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	 85
LISTE DES FIGURES	87
LISTE DES TABLEAUX	90
PLANCHES	92
ANNEXES	94

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La protection des eaux souterraines nécessite l'évaluation des risques de pollution, notamment à partir des déversements accidentels. Leurs probabilités sont un facteur important pour la connaissance des mécanismes de transfert des substances polluantes en solution en milieu à perméabilité de fissures ou d'interstices.

Cette recherche s'inscrit dans le cadre du développement d'une méthodologie d'étude et de protection à court, moyen et surtout à long terme des ressources en eau souterraine.

Dans cet objectif, un grand nombre de méthodes des traçages d'essai et des modèles mathématiques sont actuellement bien développés. Ils prennent en compte les divers types d'interactions que les principales substances polluantes en solution dans l'eau peuvent subir au cours de leur transfert.

Il est généralement admis que la méthode des traçages d'essai est le moyen le plus sûr pour obtenir les paramètres caractérisant les polluants sur les terrains. De même manière que les pompages d'essai visent à déterminer des caractéristiques permettant de prévoir ensuite le comportement hydrodynamique d'une nappe, les essais de traçage devraient permettre la détermination des caractéristiques hydrodispersives facilitant par la suite la prévision des transferts de polluants solubles.

Ce travail mené au laboratoire d'hydrologie et d'hydrogéologie du département d'hydraulique, en collaboration avec le laboratoire de chimie des eaux et des corrosions (EOL), a pour but de comprendre la migration des traceurs artificiels sélectionnés (Chlorure de Sodium, Rhodamine- B, et colorant textile) injectés dans une formation sableuse homogène existante dans le banc d'essai puis dans une autre formation de même nature avec lentille utilisée comme milieu hétérogène. Le choix de ces trois traceurs est justifié par le fait qu'ils présentent des propriétés chimiques différentes.

Il s'agit d'analyser les mécanismes responsables des transferts des traceurs ainsi que d'estimer quantitativement, par des méthodes statistiques, les paramètres qui les dérivent, en relation avec la structure du milieu.

Pour compléter cette approche, la modélisation mathématique du transfert des substances chimiques a été envisagée.

La première partie de ce mémoire montre un aperçu théorique sur le comportement hydrodynamique du milieu poreux et des phénomènes physiques essentiels d'un transfert de masse, ainsi que les différentes méthodes permettant leur analyse.

La seconde partie est consacrée, d'une part à une description détaillée du banc d'essai hydrologique, et des protocoles expérimentaux hydrodynamique et hydrodispersif utilisés, d'autre part, à une présentation des résultats des différents essais réalisés, et l'interprétation des données préalablement acquises.

Nous présentons dans la troisième partie, la phase de modélisation numérique (modèle hydrodynamique et hydrodispersif), en utilisant le logiciel A.S.M, pour la validation de ces données acquises.

Enfin, comme conclusion, nous tenterons de préciser l'apport de ces travaux pour la connaissance des différents comportements des traceurs en milieu à porosité d'interstice.

Partie I : GENERALITES

Chapitre I : COMPORTEMENTS HYDRODYNAMIQUES DU MILIEU POREUX

Une étude hydrodynamique complète nécessite la connaissance du système aquifère, caractérisé par sa configuration et sa structure, les fonctions de son réservoir et ses comportements. L'aquifère est un complexe à deux fonctions en interactions : la fonction capacitive et conductrice.

La première fonction du réservoir est l'emménagement souterrain réglant le stockage et la libération de l'eau gravitaire. Il est identifié par les caractéristiques et la genèse de ses vides, pores et fissures.

La fonction conduite du réservoir, permet le transport de quantités d'eau et la transmission d'influence. Elle est imposée par la structure de l'aquifère : paramètres géométriques et hydrodynamiques. L'écoulement de l'eau souterraine est déterminé par trois groupes de paramètres hydrodynamiques : le coefficient de perméabilité et transmissivité, gradient et charge hydrauliques, débit d'une nappe et vitesse d'écoulement souterrain.

Les facteurs du comportement hydrodynamique de l'aquifère sont :

- les conditions aux limites : types de limites, débits des apports et des écoulements, niveaux piézométriques ;
- les variations de stock d'eau souterraine ou réserve régulatrice ;
- Le régime d'écoulement de l'eau souterraine dans l'aquifère, exprimé par le réseau d'écoulement ;
- L'état initial et les variations dans le temps des trois facteurs précédents : historiques des débits, des niveaux piézométriques et de la réserve régulatrice (Castany, 1982).

I. ETUDE DE LA FONCTION CAPACITIVE (RESERVOIR)

Le réservoir représente la trame solide de la structure de l'aquifère. L'eau souterraine mobile s'emmagine et circule dans les vides du réservoir d'où l'importance de leur étude, qui repose sur deux ensembles de techniques, en laboratoire et sur le terrain.

L'étude en laboratoire, sur l'échantillon intact prélevé par des techniques appropriées, portant sur la granulométrie, l'analyse structurale, les mesures de porosité, etc.

Sur le terrain, les études relèvent de la prospection géologique, appuyée par les moyens comme la télédétection, la géomorphologie appliquée, l'analyse structurale, les prospections géophysiques et les sondages.

I.1 ETUDE GRANULOMETRIQUE ET CARACTERISTIQUE DU MILIEU POREUX

L'étude granulométrique est l'ensemble des techniques de laboratoire, permettant la détermination des caractéristiques géométriques des milieux poreux (le diamètre et la surface des grains). Cette méthode a pour but de classer quantitativement des roches meubles, de dresser des cartes et trame de la distribution spatiale des paramètres hydrodynamiques.

L'analyse granulométrique est un tri, par des tamis standard, des grains en fourchettes de diamètres conventionnels. Une première opération est donc le classement des grains en gammes de diamètres déterminés ; c.à d. l'établissement d'une classification granulométrique.

Le traitement statistique des données de l'analyse granulométrique, utilisé en hydrogéologie, est la courbe granulométrique cumulative (Fig.1). Cette courbe permet la détermination des diamètres efficaces, d_{10} et d_{60} .

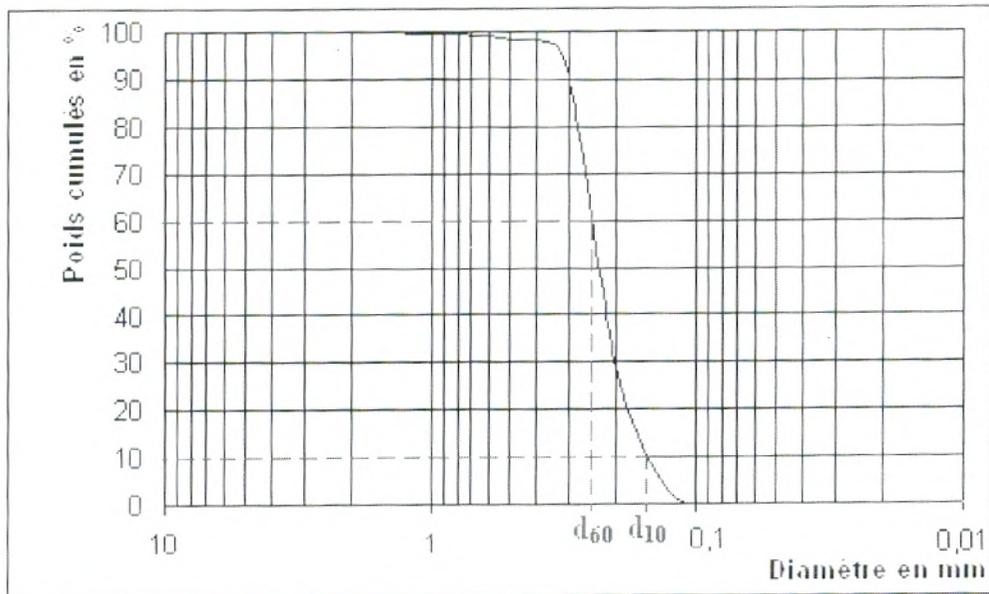


Fig. 01 : Courbe granulométrique cumulative.

En abscisses logarithmiques sont portés les diamètres des grains, en mm, en valeurs décroissantes, et en ordonnées linéaires les poids cumulés, en grammes, exprimés en pourcentage du poids de l'échantillon étudié.

- Calcul et interprétation de la courbe granulométrique

Deux caractéristiques de la courbe sont considérées :

- la position dans le diagramme, qui permet de classer l'échantillon et de le désigner par un terme lithologique précis ;
- sa pente qui donne une indication sur le type de granulométrie : uniforme (homogène), si la pente est voisine de la verticale ; ou variée (hétérogène), si la courbe s'étale dans le diagramme avec une large gamme de diamètres.

La courbe granulométrique permet de calculer deux paramètres principaux :

- le diamètre caractéristique, d_x , en mm, où x, représente le poids cumulé en %, est déterminé par la valeur lue en abscisses, correspondant à un pourcentage en poids cumulés.
- le coefficient d'uniformité, U, sans dimension, attribue une valeur numérique à la pente de la courbe. Il est calculé par l'expression :

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1)$$

Par convention, si U est compris entre 1 et 2 la granulométrie est dite uniforme, s'il est supérieur à 2, elle est variée.

Le coefficient de perméabilité est calculé par l'expression suivante :

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

Où :

K : Coefficient de perméabilité (cm²) ;

d_{10} : Diamètre efficace des grains.

I.2 POROSITE EFFICACE

La porosité efficace (n_e), sans dimension, exprimée en pourcentage, est le rapport du volume d'eau gravitaire (V_e) que le réservoir peut contenir à l'état saturé, puis libérer sous l'effet d'un égouttage complet, à son volume total (V_t).

$$n_e = \frac{V_e}{V_t} \quad (3)$$

I.3 EMMAGASINEMENT SOUTERRAIN

Le coefficient d'emménagement (S), sans dimension, est le rapport du volume d'eau libéré ou emmagasiné par unité de surface de l'aquifère en m^2 à la variation de charge hydraulique (Δh) correspondante.

Sur le terrain, le coefficient d'emménagement est calculé à partir des essais de pompage.

L'emménagement spécifique (S_s), exprimé en unité de volume d'eau libéré ou emmagasiné par unité de volume d'aquifère en m^3 sous l'action d'une variation unitaire de charge hydraulique (Δh). Il est mesuré sur le terrain, principalement par des pompages d'essai.

Dans l'aquifère à nappe libre, le coefficient d'emménagement est égal, en pratique, à la porosité efficace.

$$S = n_e = \frac{V_e}{V_t} \quad (4)$$

II. ETUDE DE LA FONCTION CONDUCTRICE DU RESERVOIR

La fonction conduite du réservoir assure le transport du flux souterrain et la transmission d'influences, différences de charge ou de pression, sous l'action de gradients. Il est rappelé que seule l'eau souterraine gravitaire participe à l'écoulement et est soumise aux lois de l'hydrodynamique souterraine.

La base fondamentale du calcul de quantités d'eau souterraine ou débit d'une nappe, par l'hydrodynamique souterraine, est la loi expérimentale de Darcy (Castany, 1982).

$$Q = K \times A \times i \quad (5)$$

Où :

Q : Débit d'une nappe (m^3/s) ;

K : Coefficient de perméabilité (m/s) ;

A : Section traversée (m^2) ;

i : Gradient hydraulique : égale à la perte de charge par unité de longueur (h/l).

La loi de Darcy est établie par des expériences de laboratoire répondant aux conditions suivantes : continuité, isotropie, homogénéité du réservoir et écoulement laminaire.

L'expression générale de la loi de Darcy dégage trois groupes de paramètres de l'écoulement de l'eau souterraine dans les aquifères :

- Coefficient de perméabilité, transmissivité et diffusivité ;
- Charge et gradient hydrauliques ;
- Débit d'une nappe et vitesse d'écoulement.

II.1 COEFFICIENT DE PERMEABILITE

La perméabilité est l'aptitude d'un réservoir à se laisser traverser par l'eau, sous l'effet d'un gradient hydraulique. Elle exprime la résistance du milieu à l'écoulement de l'eau qui le traverse. Elle est mesurée par deux paramètres : coefficient d'emménagement et la perméabilité intrinsèque.

Le coefficient de perméabilité (K) est défini par la loi de Darcy. C'est le volume d'eau gravitaire en m^3 traversant en une unité de temps, sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique, une unité de section en m^2 à la direction, de l'écoulement, dans les conditions de validité de la loi de Darcy.

La perméabilité intrinsèque (k) est le volume de liquide en m^3 d'unité de viscosité cinématique traversant en une unité de temps (s), sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique, elle s'exprime en m^2 ou en darcy.

II.2 TRANSMISSIVITE ET DIFFUSIVITE

II.2.1 Transmissivité

La transmissivité est égale au produit du coefficient de perméabilité (K) par l'épaisseur de l'aquifère (b) dans le cas d'une nappe captive et la tranche saturée ou l'épaisseur de la nappe dans le cas d'une nappe libre.

$$T = K \times b \quad (6)$$

Où :

T : Transmissivité (m^2/s) ;

K : Coefficient de perméabilité (m/s) ;

b : Epaisseur de l'aquifère ou la tranche saturée(m) ;

L'expression de la loi de Darcy devient alors :

$$Q = T \times L \times i \quad (7)$$

Incluant l'épaisseur de l'aquifère, la transmissivité permet de représenter sur les cartes, les zones de productivité. Elle est à la base de la discrétisation du calcul par mailles des modèles mathématiques. Elle est mesurée sur le terrain, par les pompes d'essai (Castany, 1982).

II.2.2 Mesure de transmissivité et du coefficient d'emménagement par essai de pompage

Les pompes d'essai de longue durée sont exécutés par un seul palier de débit, à débit constant, prolongé durant au moins 42 heures, avec un optimum de 72 heures. La remontée des niveaux doit être observée pendant une durée égale. L'exécution et l'interprétation des données mesurées, rabattements et temps, reposent sur l'emploi des expressions hydrodynamiques en régime transitoire, établies par Theis (1935) et ses successeurs (Wenzel, 1942 et Jacob, 1950 in Castany 1982).

Les rabattements ou les profondeurs du niveau d'eau, exprimés en m, de haut en bas, en ordonnées linéaires et les temps de pompage en abscisse logarithmiques. Les points obtenus tracent la droite moyenne représentative de l'expression de Jacob.

La Transmissivité est calculée par la pente de la droite représentative, qui est déterminée par l'accroissement des rabattements (ou des profondeurs des niveaux d'eau), au cours d'un

module logarithmique (c). Elle est calculée par l'expression de Theis et Jacob (1950), en régime transitoire :

$$T = \frac{0,183Q}{c} \quad (8)$$

Où :

T : Transmissivité (m²/s) ;

Q : Débit de pompage (m³/s) ;

c : Module logarithmique.

Le coefficient d'emmagasinement est obtenu par l'expression suivante :

$$S = \frac{2,25 T t_0}{x^2} \quad (9)$$

Où :

S : Coefficient d'emmagasinement ;

T : Transmissivité (m²/s) ;

t_0 : Temps fictif (s) : c'est le point d'intersection de la droite représentative avec le niveau piézométrique initial ;

x : Distance entre le piézomètre et le puits du pompage (m).

II.2.3 Diffusivité

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

$$D = \frac{T}{S} \quad (10)$$

Chapitre II : COMPORTEMENTS HYDRO-DISPERSIFS DU SYSTEME

I. RAPPELS SUR LE TRANSFERT DE MASSE EN MILIEU POREUX

Le transport ou la migration des éléments chimiques dans un milieu poreux ou fissuré résulte de la combinaison de trois mécanismes principaux : la convection, la diffusion moléculaire et la dispersion cinématique.

I.1 LA CONVECTION

La convection est due au déplacement de l'eau ; celle-ci entraîne le soluté selon sa vitesse propre. L'importance du flux de matière dû à la convection est fonction de la vitesse effective d'écoulement du fluide (u), de la porosité cinématique du milieu (ω) et de la concentration volumique de la solution (C), soit :

$$\phi_c = u \times \omega \times C = v \times C \quad (11)$$

Où :

ϕ_c : Flux massique unitaire de soluté par convection ($M/L^2/T$) ;

u : Vitesse effective d'écoulement du fluide (L/T) ;

ω : Porosité cinématique du milieu ;

C : Concentration volumique de la solution (M/L^3) ;

v : Vitesse de Darcy (L/T).

I.2 LA DIFFUSION MOLECULAIRE

C'est la migration d'espèces chimiques résultant du gradient de concentration ou de manière stricte de la différence des potentiels chimiques. Il faut distinguer la diffusion moléculaire du mouvement physique des particules qui se déplacent avec la circulation des eaux souterraines (phénomène de convection).

Les équations de La diffusion moléculaire ont été décrites par Fick :

- en régime permanent le flux massique J s'écrit :

$$J = -D^0 \text{grad}C \quad (12)$$

Où :

J : Flux massique ($M/L^2/T$) ;

D^0 : Coefficient de diffusion moléculaire (L^2/T) ;

C : Concentration volumique de la solution (M/L^3).

Et dans un espace monodimensionnel

$$J = -D^0 \frac{\partial C}{\partial x} \quad (13)$$

Où :

J : Flux massique ($M/L^2/T$) ;

C : Concentration (M/L^3) ;

x : Distance linéaire (L) ;

t : Temps (T)

- en régime transitoire

$$\operatorname{div}J = \operatorname{div}(D^0 \operatorname{grad}C) = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (14)$$

Et dans un espace monodimensionnel

$$D^0 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (15)$$

Dans les solutions aqueuses les coefficients de diffusions moléculaires de beaucoup d'espèces chimiques sont de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-5} cm²/s. Dans les milieux poreux, ces valeurs peuvent être plus basses. En effet le taux de diffusion moléculaire est d'autant plus petit que la porosité de la roche est faible ; par ailleurs le cheminement des particules n'est pas rectiligne d'où la définition d'un coefficient de diffusion effective (D').

$$D' = \frac{D^0 \Phi}{\tau^2} \quad (16)$$

Où :

D' : Coefficient de diffusion effective (L²/T) ;

D^0 : Coefficient de diffusion moléculaire dans la solution pure (L²/T) ;

Φ : Porosité ;

τ : Tortuosité.

1.3 LA DISPERSION CINEMATIQUE

La distribution de la vitesse de l'eau dans un pore n'est pas uniforme en raison de la viscosité du fluide qui conduit à une répartition parabolique des vitesses. Il s'ensuit des vitesses plus fortes au centre du pore. La géométrie variable entraîne des vitesses différentes. Les orientations des axes moyens des pores entraînent une distribution latérale des lignes de trajet et donc une dispersion transversale. Le transfert dispersif répond à une loi analogue à celle de Fick. Le flux massique correspond à :

$$Jm = -Dm \times \operatorname{grad}C \quad (17)$$

Où :

Jm : Flux massique (ML²/T) ;

Dm : Dispersion cinématique (L²/T) ;

C : Concentration (M/L³).

Le coefficient de la dispersion globale :

$$D = D^0 + Dm$$

En fait il est difficile de distinguer la diffusion de la dispersion. On simplifie le problème en supposant que dans les directions principales d'anisotropie (la première étant colinéaire à la vitesse moyenne d'écoulement) le tenseur comporte trois composantes :

$$\overline{D} = \begin{vmatrix} D_L & 0 & 0 \\ 0 & D_T & 0 \\ 0 & 0 & D_T \end{vmatrix} \quad (18)$$

Où :

D_L : Coefficients de dispersion longitudinale ;

D_T : Coefficients de dispersion transversale.

La relation liant ces coefficients à la vitesse microscopique moyenne d'écoulement (u) peut être décrite par le nombre de Péclet (Pfankuch 1963 in Mania, 2001) :

$$Pe = \frac{ux}{D^0} \quad (19)$$

Où :

u : Vitesse moyenne d'écoulement (L/T) ;

x : Distance linéaire (L)

Le rapport D_L/D^0 en fonction du nombre de Péclet indique l'existence de cinq régimes de dispersion : I (dispersion moléculaire pure), II (superposition), III (dispersion moléculaire prépondérante), IV (dispersion cinématique pure) et V (loi de Darcy)

I.4 RELATIONS GENERALES

En supposant les phénomènes d'adsorption et de désorption négligeables, on posera :

- en monodimensionnel

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \circ \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + Dm \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} \quad (20)$$

Diffusion moléculaire	Dispersion cinématique	Convection pure
--------------------------	---------------------------	--------------------

- en bidimensionnel en ne tenant compte que de la dispersivité longitudinale (α_L) et de la dispersivité transversale (α_T) on écrira :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} \quad (21)$$

- en écoulement radial au niveau d'un forage débitant un débit Q constant :

$$Q = 2\pi r b \times \Phi \times u \quad (22)$$

Où :

r : Rayon d'influence (L) : c'est la distance du puits à laquelle le rabattement est nul ;

b : Epaisseur de l'aquifère (L) ;

Φ : Porosité ;

u : Vitesse moyenne d'écoulement (L/T).

Si $A = 2\pi b$ alors

$$\alpha_L \frac{A}{r} \times \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (23)$$

Où :

A : Superficie de l'aquifère (m^2) ;

α_L : Dispersivité longitudinale (L) ;

C : Concentration (M/L^3) ;

x : Distance linéaire (L) ;

t : Temps (T).

I.5 PARAMETRES INFLUENÇANT LA DISPERSION

La dispersion est influencée par un très grand nombre de paramètres, qu'on peut classer en trois groupes :

- paramètres caractérisant le milieu poreux, dont la structure peut être décrite, d'une part par la porosité et la perméabilité des matériaux, d'autre part par la granulométrie des grains et des pores ainsi que le degré de consolidation du milieu ;
- paramètres caractérisant le régime d'écoulement : la distribution des vitesses et la distance de déplacement ;
- paramètres caractérisant les fluides (eau et soluté) étudiés : masse volumique, viscosité et coefficient de diffusion moléculaire, composant important de la dispersion.

II. L'ASPECT MATHEMATIQUE DE LA DISPERSION

Plusieurs méthodes ont permis d'aboutir à une bonne représentation mathématique du phénomène de dispersion de deux fluides miscibles (un soluté dissous dans de l'eau constitue une seule phase de fluide), en milieu poreux homogène et isotrope. Ces différentes méthodes ont été décrites par Fried et Combarous, 1971 et Bear, 1972 :

En absence de phénomène de sorption, de réactions chimiques, de décroissance radioactive et en ne considérant qu'une seule phase fluide, ces auteurs proposent l'équation suivante, équation aux dérivées partielles gouvernant le transfert de soluté :

$$\text{Div}(D.\text{grad}.C - uC) = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (24)$$

Où :

Div et grad : sont des opérateurs vectoriels ;

D : Dispersion (L^2/T) ;

C : Concentration du soluté (M/L^3) ;

u : Vitesse d'écoulement (L/T) ;

t : Temps (T).

L'équation ainsi établie, dite équation générale de la dispersion (en convection – dispersion), reste le modèle mathématique le plus acceptable et le plus simple pour représenter le phénomène de transfert de masse en milieu poreux homogène, mais uniquement en aval du point d'injection ou d'introduction du soluté dans la nappe (De Marsily, 1978 et Wang, 1987 in Hanich, 1991). Son application au milieu hétérogène doit être faite en considérant ce milieu globalement comme homogène, si l'échelle d'investigation est suffisamment grande pour atteindre le régime asymptotique de dispersion (dispersivité constante). Il faut noter que pour les aquifères alluvionnaires ce régime n'est jamais atteint du fait de leur grande hétérogénéité, ce qui pose un problème crucial quand il s'agit d'étudier le transfert de masse dans de tels milieux (Hanich, 1991).

III. METHODES DE TRAÇAGE

L'étude de la diffusion d'un polluant dans un aquifère sensible à une contamination, nécessite une bonne connaissance des modalités de transfert de l'eau et de la substance polluante. Dans cet objectif, un grand nombre de modèles mathématiques ont été développés. Ces modèles utilisent des paramètres représentant les propriétés physiques de l'aquifère (porosité, dispersivité, vitesse d'écoulement et perméabilité) et celles du soluté.

La méthode de traçage est la technique qui permet d'obtenir des informations sur le système aquifère étudié par l'observation du comportement d'une substance spécifique (traceur), après son introduction dans la nappe. Les traçages d'essai peuvent être classés en trois catégories suivant le régime d'écoulement de la nappe : naturel uniforme (à vitesse constante), provoqué à débit constant et alterné (superposition temporaire d'un écoulement provoqué à un écoulement uniforme).

III.1 REALISATION DE TRAÇAGE D'ESSAI

La réalisation d'un traçage d'essai consiste en la superposition d'un transport de traceur à l'écoulement de l'eau dans la nappe. Après l'injection d'une certaine quantité de traceur en un point (puits ou piézomètre) de la nappe, on suit son évolution en mesurant la concentration en un ou plusieurs autres points considérés comme la sortie du système traçage (point d'injection – points de prélèvement).

Pour sa réalisation, le traçage doit satisfaire à certaines conditions, dont les plus importantes sont les suivantes :

- utilisation d'un traceur le plus parfait possible ;
- utilisation sous des conditions hydrodynamiques bien définies.

III.1.1 Traceur

Un traceur est toute substance, atomique ou moléculaire, dont les propriétés physiques, chimiques et biologiques permettent l'identification, l'observation et l'étude de son comportement (dispersion ou concentration) durant un certain processus.

En hydrogéologie, le traceur idéal doit être représentatif du mouvement de l'eau, c'est-à-dire que son comportement à l'écoulement doit s'approcher de celui de l'eau elle-même. Pour cela, les propriétés suivantes sont requises :

- stabilité chimique ;
- tendance à l'adsorption la plus faible possible ;
- bonne solubilité à l'eau.

A cela s'ajoutent quelques conditions pratiques importantes :

- innocuité pour l'être humain, les animaux et les plantes (biocénose) ;
- limite de détection basse ;
- coûts peu élevés (traceur et analyse) ;
- quantification aisée ;
- pas ou peu de charge polluante pour les eaux.

Les traceurs peuvent être naturels, déjà présents dans le milieu, ou bien artificiels.

III.1.1.1 Les traceurs naturels

Les traceurs ou les marqueurs peuvent exister naturellement dans la nature. Ce sont alors des traceurs ou des marqueurs naturels. On peut citer les isotopes stables ou radioactifs de l'eau (^{18}O , ^2H , ^3H), les éléments chimiques dissous (Cl^- , Si aqueuse, Br^- , Na^+ , ...).

III.1.1.2 Les traceurs artificiels

Introduits par l'homme en quantité importante, ces traceurs appartiennent à deux catégories : les traceurs chimiques et les traceurs fluorescents. Parmi les traceurs chimiques les plus utilisés, on trouve une grande variété de sels : le bichromate de sodium ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), l'iodure de sodium (NaI), le chlorure de sodium (NaCl) et le chlorure de potassium (KCl). Les traceurs fluorescents les plus utilisés sont les substances organiques colorées (Fluorescéine sodique, Uranine, colorants à la Rhodamine, Eosine, Pyranine,...) dérivées d'un noyau xanthérique.

III.2 TYPES DE TRAÇAGE

Suivant le nombre de puits mis en œuvre dans une expérience de traçage, on distingue deux types de traçage : les traceurs peuvent être soit transportés naturellement par l'écoulement naturel ou être artificiellement perturbés par injection ou pompage avec des gradients hydrauliques sans commune mesure avec le système naturel (Mania, 2001).

III.2.1 Test avec un gradient hydraulique naturel

Il est réalisé avec une quantité faible de traceur, ce qui minimise les perturbations éventuelles du potentiel naturel. La distribution des données de concentration doit permettre la détermination des vitesses, des dispersivités et parfois les paramètres d'équilibre et de la cinétique.

Il est nécessaire d'avoir plusieurs dizaines de points de mesure.

III.2.2 Test pulsé sur un puits unique

Ce type de traçage, comme son nom l'indique, ne nécessite qu'un seul puits pour sa mise en œuvre. Il permet une investigation localisée sur une courte distance autour du puits et limitée verticalement à la hauteur crépinée. On injecte à débit constant un traceur pendant une période de temps fixée puis on pompe au même débit (Fig.2). La concentration du traceur dans l'eau est fonction du temps ou du volume total de l'eau pompée.

Ce test a une application limitée car il est impossible d'extrapoler d'une faible échelle à une grande échelle.

Le manque d'observations sur le mode de dispersion à proximité du puits fait que les résultats d'estimation de la dispersivité sont très grossiers.

C'est un test qui peut néanmoins évaluer les processus géochimiques mais à une échelle restreinte.

III.2.3 Test avec injection sur un puits unique (ou pompage) et des observations multiples sur piézomètres

Ce test de traçage utilise l'écoulement transitoire radial convergent ou divergent.

Le radial convergent implique que le traceur soit injecté sur un piézomètre d'observation et l'on surveille son mouvement sur le puits de pompage.

Le radial divergent nécessite une injection dans le puits d'injection et un suivi sur les piézomètres d'observation.

Ce dernier test est préférable au premier car dans le cas du convergent il y a un contre balancement de la dispersion par l'écoulement d'où le panache beaucoup plus étroit (Fig.2).

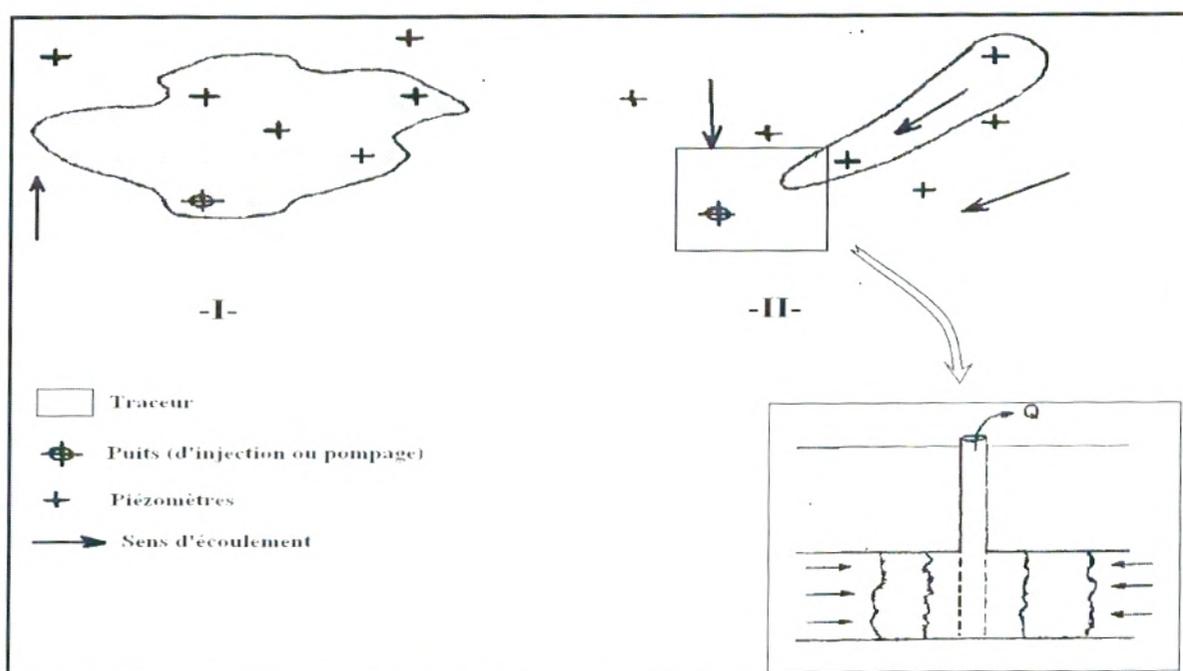


Fig. 02: Test de traçage sur un puits unique à piézomètres d'observation multiples.
(I) : l'injection du traceur dans le puits ;(II) : pompage dans le même puits.

III.2.4 Test de traçage avec deux puits (le doublet)

L'eau qui est pompée sur un puits est réinjectée dans le deuxième pour créer un régime permanent et on lui ajoute un traceur à concentration constante. L'échantillonnage est réalisé régulièrement sur le puits de pompage (Fig.3.a).

Dès que le traceur réapparaît il faut accroître la concentration du traceur injecté. On peut utiliser une autre eau d'injection. Pour améliorer la qualité des résultats paramétriques il faut implanter plusieurs piézomètres d'observation entre les puits du doublet.

Dans le cas du milieu fracturé il est nécessaire d'injecter et de pomper entre les obturateurs (Fig.3.b).

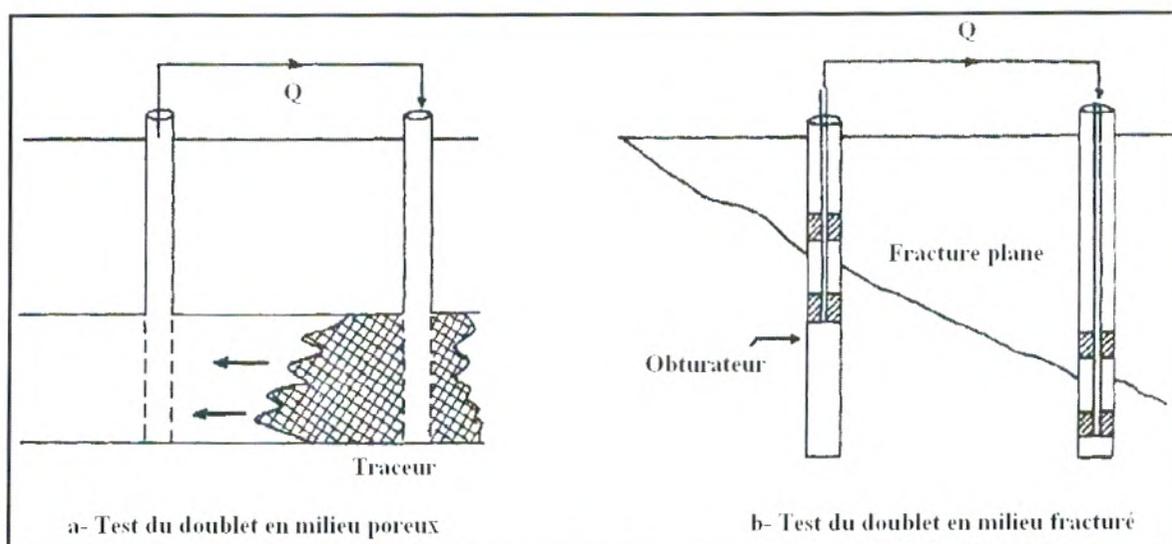


Fig. 03 : Test de traçage avec deux puits (le doublet).

III.3 INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE TRAÇAGES

L'interprétation des traçages est souvent délicate car le schéma d'un transfert hydrodispersif pur dans une nappe monocouche homogène sur toute son épaisseur est rarement tout -a- fait exact. Dans la mesure où l'ensemble de la courbe de restitution obtenue sur le terrain est assimilable à une courbe théorique du schéma hydrodispersif pur selon le couple concentration/temps (Fig.4), il est possible d'en déduire les caractéristiques hydrodispersives de transfert dans l'aquifère.

En considérant le transfert comme uniforme ou à débit constant dans un milieu homogène, on peut utiliser les méthodes analytiques pour l'interprétation des traçages. Celles-ci sont basées sur des solutions explicites. Ces méthodes analytiques s'appuient soit sur un traitement statistique (Bear, 1972 ; Fried et Coumbarnous, 1971), soit sur les expressions adimensionnelles des solutions explicites traduites en abaques (Sauty, 1977 ; Crampon, 1983 ; Crampon, 1987), ou bien par traitement analytique des données expérimentales (Basak et Murty, 1979, Gupta, 1980, Crampon, 1980 in Mania, 2001 ; Wang, 1987).

L'application des solutions d'identification (Ecart type, Variance réduite, Inverfc, Wang) repose sur les propriétés de la courbe de restitution de Gauss où les paramètres statistiques peuvent être déterminés à partir de la courbe de restitution $C=f(t)$ (Fig.4), ou d'une courbe cumulative (Fig.5). Ces paramètres peuvent servir pour le calcul des valeurs typiques : moyenne, médiane, mode ; des paramètres de dispersion : moments d'ordre 1 à 4 ; et des paramètres de forme de la courbe de restitution : dissymétrie, aplatissement (Mania, 2001).

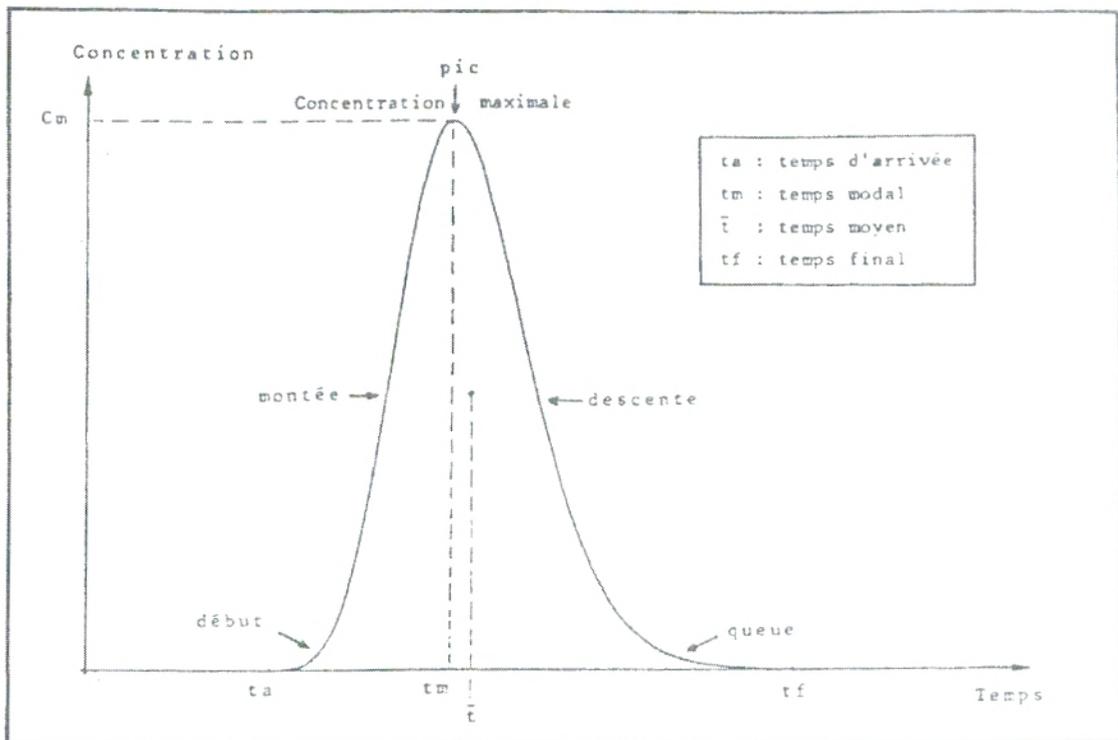


Fig. 04: Courbe de restitution (évolution de la concentration en fonction du temps à distance fixe).

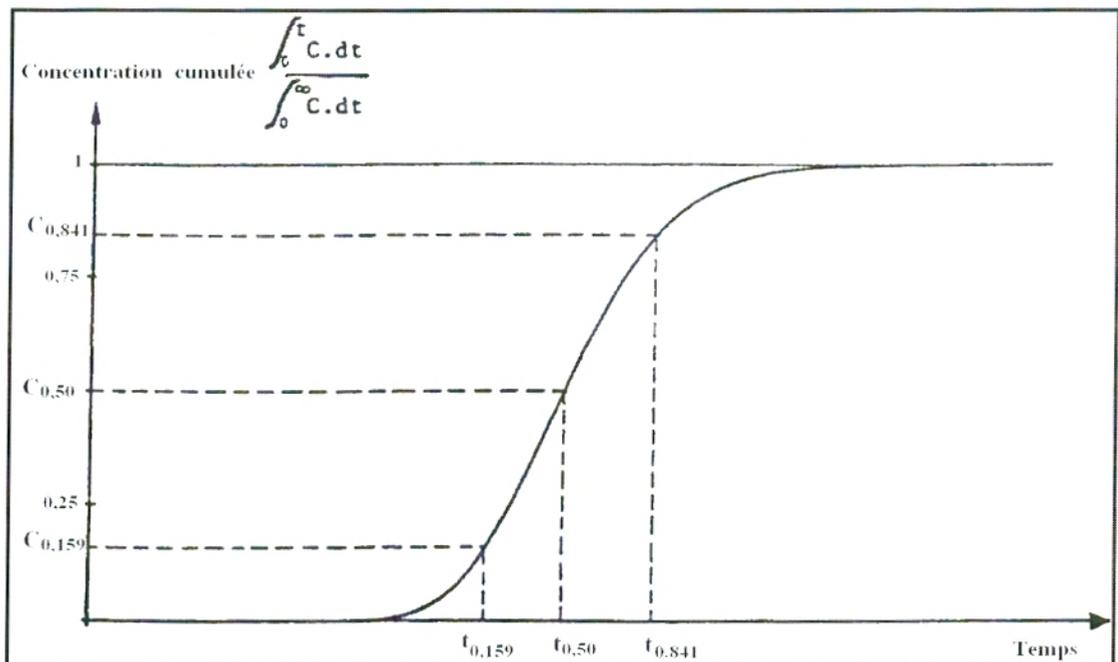


Fig. 05 : Courbe cumulative de la concentration en fonction du temps pour une distance fixe.

De nombreuses méthodes d'identification de la dispersivité à partir des résultats expérimentaux ont pu être testées grâce à l'utilisation de plusieurs équations approchées qui permettent d'obtenir ce paramètre directement à l'aide de la courbe de restitution et de la concentration maximale (C_m).

III.3.1 Méthode dite "Ecart- type" (Fried et Comibarnous, 1971)

Fried et Comibarnous (1971) montrent que le phénomène de dispersion des particules peut être traduit par une fonction à distribution normale. La méthode dite «Ecart type» consiste à appliquer une méthode graphique de détermination de l'écart type de la loi de Gauss à la fonction erf.

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

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right) \quad (25)$$

Où, Les deux paramètres caractéristiques sont :

m : Moyenne ;

σ : Ecart type

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

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y-m}{\sigma}\right)^2\right) dy \quad (26)$$

La courbe représentative de F(x) est une courbe symétrique par rapport au point (m ; 0,5) (Fig.6).

Une propriété de cette fonction F est que les points (m + σ) et (m - σ) ont des ordonnées symétriques situées à 0,341 de part et d'autre de l'axe des ordonnées.

On détermine alors aisément l'écart type σ par simple rapport graphique d'une réalisation expérimentale F(x).

$$\sigma = \frac{F^{-1}(0,841) - F^{-1}(0,159)}{2} \quad (27)$$

Une certaine parenté existant entre la fonction erf et la fonction de répartition de la loi de Gauss, on peut écrire la relation (24) sous la forme suivante :

$$\frac{C}{C_0} = 1 - F(x) \quad (28)$$

Où :

C : Concentration du soluté à un instant (t) ;

C₀ : Concentration initial du soluté (traceur).

Où F(x) est la fonction de répartition d'une loi de Gauss dont la moyenne est :

$$m = 2D \times t \quad (29)$$

Où :

D : Coefficient de dispersion ((L²/T) ;

t : temps (T)

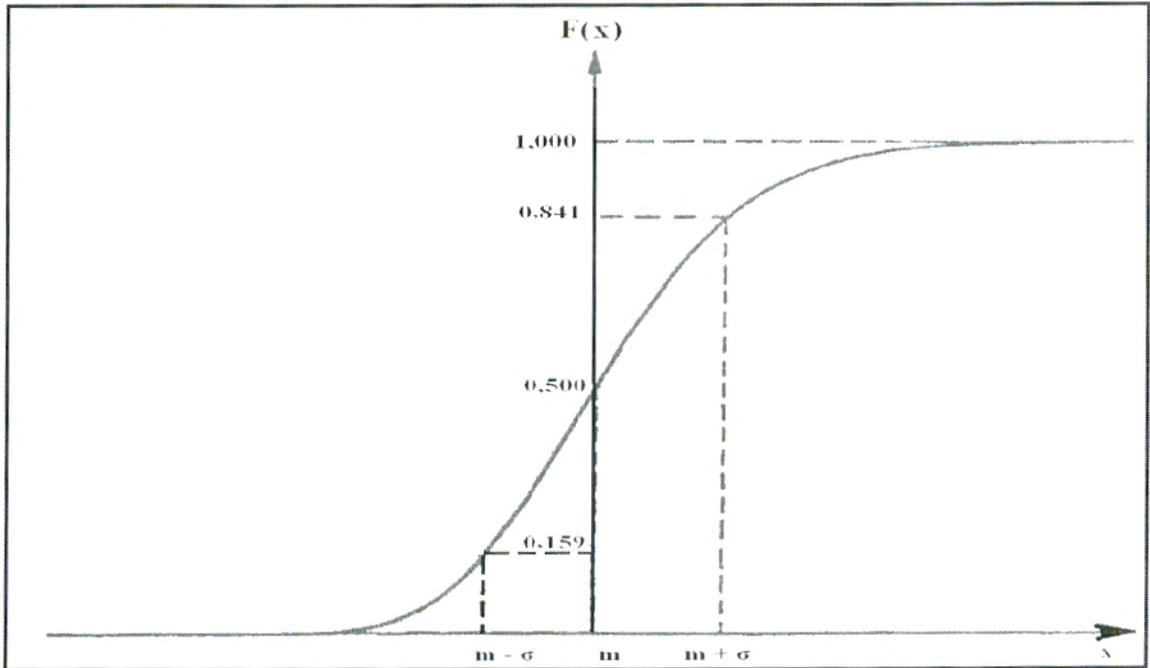


Fig. 06 : Représentation graphique de la fonction de répartition de la loi de Gauss. Avec m : moyenne, σ : écart type.

Détermination du coefficient de dispersion D.

Ne disposant que de la courbe cumulative (Fig.5) en fonction de t pour x fixé, on définit les valeurs $t_{0,841}$ et $t_{0,159}$ correspondant aux concentrations cumulées 0.841 et 0.159. On écrit :

$$\frac{x - ut_{0,841}}{\sqrt{2Dt_{0,841}}} - \frac{x - ut_{0,159}}{\sqrt{2Dt_{0,159}}} = 2 \quad (30)$$

D'où

$$D = \frac{1}{8} \left(\frac{x - ut_{0,841}}{\sqrt{t_{0,841}}} - \frac{x - ut_{0,159}}{\sqrt{t_{0,159}}} \right)^2 \quad (31)$$

Lorsque la pente de la zone centrale de la courbe cumulée est forte, Fried et Combarrous, (1971) proposent de simplifier cette formule (31) en remplaçant 15.9 et 84.1 par 50 (valeur centrale correspondant à la concentration de 50%). La relation devient alors :

$$D = \frac{u^2}{8t_{0,50}} (t_{0,159} - t_{0,841})^2 \quad (32)$$

III.3.2 Méthode dite de la variance réduite

Les courbes représentant l'évolution temporelle de la concentration du traceur montrent des formes différentes, plus ou moins symétriques par rapport au temps modal. Cette symétrie

peut être appréciée par la valeur d'un paramètre : le coefficient de variation qui est égale au rapport de l'écart-type σ et la moyenne m .

Dans le cas d'expérimentations réalisées à distance fixe, on calcule la variance des temps de transit du traceur par la relation suivante :

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^\infty (t - \bar{t})^2 C dt}{\int_0^\infty C dt} \quad (33)$$

Où :

\bar{t} : Moyenne arithmétique pondérée des temps ou au temps moyen de transport du soluté ;

C_v : Coefficient de variation qui s'écrit alors :

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{t}} \quad (34)$$

A partir d'exemple théorique et de la solution explicite de transfert $C(t, x)$, il existe une relation linéaire entre les variables logarithmiques du coefficient de variation et du nombre de Péclet hydrodynamique. L'équation est de type :

$$\log(c_v) = A \log(P) + B \quad (35)$$

En posant :

$$c_v = \frac{\sigma}{\bar{t}} \quad \text{et} \quad P = \frac{x}{\alpha}$$

Il vient alors :

$$\frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} = \frac{2\alpha}{x} \quad (36)$$

Fried et Combarous, (1971) détermine une variance réduite : $\sigma'^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2}$ et on exprime alors la dispersivité par la relation suivante :

$$\alpha = \frac{1}{2} \sigma'^2 x \quad (37)$$

III.3.3 Méthode "Inverfc" (Gupta et al. 1980)

Gupta et ses coéquipiers, 1980, reprennent l'équation de dispersion (37) proposée par Ogata et Banks, 1961, en écoulement monodimensionnel, suite à une injection en échelon :

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{x - ut}{\sqrt{4Dt}} \quad (38)$$

Et ils écrivent, en utilisant les propriétés de la fonction erfc, sous la forme d'une relation linéaire :

$$\frac{x - ut}{\sqrt{4t}} = \sqrt{D} \times \text{inverfc} \frac{2C}{C_0} \quad (39)$$

La pente de la droite, équivalente à la racine carrée du coefficient de dispersion permet de déterminer la dispersivité :

$$\alpha = \frac{D}{u} \quad (40)$$

III.3.4 Méthode des abaques de Sauty, 1977 et de Crampon, 1983

Sauty a traduit les solutions explicites en termes adimensionnels de concentration, temps et distance (C_R , T_R , X_R , Y_R) qui lui ont permis de proposer différents abaques.

Où :

C_R : Concentration réduite = concentration mesurée à l'instant t / la concentration maximale

T_R : Temps réduit = Temps à l'instant t / temps de transfert par convection pur

X_R : Nombre de Péclet.

La variation des courbes réduites est due aux valeurs différentes du nombre de Péclet.

L'application de cette méthode s'effectue en comparant la courbe expérimentale aux courbes des abaques, Sauty préconise un calage sur le début, la montée et le pic des courbes.

Les caractéristiques hydrodispersives sont ensuite calculées par les relations :

$$\alpha = \frac{x}{P} \quad (41)$$

$$\omega = \frac{Qt_c}{xS} \quad (42) \quad \text{Porosité, en écoulement monodimensionnel uniforme}$$

$$\omega = \frac{Qt_c}{\pi e r^2} \quad (43) \quad \text{Porosité, en écoulement radial convergent}$$

III.3.5 Méthode graphique linéaire (Wang, 1987)

Wang propose une méthode simple de détermination de la dispersivité et du temps de transfert par convection pure à partir des solutions explicites classiques. A partir des données brutes de temps et de concentration, la méthode graphique linéaire consiste à reporter sur papier millimétré : en ordonnée, la variation des logarithmes népériens du produit concentration – temps pendant un intervalle de temps (dt), et en abscisse, l'inverse du produit (t) ($t+dt$) (Fig. 7).

On pose alors :

$$H = \ln(Ct^{1.5})$$

Soit H' , la dérivée par rapport au temps :

$$H' = \frac{dH}{dt}$$

Wang démontre la relation :

$$H' = aX + b$$

Où : $X = \frac{1}{t^2}$

Pratiquement, en discrétisant la déviation, il suffit de calculer pour un pas de temps relativement petit deux couples de valeurs :

$$C(t) \text{ et } t \quad \text{et} \quad C(t+dt) \text{ et } t+dt$$

On établit alors :

$$H' = \frac{\ln(C(t+dt)(t+dt)^{1,5}) - \ln(C(t)t^{1,5})}{(t+dt) - t} \quad (44)$$

$$X = \frac{1}{(t+dt).t} \quad (45)$$

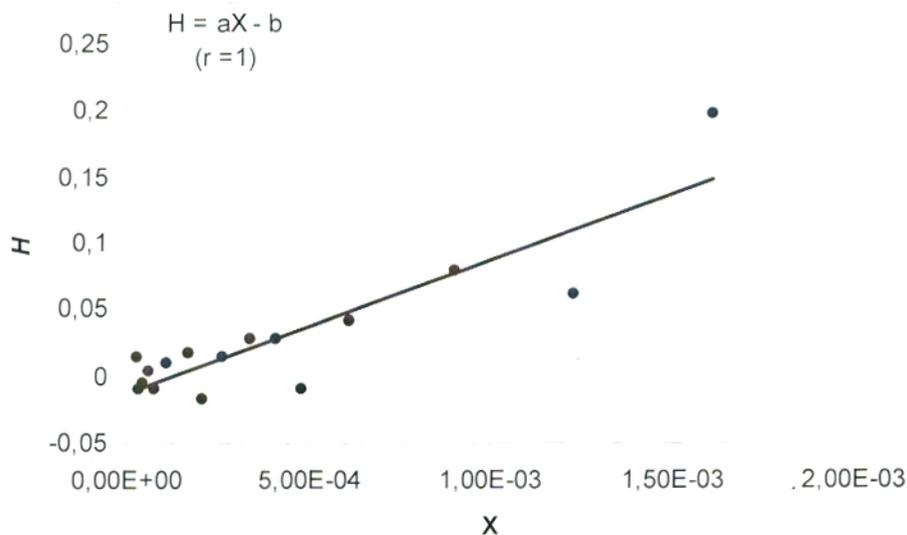


Fig. 07 : Détermination de la dispersivité par la méthode graphique linéaire de Wang pour traçage d'essai.

Les points représentatifs de l'expérience s'alignent et permettent de tracer une droite d'équation : $H' = aX + b$

Le nombre de Péclet et le temps de transfert par convection pure peuvent être exprimés en fonction des paramètres a et b de l'équation de cette droite. Dans le cas de la solution explicite C, ils s'écrivent :

$$P = 4\sqrt{-ba} \quad (46)$$

$$tc = \sqrt{-\frac{a}{b}} \quad (47)$$

L'avantage de cette méthode est sa facilité de mise en œuvre. Elle permet en outre de se focaliser sur la montée seule des courbes de restitutions, permettant de traiter séparément les phénomènes de convection- dispersion des phénomènes secondaires (diffusion moléculaire, sorption).

III.3.6 Méthode des moments

Les paramètres (t_c) : temps de transfert par convection pure, et (P_{ed}) peuvent être déterminé à partir des expressions de divers temps caractéristiques de transfert que l'on appelle méthode des moments (Zuber, 1974 in Mania 2001).

Pour un écoulement monodimensionnel et radial convergent, l'estimation des paramètres hydrodispersifs (α_L et ω) nécessite de trouver la valeur de (P_{ed}) local : $\alpha_L = x / P_{ed}$ (x la distance macroscopique de transfert) et la valeur de (t_c) : $\omega = \hat{u} t_c / x$ (\hat{u} la vitesse de Darcy).

La détermination des paramètres (α_L et ω) revient à estimer les valeurs de (P_{ed}) local et (t_c).

a. Ecoulement radial convergent, injection instantanée

Les différents temps caractéristiques d'un transfert radial convergent sont donnés dans le tableau (01) :

Tableau 01 : Temps caractéristiques d'un transfert radial convergent

temps	Expression
t_M	$t_c(\sqrt{9/P_{ed}^2 + 1} - 3/P_{ed})$
\bar{t}	t_c
t_h	$t_c(1 + 2/P_{ed})$
\bar{t}^2	$t_c^2(1 + 2/P_{ed})$
σ^2	$t_c^2 2/P_{ed}$

Où :

t_M : Temps modal ;

\bar{t} : Temps moyen ou moyenne arithmétique pondérée des temps de 0 à l'infini ;

t_h : Temps harmonique ou moyenne harmonique pondérée des temps ;

t_c : Temps de transfert par convection pur ;

\bar{t}^2 : Temps carré moyen ou moyenne arithmétique pondérée des carrés des temps

σ^2 : Variance des temps de transit du traceur.

Le nombre de Péclet (P_{ed}) et le temps de transfert par convection pure (t_c) peuvent être déterminé à partir des relations suivantes :

$$\bar{t} = t_c \text{ et } \sigma^2 = t_c^2 \frac{2}{P_{ed}} \quad (48)$$

$$\text{Soit : } P_{ed} = \frac{2(\bar{t})^2}{\sigma^2} \quad (49)$$

b. Ecoulement monodimensionnel, injection instantanée

Les différents temps caractéristiques d'un transfert pour un milieu infini peuvent être récapitulés dans le tableau (02) ci-dessous :

Tableau 02 : Temps caractéristiques d'un transfert naturel monodimensionnel

temps	Expression
t_M	$t_c(\sqrt{1/P_{ed}^2 + 1} - 1/P_{ed})$
\bar{t}	$t_c^2(1 + 2/P_{ed})$
t_h	t_c
\bar{t}^2	$t_c^2(1 + 6/P_{ed} + 12/P_{ed}^2)$
σ^2	$t_c^2(2/P_{ed} + 8/P_{ed}^2)$

Il suffit de choisir deux de ces équations pour déterminer les deux paramètres inconnus (P_{ed}) local et (t_c).

$$t_h = t_c \quad \text{et} \quad \bar{t} = t_c^2 \left(1 + \frac{2}{P_{ed}}\right)$$

Donc :

$$P_{ed} = \frac{2t_h}{\bar{t} - t_h} \quad (50)$$

Avec : $P_{ed} = \frac{ux}{D_l}$ et $t_c = \frac{x}{u}$

***Partie II* : EXPERIMENTATIONS, RESULTATS ET
INTERPRETATIONS**

Chapitre III : ESSAIS HYDRODYNAMIQUES SUR LES AQUIFERES SIMULES A NAPPE LIBRE

I. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI HYDROLOGIQUE

Le banc d'essai hydrologique est un appareil utilisé au laboratoire comme modèle réduit du système hydrologique "cycle et bilan de l'eau" (Fig. 08). Il est constitué essentiellement :

- d'un bassin de 1m de largeur, 2m de longueur, et de 15cm maximum de hauteur, constitué de 2 puits de pompage et de 20 piézomètres liés à un manomètre, terminé à ses extrémités par deux canaux, l'un d'alimentation latérale, l'autre de décharge ou exutoire ;
- des becs d'alimentation situés au dessus du bassin, simulent une alimentation pluviométrique ;
- le réservoir de vidange placé au-dessous du bassin, assure l'alimentation et la récupération de l'eau.

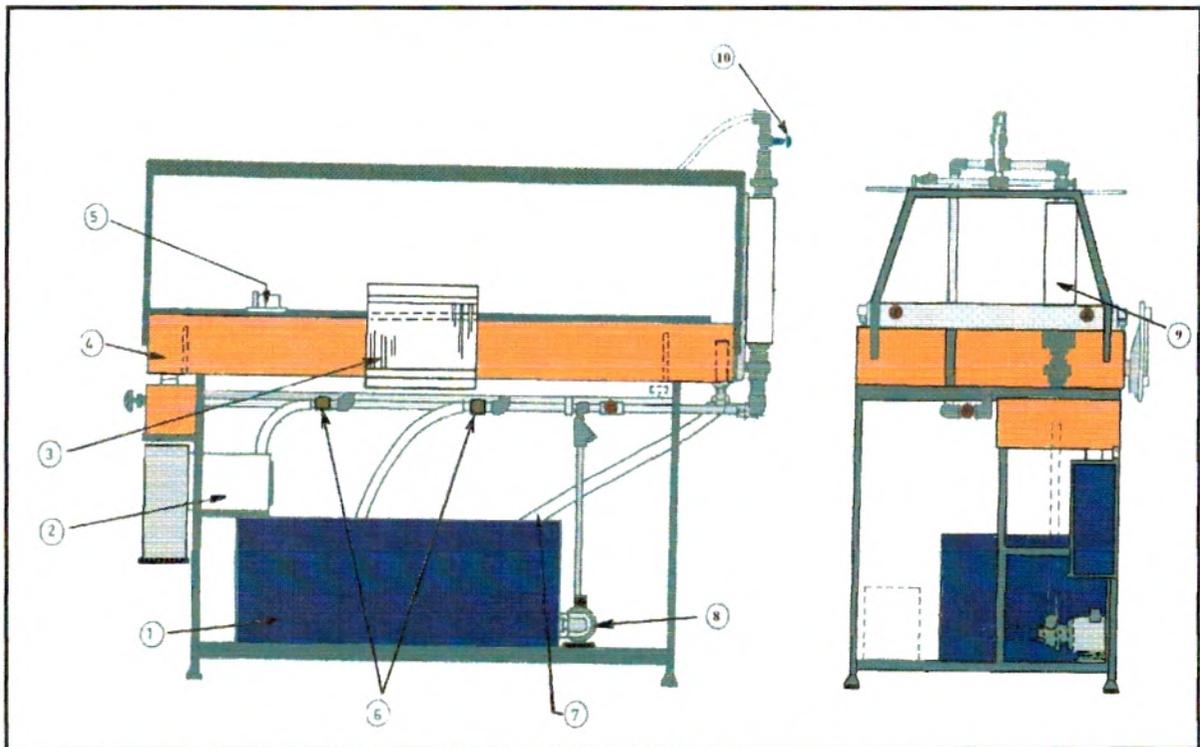


Fig.08 : Représentation du banc d'essai hydrologique.

(1) Réservoir, (2) Mesure du débit de sortie, (3) Piézomètres manométriques, (4) Banc d'essai hydrologique, (5) Bassin du banc d'essai hydrologique, (6) Vannes des puits de pompage, (7) Tuyau de décharge, (8) Pompe, (9) Régulateur de débit, (10) Vanne d'alimentation pluviométrique simulée.

II. FONCTIONNEMENT DU BANC D'ESSAI

C'est un appareil qui sert à montrer, à petite échelle, quelques processus physiques concernant l'hydrogéologie.

L'alimentation en eau de l'équipement est assurée grâce à une pompe électrique centrifuge montée au niveau du sol à côté du réservoir de vidange. L'eau passe à travers une conduite ainsi qu'un débitmètre, et ensuite arrive aux trois entrées des vannes de contrôle. Deux d'entre elles servent au contrôle du débit qui alimente latéralement l'amont et l'aval du bassin, et la troisième, à celle qui alimente les becs (alimentation par précipitation).

Lorsque le bassin est rempli par le matériau utilisé, le profil de la surface pour les expériences de ruissellement peut être formé par le racleur conçu en le dressant tout au long des rails de l'instrument montés sur les parois. Le ruissellement est séparé du bassin versant par la sortie du déversoir et ainsi, on peut mesurer le débit par un canal de mesure gradué, qui doit être ajusté à la position horizontale par l'ajustement des vis de niveau (Instruction manual for S 12-00 : hydrology system, 1983 ; Bessedik, 1995).

L'eau coule du canal de mesure du débit vers le réservoir de vidange et par conséquent complète le cycle.

Le niveau piézométrique peut être obtenu par le manomètre qui se trouve à côté du bassin. Chaque tube manométrique ou piézomètre est réalisé à un point de pression à la base du bassin.

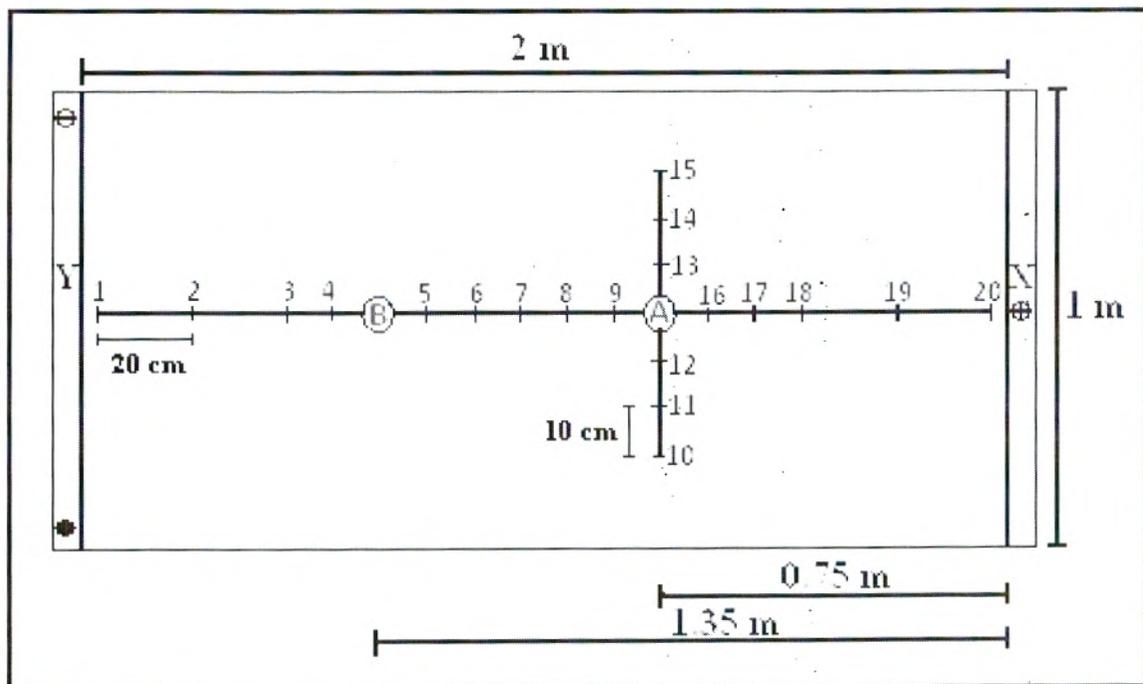


Fig.09 : Localisation des puits et des piézomètres.

(A et B) : Puits de pompage, (1, 2, 3, ..., 20) Piézomètres ou manomètres, (X) : Point d'alimentation, (Y) : points de décharge (exutoire).

III. LE CHOIX DU MATERIAU POUR LES ESSAIS

Le diamètre et la qualité du matériau utilisé pour le bassin peuvent être choisis selon les besoins de l'expérimentateur. Les différentes expériences réalisées sont effectuées sur des milieux poreux. Pour un premier cas, on a utilisé un sable de plage (plage Targa), dont la courbe granulométrique est représentée en annexe I.a afin d'obtenir un milieu homogène et continu, sur une épaisseur constante de 15cm pour tout le bassin.

Pour le cas du milieu hétérogène, on a retenu la même formation sableuse précédente dans laquelle a été insérée une lentille de perméabilité plus faible. Cette dernière est constituée d'un mélange du même sable et de calcaires argileux à différents pourcentages (15 et 30% du mélange total). Le choix de ces faibles pourcentages a été effectué afin d'éviter de faibles perméabilités pouvant bloquer les processus physiques étudiés sur le banc d'essai.

L'analyse calcimétrique du mélange, réalisée au laboratoire, a montré qu'ils sont constitués de 52% de carbonate de calcium (CaCO_3). Leurs classifications granulométriques a montré l'existence d'une masse importante de grains de diamètres inférieurs à $80\mu\text{m}$. Pour la détermination de la granulométrie de ces derniers, on a utilisé la méthode granulométrique par sédimentation.

III.1 Méthode granulométrique par sédimentométrie

III.1.1 Préparation de l'échantillon

La sédimentométrie est effectuée sur un échantillon de 20g de particules sèches prélevées dans le tamisat à $80\mu\text{m}$. Pour ce faire, l'échantillon a été imbibé dans l'éprouvette d'essai avec 500 cm^3 de solution défloculante, composée de 440 cm^3 d'eau distillée et 60 cm^3 d'une solution à 5 % d'hexaméta-phosphate de sodium. Ce traitement a pour but d'éviter la floculation des grains argileux pendant la sédimentation.

Après imbibition dans la solution défloculante, pendant une durée de 15h environ, la prise d'essai est soumise pendant 3 minutes minimum à l'agitation à la vitesse de 10 000 tr/min. La suspension dispersée, ainsi que les eaux de rinçage de l'agitateur et de son récipient, sont alors immédiatement versées dans l'éprouvette d'essai, dont le volume est complété à 2 litres avec de l'eau distillée.

Une autre éprouvette, de 2l contenant 1940 cm^3 d'eau distillée et 60 cm^3 de solution défloculante, est préparée comme témoin.

III.1.2 Réalisation des mesures

Les mesures sont effectuées à l'aide d'un densimètre gradué. Avant de plonger ce dernier dans la solution, on a agité vigoureusement la suspension avec un agitateur manuel afin d'obtenir une concentration uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette.

Ensuite on déclenche le chronomètre, et on plonge délicatement le densimètre dans la suspension. Les lectures sont effectuées aux temps, t , égaux à 20, 30 secondes, 1, 2, 5, 10, 30 minutes, 1, 2, 5, 24 heures. A chaque mesure, on relève la densité (ρ) lue et on note le nombre de graduation (R) correspondant.

III.1.2.1 Calcul du diamètre D des particules et des tamisas cumulés

Ce calcul s'effectue en utilisant la loi de Stokes qui donne la vitesse de chute des particules sphériques dans un liquide. Celles-ci sont soumises à la force de pesanteur verticale et descendante et à la poussée d'Archimède, verticale et ascendante. La chute de ces particules se fait à vitesse constante et s'exprime par la relation suivante :

$$D^2 = 18\eta \frac{V_l}{(\gamma_s - \gamma_w)} \quad (51)$$

Où :

D : Diamètre de la particule (m) ;

η : Viscosité dynamique de la solution : celle-ci est fonction de la température (Pa×s) ;

V_l : Vitesse limite de chute des grains (m/s) : c'est le quotient de la hauteur de la chute (Hr) par le temps de chute (t) ;

γ_s : Poids volumique des grains solides (kN/m^3) : la valeur moyenne est de $26,5 \text{ kN/m}^3$;

γ_w : Poids volumique de l'eau (kN/m^3), égal à 10 kN/m^3 .

La relation (51) peut s'écrire, pour un liquide et un solide donnés comme suit:

$$D = K \sqrt{\frac{hr}{t}} \quad (52)$$

Avec :

$$K^2 = \frac{18\eta}{(\gamma_s - \gamma_w)} \quad (53)$$

Où :

K : coefficient ;

Hr : Quotient de la hauteur de la chute (m) ;

t : Temps de chute (s).

III.1.2.2 Calcul des tamisas cumulés

Le pourcentage (p) des grains de diamètre inférieur à D qui sont encore en suspension à l'instant (t), s'exprime en :

$$p = \frac{V \cdot \gamma_s \cdot Rc \cdot \gamma_w}{10 \cdot W (\gamma_s \cdot \gamma_w)} \quad (54)$$

Où :

p : Pourcentage des particules de diamètre inférieur ou égale à D (par rapport à la masse de la prise d'essai à l'état sec) ;

V : Volume de la suspension (m^3) ;

Rc : Lecture corrigée du nombre de division ($Rc = R + m$) comptées entre la graduation 1,000 0 et la graduation d'affleurement ;

W : Masse de sol sec mis en suspension et prélevé sur le tamisa à $80\mu\text{m}$ (N) ;

γ_s : Poids volumique des grains solides (N/m^3) ;

γ_w : Poids volumique de l'eau ($10 \times 10 \text{ N/m}^3$).

III.1.3 Résultats

Tableau 03 : Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie

Pourcentage des éléments fins analysés par rapport à l'échantillon totale 0/D : P= 33,33%					
Temps des lectures	Lecture R	Température °c	$D = K \cdot \sqrt{\frac{hr}{t}}$ (µm)	% de grains <D P=	Tamis par rapport à l'échantillon total P.p=
20 secondes	1,0090	23	80	33,3	12,6
30 secondes	1,0088	23	75	21	12,3
1 minute	1,0082	23	60	20,55	11,7
2 minutes	1,0075	23	43	19,5	11,7
5 minutes	1,0055	23	30	18,46	9,15
10 minutes	1,0048	23	19,5	15,25	8,47
30 minutes	1,0030	23	8	14,24	6,74
1 heure	1,0020	23	5,62	9,6	5,76
2 heures	1,0015	23,3	4	8,8	5,28
5 heures	1,0005	24	2,6	7,2	4,32
24 heures	0,9995	23	1,14	5,6	3,36

IV. ETUDE PIEZOMETRIQUE

Les cartes piézométriques sont les documents de base de l'analyse et de la schématisation des fonctions capacitive et conductrice du réservoir et du comportement hydrodynamique de l'aquifère.

Leur établissement repose sur les mesures des niveaux piézométriques effectuées sur les vingt piézomètres existants sur le bassin du banc d'essai dans des conditions de stabilisation.

Les profils piézométriques ont été réalisés selon le trait de coupe (1-20).

Cette étude a été réalisée pour les milieux homogène et hétérogène dans les cas d'écoulements permanent et transitoire.

IV.1 CAS DU MILIEU HOMOGENE

La réalisation des cartes piézométriques pour ce milieu à nappe libre a été effectuée à partir des conditions expérimentales suivantes :

IV.1.1 Régime permanent

La distribution et l'alimentation des eaux ont été faites de manière latérale en amont du banc d'essai et sur toute l'épaisseur de la formation existante (Sable de Targa)

Toutefois afin de réaliser un écoulement permanent ou d'équilibre, nous avons choisi un débit constant égal à 0,05 l/s (Débit d'entrée égale au débit de décharge).

Les résultats de cet essai, ont donné la carte et le profil suivants (Fig. 10 et 11):

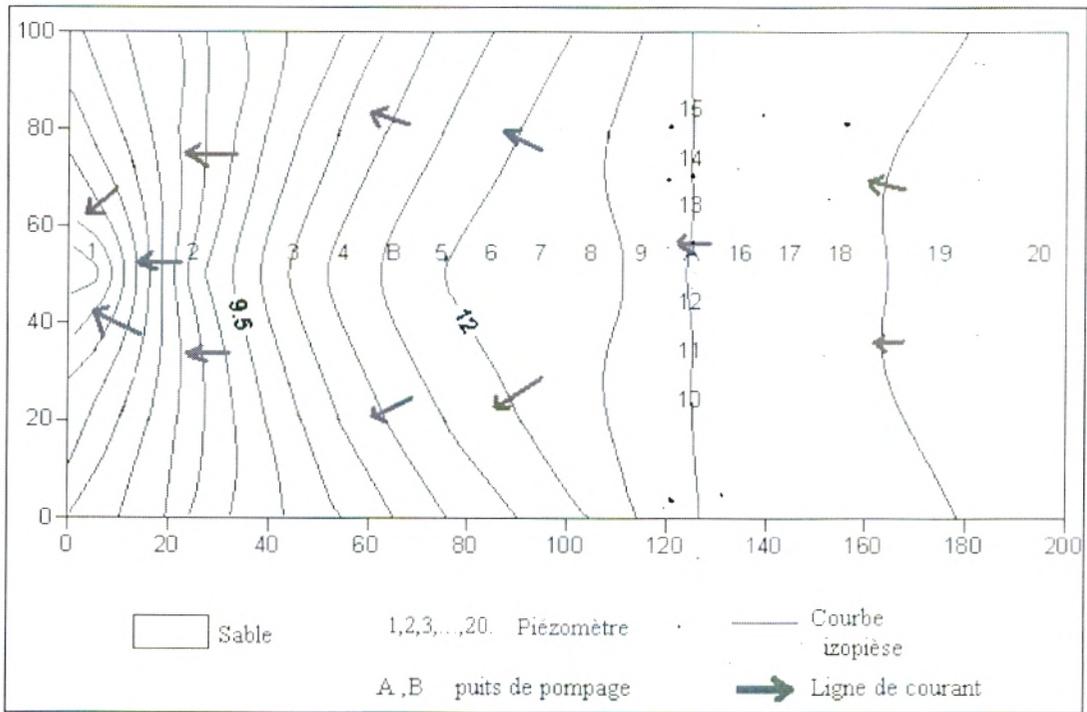


Fig. 10 : Carte piézométrique du bassin à nappe libre en régime permanent avec un débit d'alimentation et de décharge égale à 0,05 l/s.

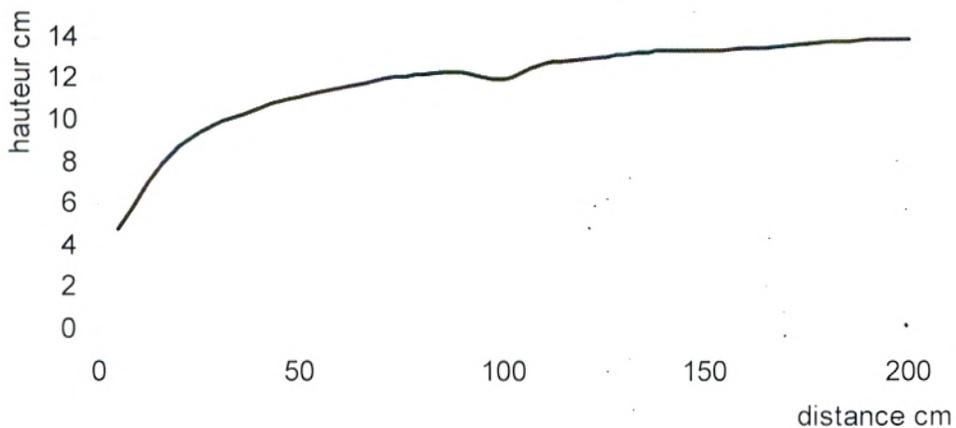


Fig. 11 : Profil piézométrique du bassin à nappe libre en régime permanent avec un débit d'alimentation et de décharge égale à 0,05 l/s.

En régime permanent, l'écoulement se fait principalement, de la partie amont du banc d'essai vers la partie avale, il diverge vers les bords du banc puis converge vers la décharge en aval (Fig. 10); l'espace entre les courbes isopièzes est plus ou moins large et constant en amont, et plus serré en aval, ce qui nous donne un profil piézométrique de forme parabolique (Fig. 11).

IV.1.2 Régime transitoire

Pour ce type de régime d'écoulement, les limites du bassin sont étanches sauf du côté de l'alimentation latérale (amont du banc d'essai) ; cette dernière est effectuée avec un débit

constant de 0,05 l/s jusqu'à stabilité des niveaux piézométriques pour l'ensemble de la formation du bassin, puis nous procédons à un arrêt d'alimentation.

En régime transitoire, la carte piézométrique (Fig. 12) montre une convergence des écoulements vers les dépressions situées en amont (piezomètre 12) et en aval (piezomètre 3) du bassin et vers la décharge.

Le profil piézométrique (Fig. 13) présente des faibles dépressions en amont du banc (point alimentation) suivis d'autres plus importantes accompagnées d'un dôme en aval (piezomètre 2), qui s'explique par un retour d'écoulement, causé par la barrière imperméable.

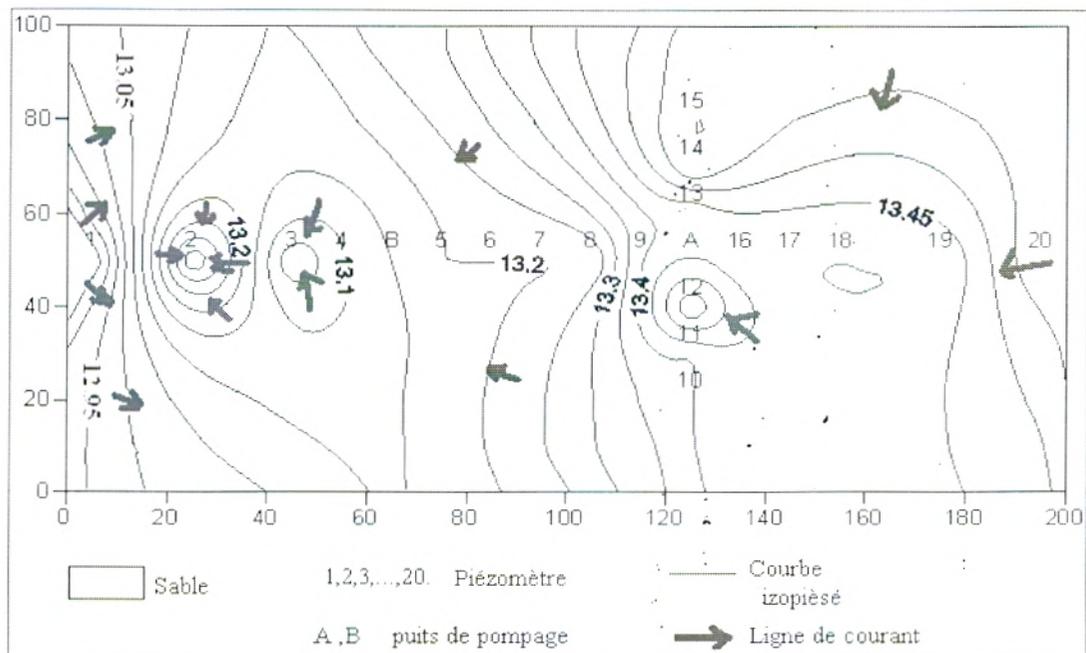


Fig. 12 : Carte piézométrique du bassin à nappe libre en régime transitoire avec un débit d'alimentation égale à 0,05 l/s.

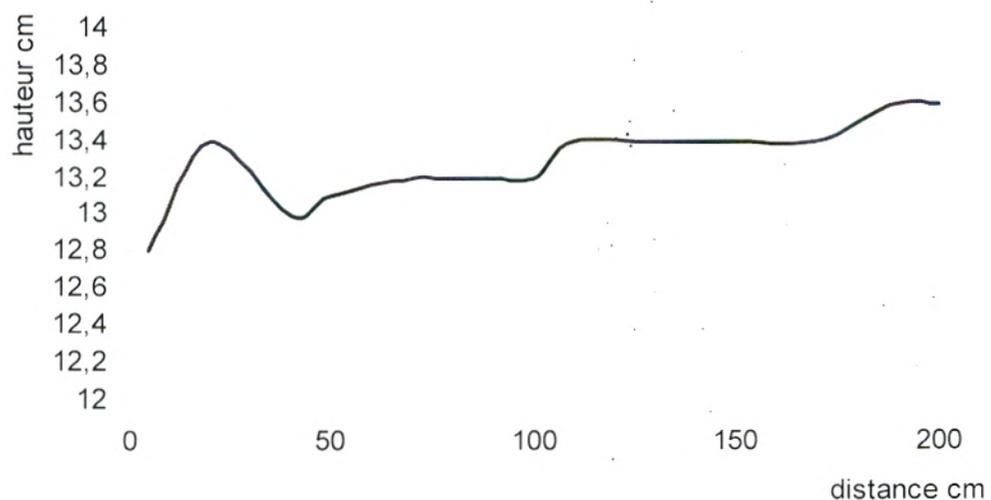


Fig. 13 : Profil piézométrique du bassin à nappe libre en régime transitoire avec un débit d'alimentation égale à 0,05 l/s.

IV.2 CAS DU MILIEU HETEROGENE

Les différents essais expérimentaux ont été réalisés sur deux cas de milieux hétérogènes constitués de sables avec lentille. Dans le premier cas, la lentille est constituée de sable et de calcaire argileux à 15 % du mélange et dans le second, à 30 % du mélange.

L'étude piézométrique a été réalisée dans les mêmes conditions expérimentales réalisées pour le milieu homogène.

IV.2.1 Cas de la lentille constituée de sable et du calcaire argileux à 15% du mélange placée au milieu de la formation sableuse

Les résultats du régime permanent ont donné la carte et le profil suivants (Fig. 14 et 15) :

La carte et le profil piézométriques de ce premier cas du milieu hétérogène, montrent que l'écoulement se fait, de manière générale, de la partie amont du banc d'essai (Alimentation) vers la partie aval (Sortie). A l'approche de la lentille, le ralentissement de l'écoulement provoque un resserrement avec un redressement des isopièzes d'où un fort gradient (fig.15). En s'éloignant de la lentille vers l'aval, la pente s'affaiblit et les isopièzes deviennent plus concave dirigeant les écoulements vers le milieu de la décharge.

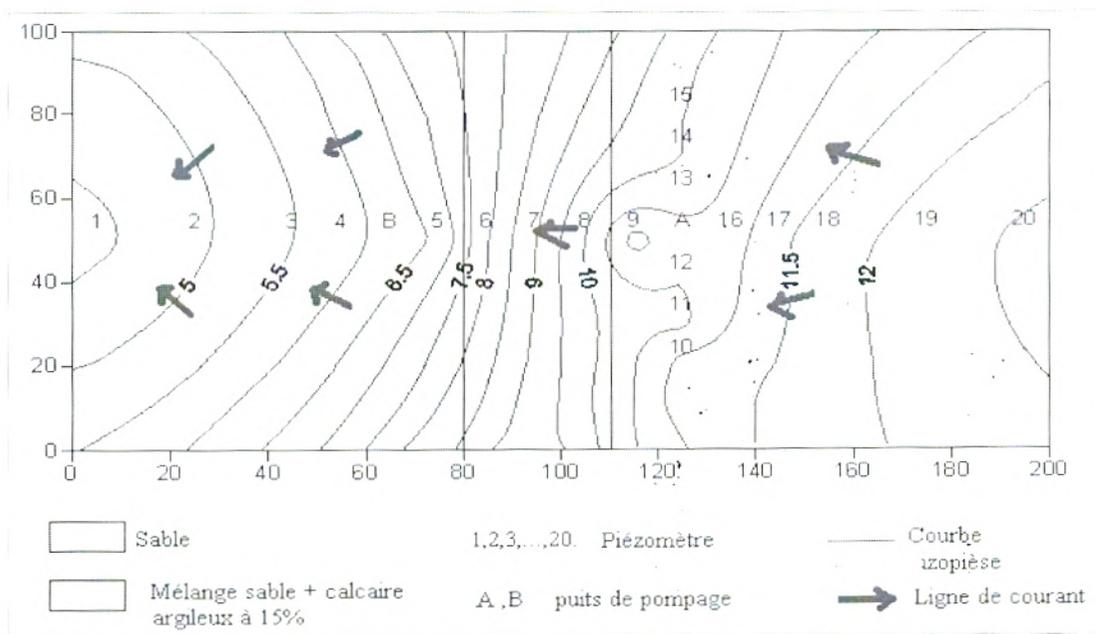


Fig. 14 : Carte piézométrique du milieu hétérogène (Cas de lentille à 15% de calcaire argileux) à nappe libre.

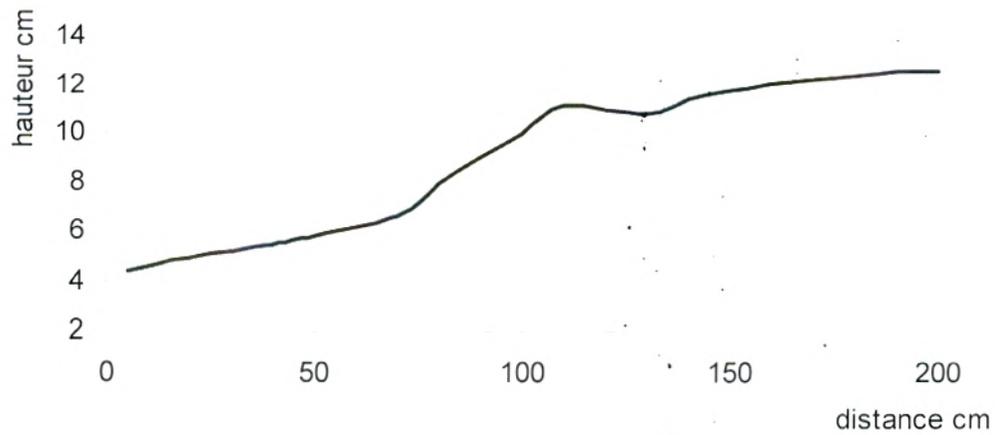


Fig. 15 : Profil piézométrique du milieu hétérogène (Cas de lentille à 15% de calcaire argileux) à nappe libre.

IV.2.2 Cas de la lentille constituée de sable et,du calcaire argileux à 30 % du mélange placée au milieu de la formation sableuse

Les résultats du régime permanent et transitoire réalisé sur ce 2^{ème} cas du milieu hétérogène ont donné les cartes et les profils suivants (Fig. 16, 17, 18, 19) :

IV.2.2.1 Régime permanent

La carte piézométrique et le profil des figures 16 et 17 montrent une divergence des écoulements vers les bords du bassin en amont du banc, puis une convergence vers la décharge ; avec une diminution du module d'espacement des courbes izopièses au niveau de la lentille, dû à la variation latérale du faciès et de la perméabilité.

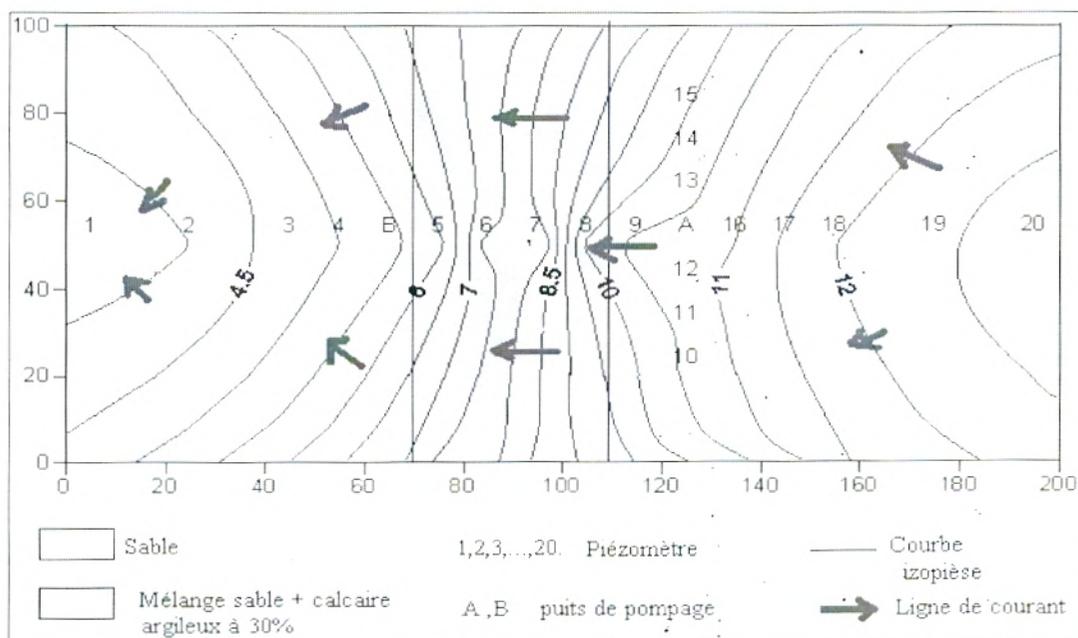


Fig. 16: Carte piézométrique du milieu hétérogène (Cas de lentille à 30% de calcaire argileux) à nappe libre.

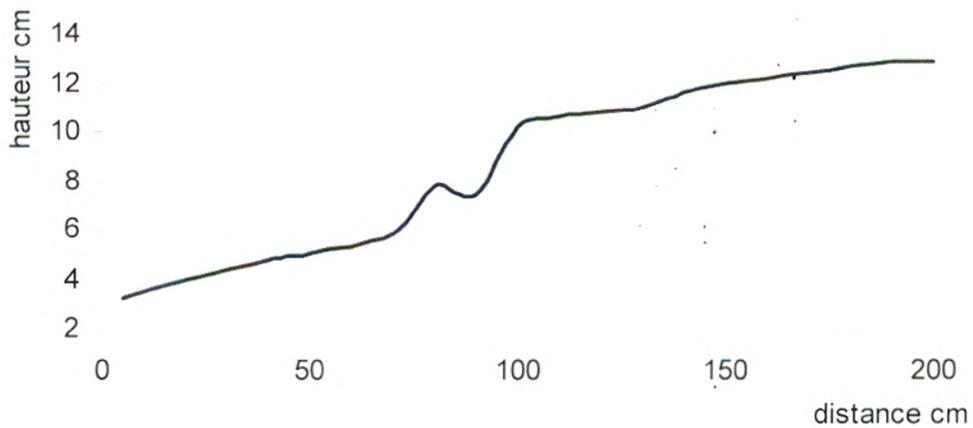


Fig. 17 : Profil piézométrique du milieu hétérogène (Cas de lentille à 30% de calcaire argileux) à nappe libre.

1.2.2.2 Régime transitoire

La carte piézométrique (Fig. 18) montre des dépressions avec des lignes de courant convergentes dans la lentille argileuse, entraînant un accroissement du gradient hydraulique (profil de la figure 19). En effet, la diminution de perméabilité fait que l'eau arrive très lentement à circuler dans la lentille d'où une perte de charge au niveau des piézomètres 5 et 7, et les équipotentielles arrivent à former une grande zone dépressionnaire presque au niveau de toute la lentille.

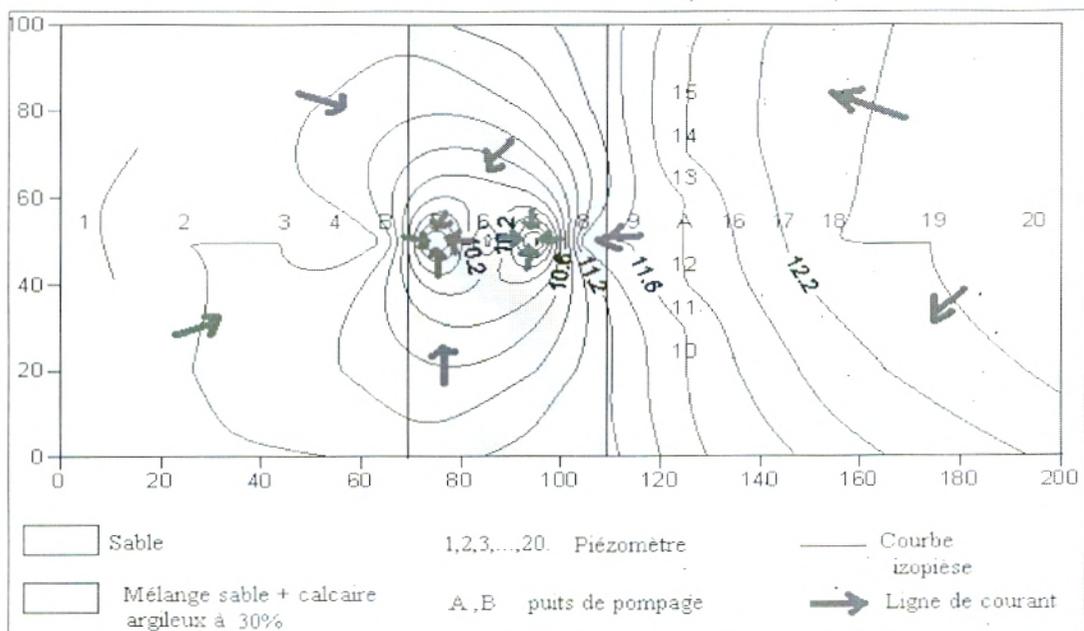


Fig. 18 : Carte piézométrique du milieu hétérogène (Cas de lentille à 30% de calcaire argileux) à nappe libre, en régime transitoire.

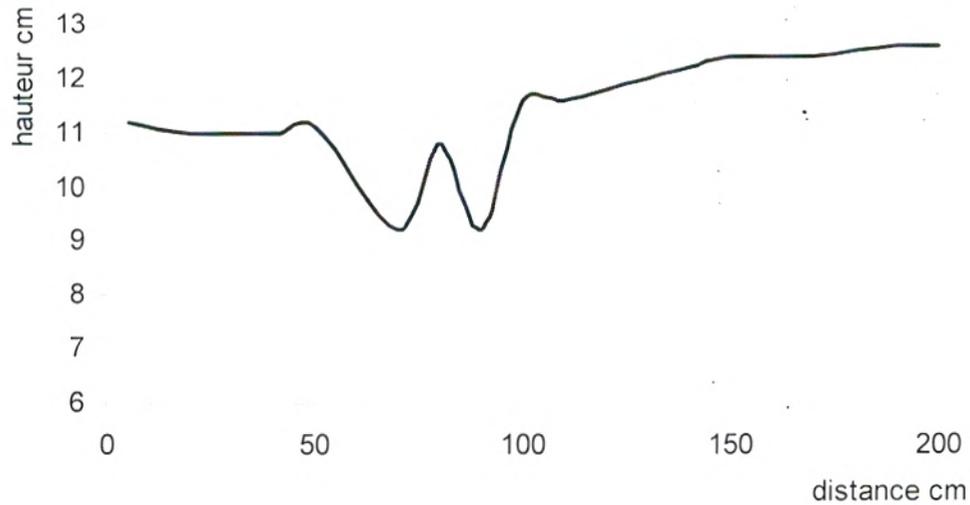


Fig. 19 : Profil piézométrique du milieu hétérogène (Cas de lentille à 30% de calcaire argileux) à nappe libre.

V. DETERMINATION DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

V.1 COEFFICIENT DE PERMEABILITE

Trois méthodes expérimentales ont été utilisées pour la détermination de la perméabilité :

V.1.1 Détermination de la perméabilité à partir de la granulométrie

La détermination de la perméabilité a été établie à partir des résultats des courbes granulométriques de la formation sableuse (cas du milieu homogène) et de celle du sable avec lentille (cas du milieu hétérogène). Son calcul a été effectué par l'utilisation des relations 1 et 2.

A partir des courbes granulométriques représentées en (annexe I.a), nous déduisons les paramètres de calcul de la perméabilité (Tableau 4) :

Tableau 04 : Valeurs des coefficients de perméabilité et d'uniformité des trois formations analysées, en fonction de leurs diamètres efficaces d_{10} , d_{60}

	d_{60} (mm)	d_{10} (mm)	K (m/s)	U
Formation sableuse	0,38	0,25	$6,25 \cdot 10^{-3}$	1,52
Lentille à 15% des calcaires argileux	0,37	0,22	$4,84 \cdot 10^{-3}$	1,68
Lentille à 30% des calcaires argileux	0,42	0,11	$1,21 \cdot 10^{-3}$	3,72

Avec un $U < 2$, la formation sableuse de la plage Targa, et la lentille sableuse à 15% des calcaires argileux constituent un matériau uniforme et sont classées dans la catégorie des sables grossiers (courbes granulométriques- Annexe I.a). La lentille à 30% de calcaires argileux est hétérogène ($U > 2$), sa courbe granulométrique s'étale sur 3 classes allant des sables grossiers au silts.

V.1.2 Détermination de la perméabilité à partir du perméamètre

Le perméamètre est constitué d'un cylindre de 600mm de hauteur et de 108mm de diamètre intérieur. Ce cylindre est rempli d'un échantillon du matériau existant dans le banc d'essai sur une hauteur (H_s). La partie supérieure du tube est alimentée en eau à un niveau maintenu à une hauteur constante (H_w), au dessus d'un plan de référence. Le volume d'eau recueilli à la base, est mesuré en fonction du temps (**Planche 3** en annexe).

La détermination de la perméabilité (K) s'effectue par l'utilisation de l'expression de la loi de Darcy (Eq. 5) :

L'expression devient :

$$K = \frac{QH_s}{\pi R^2 H_w} \quad (52)$$

Où :

K : Coefficient de perméabilité (m/s) ;

R : facteur égal à $5,4 \cdot 10^{-2}$ m (manuel de l'instrument) ; Correspond au rayon du cylindre ;

Q : Débit d'alimentation (cm^3/s) ;

H_s : Hauteur du sable;

H_w : niveau d'eau des tubes piézométriques.

Les valeurs de perméabilités (Tableau.05) suivent un ordre décroissant, du sable vers la deuxième lentille, elles s'échelonnent dans la gamme des 10^{-3} m/s.

La perméabilité des sables de Targa correspond à la catégorie de la formation homogène : sable pur. Les lentilles à 15 et 30% de calcaire argileux sont classées dans la catégorie des formations variées : Sable et argile – limons (Castany, 1982).

Tableau 05 : Valeurs des coefficients de perméabilité des trois formations calculées à partir du perméamètre

	Sables	Lentille «01»	Lentille «02»
Coefficient de perméabilité (m/s)	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$

V.1.3 Détermination de la perméabilité à partir du banc

Il s'agit de réaliser des écoulements uniformes et permanents dans l'aquifère du banc d'essai.

L'alimentation est latérale avec des débits différents. Le calcul du coefficient de perméabilité se fait par l'utilisation de la loi de Darcy :

D'où :

$$K = \frac{Q}{A \times i} \quad (53)$$

Avec : $i = \frac{h_{20} - h_1}{l'}$

Où :

l' : Distance entre les piézomètres P_1 et P_{20} (1.9m) ;

A : Section traversée (m^2).

Cette détermination a été réalisée uniquement pour la formation sableuse, puisque c'est le seul milieu qui répond aux conditions de la validité de l'application de la loi de Darcy.

Les coefficients de perméabilité calculés sont donnés dans le tableau suivant (Tableau 6) :

Tableau 06: Valeurs des coefficients de perméabilité calculés à partir de différents débits sur le milieu homogène (formation sableuse)

Débits (m ³ /s)	h ₁ (m)	h ₂₀ (m)	i = h ₂₀ - h ₁ / L'	K (m/s)
5 10 ⁻⁵	0,010	0,140	0,068	9,8 10 ⁻³
6 10 ⁻⁵	0,016	0,142	0,066	1,15 10 ⁻²
8,3 10 ⁻⁵	0,026	0,144	0,062	1,47 10 ⁻²
La perméabilité moyenne est de 1,2 10⁻² m/s				

Remarque : Les valeurs de perméabilité calculées par cette méthode augmentent en fonction de l'augmentation des débits, cette variation des coefficients est due à la réorganisation des grains dans le banc d'essai.

V.2 TRANSMISSIVITE ET COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT

La détermination de la transmissivité et du coefficient d'emménagement, pour les différents cas réalisés sur le banc d'essai, a été obtenue par deux méthodes expérimentales différentes :

V.2.1 Utilisation de l'expression de Darcy

La transmissivité est calculée à partir de l'expression 6, en remplaçant le coefficient de perméabilité (K) par la valeur moyenne calculée lors de l'expérimentation réalisée par écoulement naturel sur banc d'essai.

$$T = K \times b$$

Où :

$$b : \text{épaisseur de la nappe (zone saturée)} : \left(\frac{b_1 + b_2}{2} \right).$$

La transmissivité moyenne de la formation sableuse est alors égale à 1,1 10⁻³ m²/s.

V.2.2 Détermination par essai de pompage

Des essais de pompage ont été réalisés dans l'aquifère simulé à nappe libre du banc d'essai hydrologique sous les conditions suivantes :

- Régime transitoire, avec un débit d'alimentation de 0,05 l/s ;
- Limites de l'aquifère étanches, avec une alimentation en amont de l'aquifère ;
- Débits de pompage aux puits A et B de 0,02 l/s ;
- Durée du pompage pour les deux puits : 6 minutes soit 360 secondes.

La méthode d'interprétation utilisée est celle du régime transitoire (Méthode de Theis et Jacob, 1950), établie pour les aquifères à nappe captive et ceux à nappe libre illimités et à substratum imperméable.

Les essais de pompages ont été réalisés sur les deux puits de pompage A et B et les observations au niveau des piézomètres (P₉, P₁₂, P₁₃ et P₁₆) situés à 10cm par rapport au puits « A » et (P₄ et P₅) situés à une distance de 10cm du puits « B » (Fig.20).

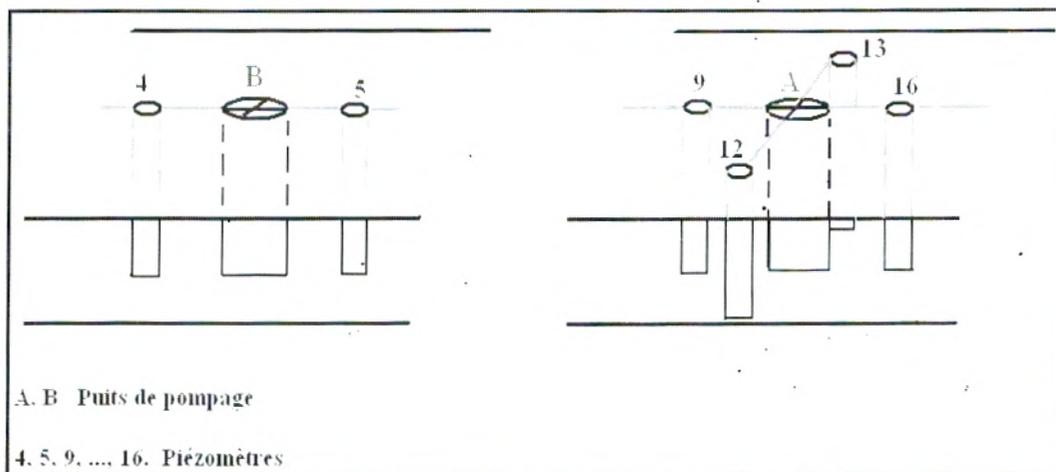


Fig.20 : Localisation des puits de pompage et des piézomètres qui les entourent.

Les données du pompage d'essai, rabattements en cm et temps de pompage en s, reportées sur papier semi-logarithmique, permettront de calculer la transmissivité et le coefficient d'emménagement.

V.2.2.1 Milieu homogène

a. Essai de pompage au puits « A »

Les données du pompage d'essai en annexe (I.c), profondeurs de l'eau en cm et le temps de pompage en seconde, ont servi pour le tracer les courbes représentatives des pompages (descente et remontée) aux niveaux des piézomètres P₉, P₁₂, P₁₃, P₁₆, (Fig. 21). Aussi, nous avons utilisé les droites de descente (Fig. 22) pour calculer les paramètres hydrodynamique (Transmissivité, Coefficient d'emménagement) (tableau 7), en utilisant les expressions d'approximation logarithmique (Eq.8 et 9).

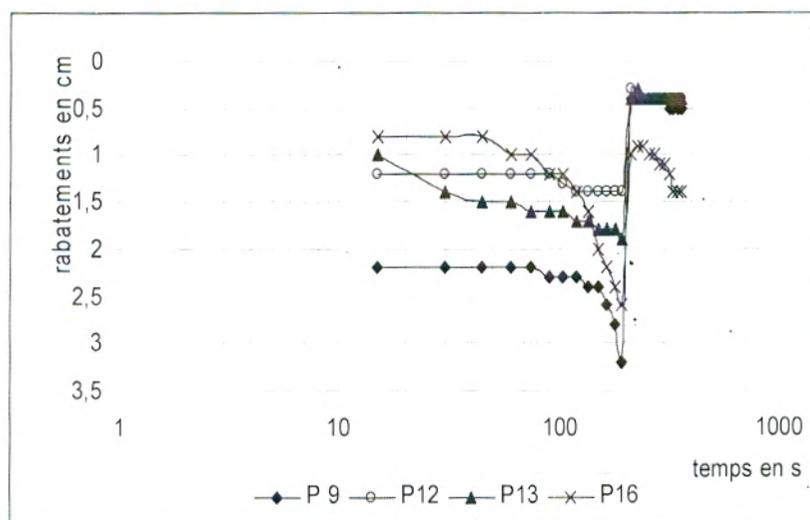


Fig. 21 : Courbes représentatives des rabattements (cm) / temps de pompage (s) aux piézomètres P₉, P₁₂, P₁₃, P₁₆.

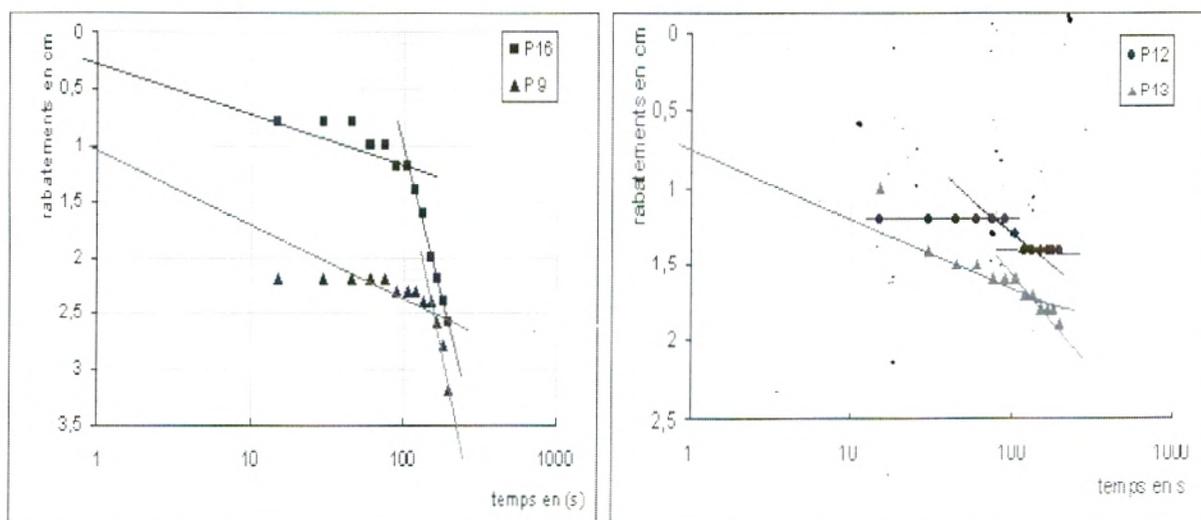


Fig. 22 : Droites représentatives de la descente aux piézomètres P₉, P₁₂, P₁₃ et P₁₆.

Tableau 07 : Valeurs de transmissivité et du coefficient d'emmagasinement des piézomètres P₉, P₁₂, P₁₃, P₁₆

Piézomètres	P ₉	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₆
Transmissivité, T (m ² /s)	$5,22 \cdot 10^{-4}$	$4,06 \cdot 10^{-4}$	$6,65 \cdot 10^{-4}$	$4,57 \cdot 10^{-4}$
Coefficient d'emmagasinement, S	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$2,7 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$

Pour le calcul de la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement du puits A, nous avons choisi les piézomètres P₉, P₁₆, situés sur l'axe de drainage :

- la transmissivité moyenne au puits A est de $4,89 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
- le coefficient d'emmagasinement moyen au puits A est de $1,05 \cdot 10^{-1}$.

b. Essai de pompage au puits « B »

Les données des essais de pompage réalisés au puits « B » (Annexe I.c), ont permis d'établir les graphiques suivants (Fig. 23 et 24) : courbes représentatives des rabattements (cm) en fonction des temps de pompage (s) et les droites de descentes des niveaux aux piézomètres P₄, P₅.

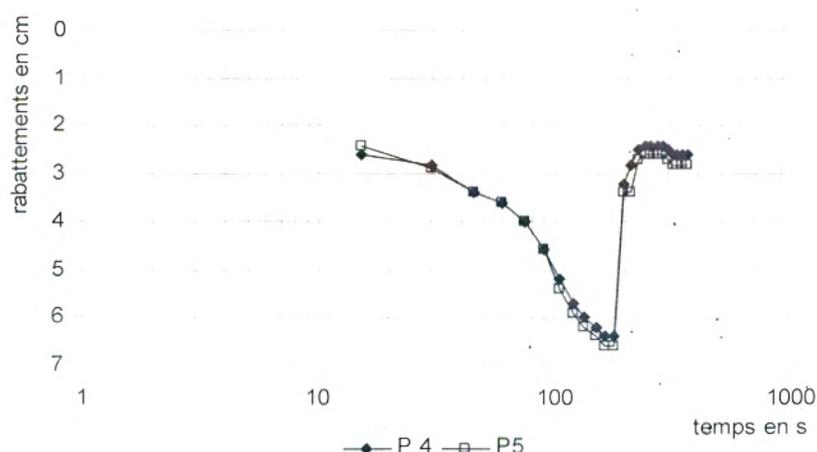


Fig. 23 : Courbes représentatives des rabattements (cm) / temps de pompage (s) aux piézomètres P₄, P₅.

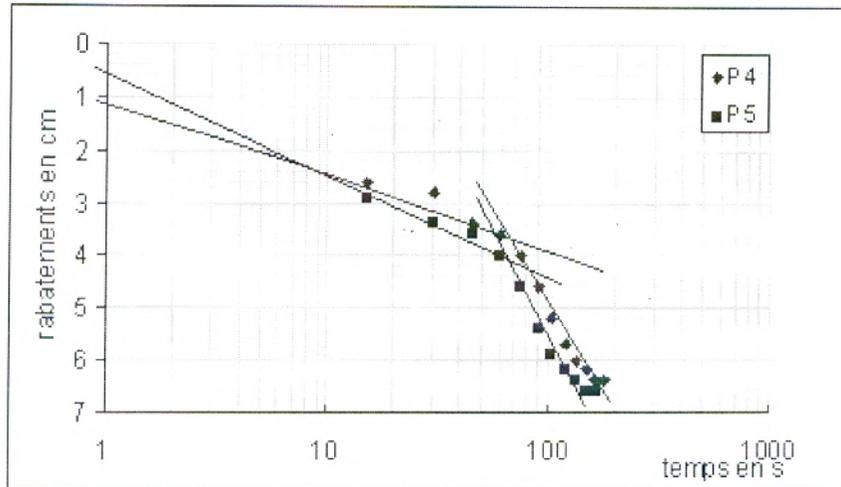


Fig. 24 : Droites représentatives de la descente aux piézomètres P₄, P₅.

L'application des expressions de Jacob (Eq. 8 et 9) a donné les résultats du tableau suivant (Tableau 08) :

Tableau 08: Valeurs de transmissivité et du coefficient d'emmagasinement des piézomètres P₄, P₅.

Piézomètres	P ₄	P ₅
Transmissivité, T (m ² /s)	2,61 10 ⁻⁴	1,83 10 ⁻⁴
Coefficient d'emmagasinement, S	5,88 10 ⁻²	4,11 10 ⁻²
T moyenne du puits B est de 2,2 10 ⁻⁴ m ² /s S moyen du puits B est de 0,5 10 ⁻¹		

L'exécution de ces essais de pompage aux niveaux des deux puits « A » et « B » pour la formation homogène constituée de sable et l'application des expressions générales de Theis et de Jacob, ont donné une transmissivité moyenne de 3,55 10⁻⁴ m²/s et un coefficient d'emmagasinement moyen de la formation sableuse de 0,8 10⁻¹.

V.2.2.2 Milieu hétérogène

a. Formation sableuse avec lentille à 15 % de calcaire argileux

Les données observées aux piézomètres P₉, P₁₂, P₁₃, P₁₆ lors du pompage au puits « A », et aux piézomètres P₄, P₅, P₇ lors du pompage au puits « B » (Annexe I.c), ont permis d'établir les graphiques des figures 25 et 26 :

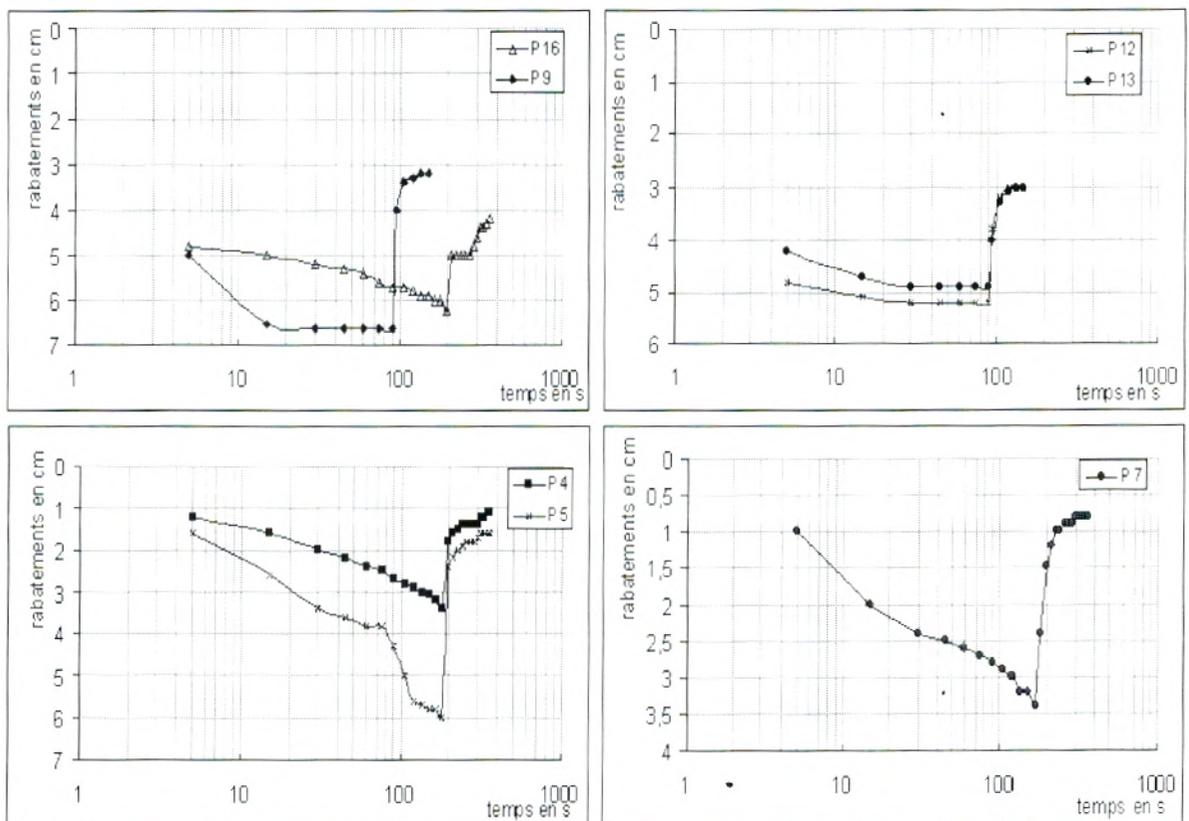


Fig. 25 : courbes représentatives des rabatements (cm)/ temps de pompage (s) aux piézomètres P4, P5, P7, P9, P12, P13, P16.

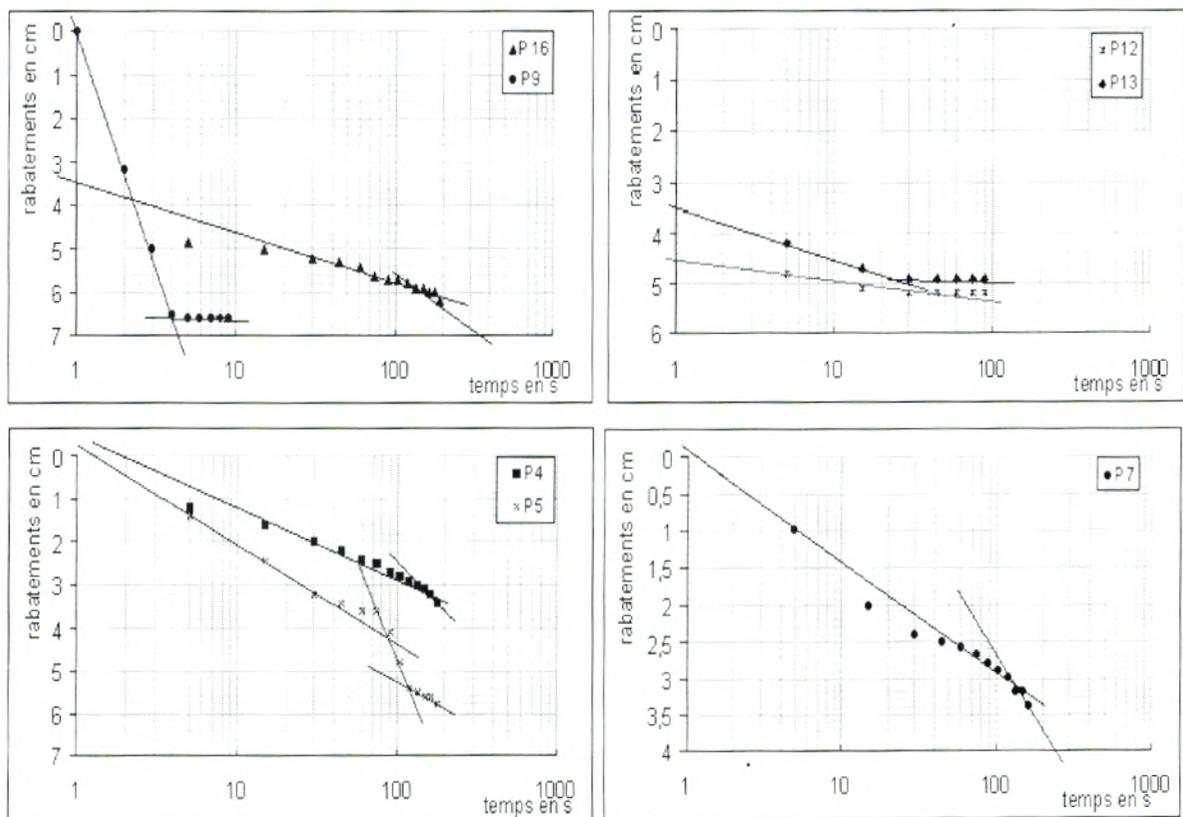


Fig. 26 : Droites représentatives de la descente aux piézomètres P4, P5, P7, P9, P12, P13, P16.

L'application des expressions (Eq. 8 et 9) a donnée les résultats du tableau suivant :

Tableau 09 : Valeurs de transmissivité et du coefficient d'emmagasinement des piézomètres P₄, P₅, P₇, P₉, P₁₂, P₁₃, P₁₆.

Piézomètres	Pompage au puits A				Pompage au puits B		
	P ₉	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₆	P ₄	P ₅	P ₇
T (m ² /s)	2,23 10 ⁻⁴	6,31 10 ⁻⁴	3,66 10 ⁻⁴	3,05 10 ⁻⁴	2,51 10 ⁻⁴	1,75 10 ⁻⁴	2,44 10 ⁻⁴
S	5 10 ⁻²	1,4 10 ⁻¹	8,23 10 ⁻²	6,8 10 ⁻²	1,1 10 ⁻¹	1,57 10 ⁻²	5,14 10 ⁻²

On considère que les valeurs moyennes de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement de la lentille à 15% de calcaire argileux, sont celles du piézomètre P₇, puisque ce dernier se situe au milieu de cette lentille (fig. 14).

On observe que les valeurs de transmissivité et du coefficient d'emmagasinement, ont diminué par rapport aux valeurs trouvées en milieu homogène, cela s'explique par la présence de la lentille argileuse.

b. Formation sableuse avec lentille à 30 % de calcaire argileux

La détermination de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement par les essais de pompage, de cette formation, et en utilisant les mêmes méthodes d'interprétation des données de pompage aux puits A et B (Annexe I.c), a permis l'établissements des graphiques des figures 27 et 28, et le calcul de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement (Tableau 10) :

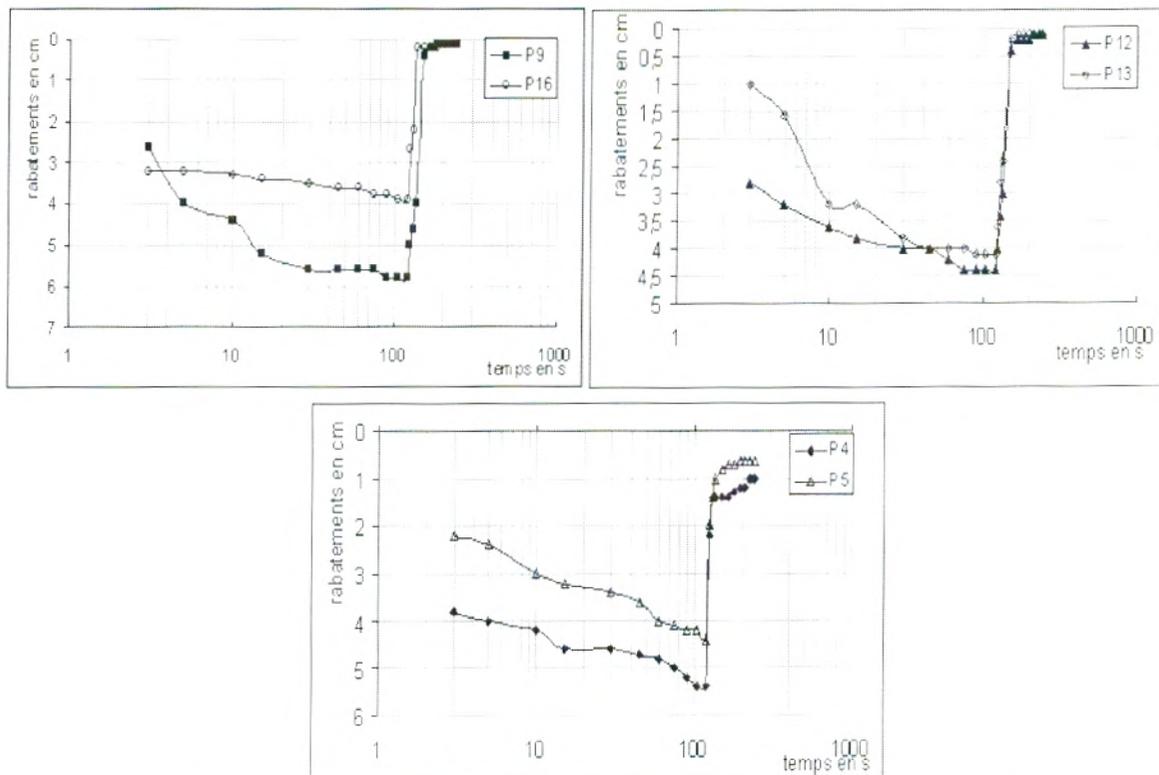


Fig. 27 : Courbes représentatives des rabattements (cm)/ temps de pompage (s) aux piézomètres P₄, P₅, P₉, P₁₂, P₁₃, P₁₆.

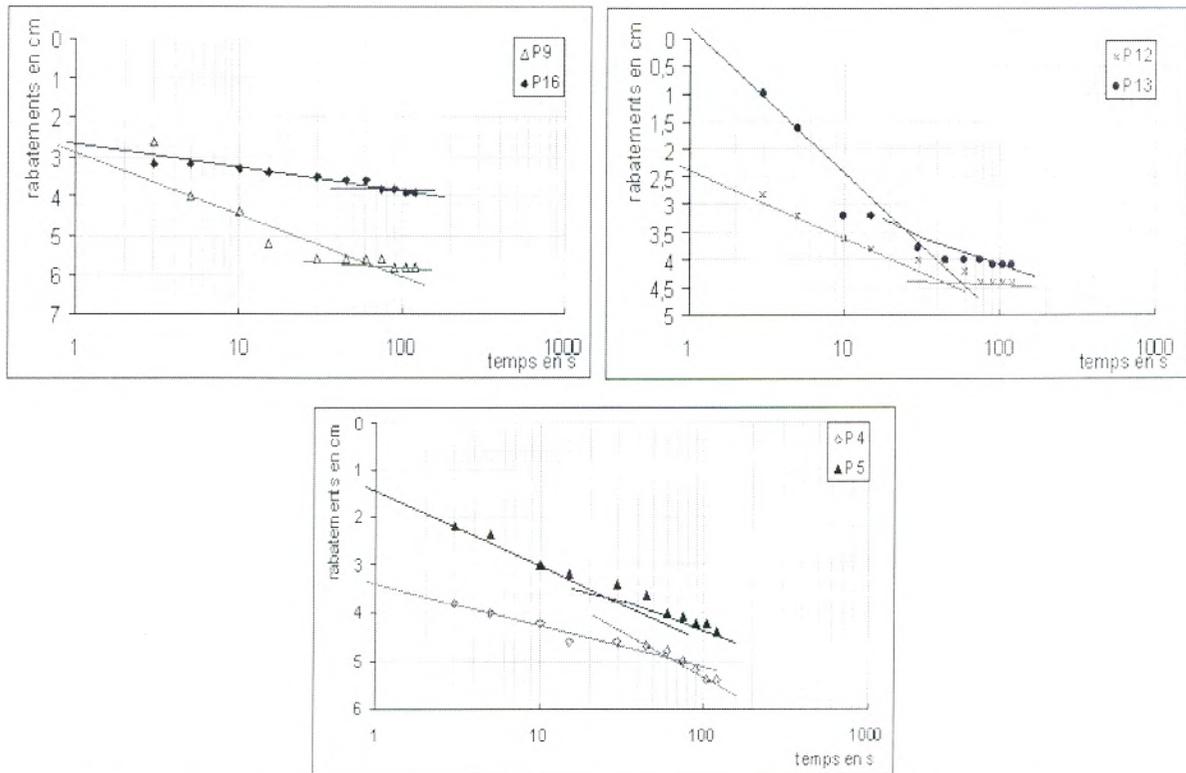


Fig. 28 : Droites représentatives de la descente aux piézomètres P₄, P₅, P₉, P₁₂, P₁₃, P₁₆.

Tableau 10: Valeurs de transmissivité et du coefficient d'emmagasinement des piézomètres P₄, P₅, P₉, P₁₂, P₁₃, P₁₆.

Piézomètres	Pompage au puits A				Pompage au puits B	
	P ₉	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₆	P ₄	P ₅
T (m ² /s)	2,44 10 ⁻⁴	3,35 10 ⁻⁴	3,09 10 ⁻⁴	7,32 10 ⁻⁴	3,32 10 ⁻⁴	2,28 10 ⁻⁴
S	5,49 10 ⁻²	7,51 10 ⁻²	7 10 ⁻²	0,16	7,48 10 ⁻²	7,6 10 ⁻³

On considère que les valeurs moyennes de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement de la lentille à 30% de calcaire argileux, sont celles du piézomètre P₅, placé au niveau de cette lentille.

On constate qu'au niveau de P₉ les valeurs de ces deux paramètres restent inférieures à celle du milieu homogène, tandis qu'au P₁₆, les valeurs sont plus élevées. En effet, l'alimentation en amont du banc d'essai (Fig. 10) à 0,05 l/s se voit fortement diminuer au contact de cette lentille au milieu de la formation sableuse qui freine l'écoulement à un débit de 0,0026 l/s. Ceci entraîne un retour du flux vers le point d'alimentation, réduisant le débit et le régularise avec celui de l'aval.

V.3 DIFFUSIVITE

La diffusivité (D) est déterminée en remplaçant les valeurs de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement dans l'équation 10.

Les paramètres hydrodynamiques déterminés pour les trois aquifères simulés dans le bassin sont donnés dans le tableau 11 :

Tableau 11: Paramètres hydrodynamiques des milieux étudiés

	K moyenne (m/s)	T moyenne (m ² /s)	S moyenne	Diffusivité (m ² /s)
Milieu homogène (formation sableuse)	$6,25 \cdot 10^{-3}$	$3,55 \cdot 10^{-4}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$	$4,61 \cdot 10^{-3}$
1 ^{er} cas du milieu hétérogène à Lentille sableuse à 15% de calcaire argileux	$4,84 \cdot 10^{-3}$	$2,44 \cdot 10^{-4}$	$5,14 \cdot 10^{-2}$	$4,74 \cdot 10^{-3}$
2 ^{ème} cas du milieu hétérogène à Lentille sableuse à 30% de calcaire argileux	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$2,28 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$

D'après les paramètres hydrodynamiques des différents milieux étudiés, illustrés dans le tableau 11 et l'histogramme de la figure 29, nous constatons que le coefficient de perméabilité, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement diminuent du milieu homogène (sable) vers le 2^{ème} cas du milieu hétérogène ; alors que la diffusivité augmente.

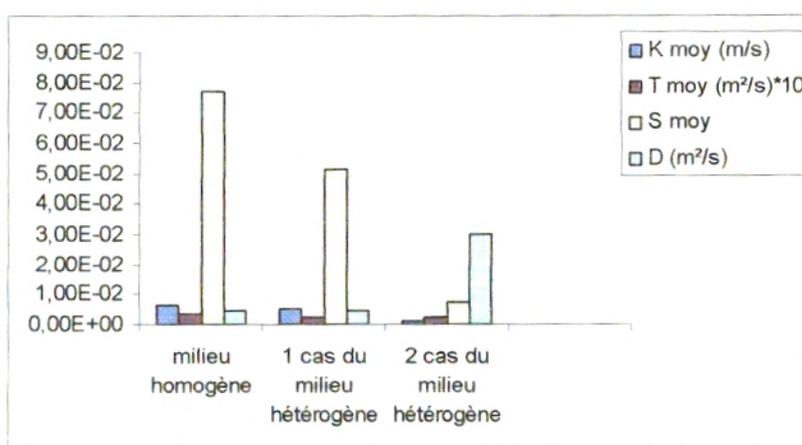


Fig. 29 : Histogrammes représentatifs des paramètres hydrodynamiques sur les différents milieux étudiés.

Chapitre IV : ESSAI DE TRAÇAGE SUR BANC D'ESSAI HYDROLOGIQUE

La réalisation des essais de traçage sur le bassin du banc d'essai permet d'étudier l'évolution de la propagation de quelques traceurs dans différents milieux poreux. Ces essais sont basés sur des méthodes qualitatives et quantitatives qui identifient les paramètres régissant les écoulements souterrains (vitesse effective des eaux) et les propriétés hydrodispersives (dispersivité et porosité cinématique).

Les essais de traçage réalisés sur les différents cas de milieux étudiés sur le banc, ont été effectués suivant deux types d'écoulement :

- un écoulement monodimensionnel (naturel) : injection instantanée ou brève du traceur, en amont du banc (Point X) et prélèvement en aval (Point Y) ;
- et un écoulement radial convergent (provoqué ou par pompage) : injection brève du traceur au point X et prélèvement réalisée aux niveaux des deux puits A et B (Fig.30).

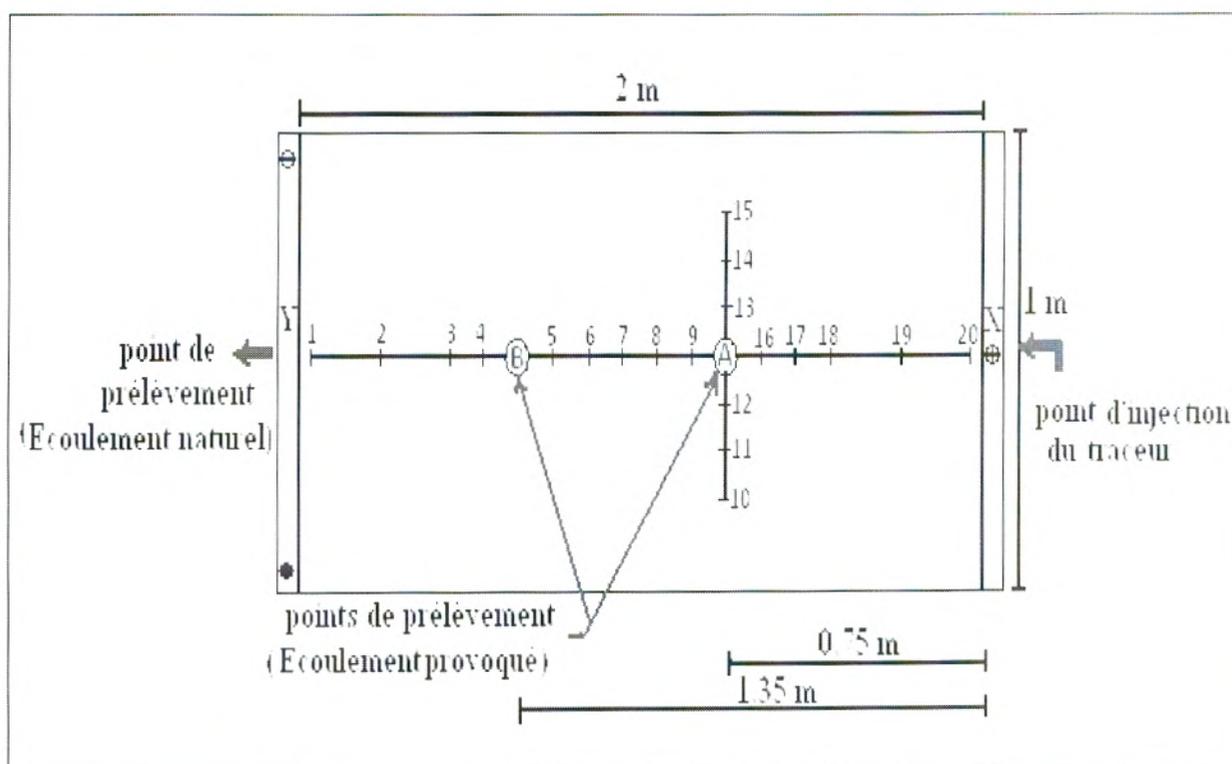


Fig.30 : Réalisation des essais de traçage sur le bassin du banc d'essai hydrologique.

I. ESSAI DE TRAÇAGE EN MILIEU HOMOGENE

I.1 TRAÇAGE D'ESSAI EN ECOULEMENT NATUREL

Il s'agit d'injecter en amont du banc d'essai une solution aqueuse de traceur, en la laissant progresser sous l'effet de sa propre vitesse. Le débit de circulation a été fixé à 0,05 l/s et la solution est récupérée en aval du banc d'essai à une distance de 2m. Des échantillons sont prélevés et analysés, au fur et à mesure du passage du traceur. On procède ensuite à l'établissement des courbes de concentration en fonction du temps et à leur interprétation.

I.1.1 Conditions expérimentales

I.1.1.1 Injection des traceurs

Trois traceurs ont été utilisés : il s'agit du chlorure de sodium, de la rhodamine –B et d'un colorant textile. Avant l'injection de chaque traceur, un lavage du bassin du banc est réalisé afin d'éviter toute contamination, en sachant que l'eau du circuit contient 163,8 mg/l de NaCl et ne contient pas de rhodamine–B ni de colorant textile.

Les traceurs sont injectés à travers le canal d'alimentation situé en amont du banc d'essai.

Les valeurs des concentrations des traceurs utilisés sont comme suit (tableau 12):

Tableau 12 : Valeurs des concentrations des traceurs injectés

Produit injecté	Chlorure de Sodium (NaCl)	Rhodamine B	Colorant textile (polluant)
Masse injectée (g)	200 g	0,1	0,5
1 ^{ère} dilution (ml)	-	100	100
2 ^{ème} dilution (l) (canal d'alimentation)	10	10	10
Concentration initiale	20 g/l	10 mg/l	50 mg/l

Dans les trois cas, l'injection a duré un temps très court et les prélèvements se sont effectués après 5 minutes d'injection des chlorures de sodium, et 10 minutes pour l'injection des deux autres traceurs.

I.1.1.2 Echantillonnages

Les prélèvements des échantillons d'eau, en vue de leur dosage, sont effectués manuellement à l'aide des tuyaux liés à l'extrémité du banc d'essai (aval) durant 180 minutes pour le NaCl et 240 minutes pour les deux autres traceurs.

Les chlorures sont dosés par analyse volumétrique (méthode de Mohr) au laboratoire d'analyse du département d'hydraulique et la Rhodamine–B et colorant textile par analyse spectro – photométrique (U.V. 500) au laboratoire de chimie des eaux et des corrosion (EOLE). Les résultats obtenus sont donnés en (annexe II.a).

I.1.2 Résultats et analyses

L'évolution de la concentration des chlorures de sodium en fonction du temps, dans le point de récupération (figure 31a), présente un pic de 3,5 g/l à 55 minutes de restitution suivis d'une décroissance.

La courbe (figure 31b), représentant l'évolution en fonction du temps de la conductivité des échantillons prélevés pour l'analyse des chlorures de sodium est similaire à celle la figure 31a.

La décroissance des courbes est assez régulière jusqu'au point de stabilité de la concentration, ce qui pourrait s'expliquer par un phénomène de diffusion dans ce milieu.

La courbe de restitution de la rhodamine–B (Fig. 31c) est assez homogène, très dissymétrique avec un pic de concentration de 1,08 mg/l à 52 minutes de restitution, et une décroissance assez longue due probablement au phénomène de diffusion dans la formation sableuse.

La courbe de restitution du colorant textile injecté en amont du bassin du banc obtenue au point de prélèvement en aval, (Fig. 31d) montre une évolution régulière de la concentration avec une légère fluctuation, et un pic de 1,9 mg/l de concentration à 55 minutes de restitution; puis une décroissance assez longue.

Sur les différentes courbes de restitution, on remarque que les traceurs ont des temps d'arrivées très courts (5 minutes) au point d'échantillonnage (aval du banc – écoulement naturel).

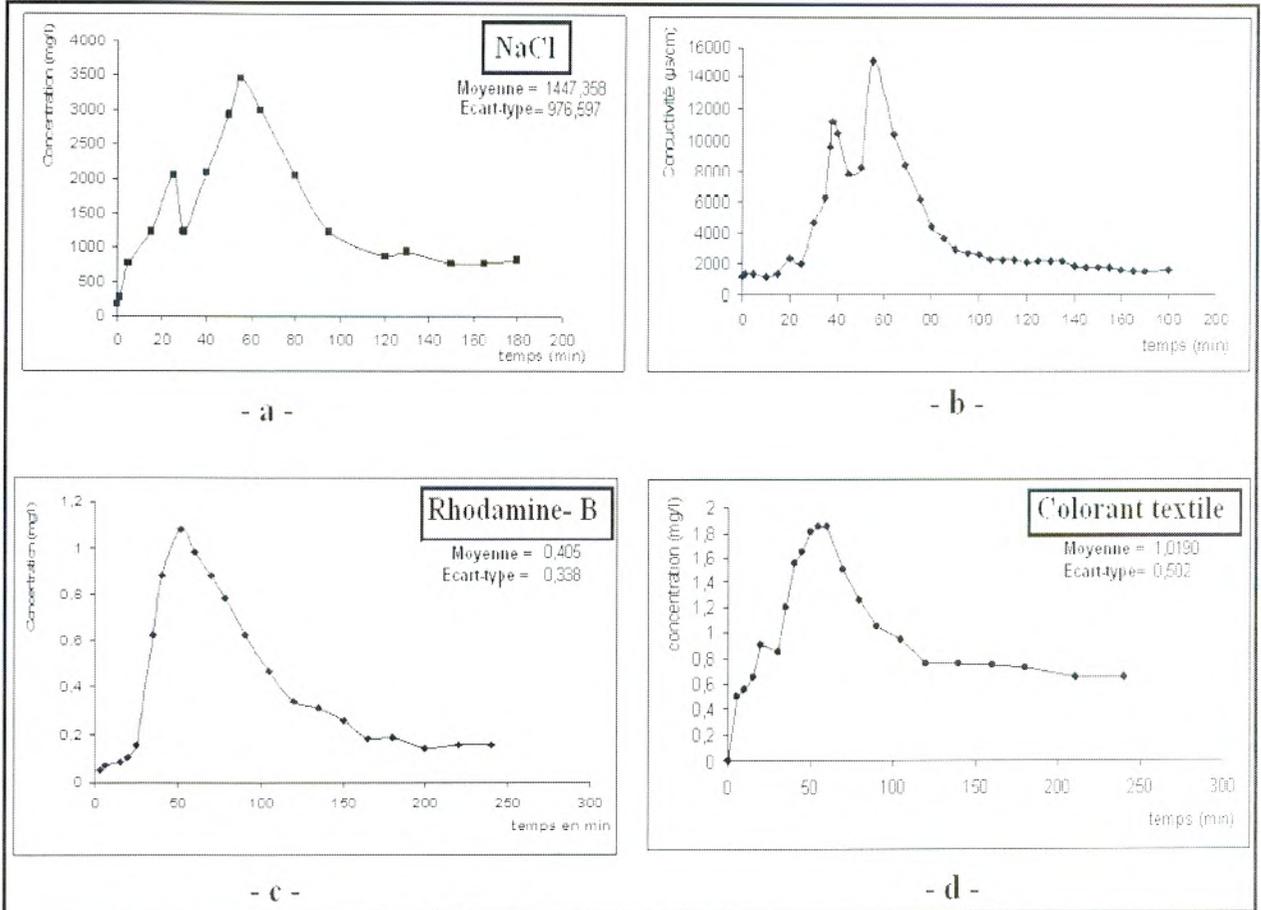


Fig. 31 : Courbes de restitution des traceurs injectés en amont du bassin.

De ces différentes courbes de restitutions des trois traceurs utilisés, on peut déduire les différents temps caractéristiques d'un transfert monodimensionnel lors d'une injection instantanée (Wang, 1987) (tableau 13), par l'application des expressions suscitées (tableau 2, Chapitre II de la partie I).

Tableau 13 : Temps caractéristiques en écoulement monodimensionnel lors de l'injection instantanée des traceurs utilisés

	NaCl	Rhodamine -B	Colorant textile
$t_{pic} (min)$	55	52	55
$t_c = t_h (min)$	142	123	136,46
$\bar{t} (min)$	220,23	175,56	212,27
$t_m (min)$	113,53	112	122

Les temps caractéristiques des chlorures de sodium et du colorant textile sont proches et légèrement supérieurs à ceux trouvés avec la rhodamine – B.

I.2 TRAÇAGE D'ESSAI EN ECOULEMENT RADIAL CONVERGENT

Le traçage en écoulement radial convergent, est réalisé grâce à des pompes continus à débits constants. Les traceurs sont injectés en amont des puits de prélèvement à des distances différentes.

I.2.1 Conditions expérimentales

I.2.1.1 Régime d'écoulement

La réalisation de cet essai a eu lieu en régime transitoire. Le pompage est effectué sur les deux puits A et B existant dans le bassin du banc à des distances respectives de 0,75 et 1,35m par rapport au canal d'alimentation, avec des débits de pompage réguliers et constants. Les traceurs sont injectés en amont (canal d'alimentation) du banc d'essai.

Un tel pompage entraîne un rabattement, jusqu'à épuisement de toutes les eaux gravitaires existantes dans la nappe. Afin que cette variation n'influe pas sur nos essais, une réalimentation est réalisée après chaque rabattement faible aux niveaux des puits de pompes.

I.2.1.2 Injection des traceurs

Les traceurs sont ceux précédemment utilisés : le NaCl, la rhodamine-B et le colorant textile. Chacun d'entre eux est injecté en solution en amont du banc d'essai suivi d'un lavage du bassin à la fin de chaque manipulation. La technique d'injection préconisée est celle de l'injection brève (instantanée).

I.2.1.3 Echantillonnages

Les prélèvements des échantillons d'eau, en vue de leur dosage, sont effectués manuellement dans les puits de pompage à l'aide des tuyaux liés à ces derniers durant un temps compris entre trois et cinq heures. Les résultats obtenus sont donnés en (annexe II.a).

I.2.2 Les expériences réalisées

Les tableaux 14 et 15 résument les conditions dans lesquelles sont effectués les différents essais de traçage en régime d'écoulement radial convergent pour le milieu homogène, réalisés par pompage aux puits A et B.

Tableau 14 : Conditions des différents essais de traçage réalisés au puits « A »

Produit injecté	Chlorure de Sodium (NaCl)	Rhodamine B	Colorant textile (polluant)
Conditions aux limites	- Limites étanches - Régime transitoire	- Limites étanches - Régime transitoire	- Limites étanches - Régime transitoire
Lieu injection	X	X	X
Lieu de récupération	A (distance 0,75m)	A	A
Débit de pompage	0,0044 l/s	0,016 l/s	0,02 l/s
Masse injectée	200g	0,1g	0,5g
Concentration initiale	20g/l	10mg/l	50mg/l
Prélèvement après	05 min d'injection	05 min d'injection	03 min d'injection
Temps de restitution	240 min	190 min	200 min
Incidents	Colmatage du puits	-	-

Tableau 15: Conditions des différents essais de traçage réalisés au puits « B »

Produit injecté	Chlorure de Sodium (NaCl)	Rhodamine-B	Colorant textile (polluant)
Conditions aux limites	- Limites étanches - Régime transitoire	- Limites étanches - Régime transitoire	- Limites étanches - Régime transitoire
Débit d'alimentation	0,05 l/s	0,05 l/s	0,05 l/s
Lieu injection	X	X	X
Lieu de récupération	B (distance 1,35 m)	B	B
Débit de pompage	0,022 l/s	0,016 l/s	0,013/s
Masse injectée	500 g	0,1 g	0,5 g
Concentration initiale	50 g/l	10 mg/l	50 mg/l
Prélèvement après	5 min d'injection	05 min d'injection	3 min d'injection
Temps de restitution	300 min	165 min	200 min
Incidents	-	-	-

1.2.3 Résultats et analyses

1.2.3.1 Pompage au puits « A »

Les courbes de restitutions des traceurs (NaCl, Rhodamine- B et Colorant textile) obtenues au point de pompage «A» (Fig. 32) montrent une évolution plus au moins régulière de la concentration en fonction du temps, avec des pics assez importants par rapport aux moyennes arithmétiques des concentrations des traceurs.

Les temps d'arrivée des traceurs au point de pompage sont courts, ce qui peut s'expliquer par la courte distance entre le point d'injection et le point de prélèvement (75cm).

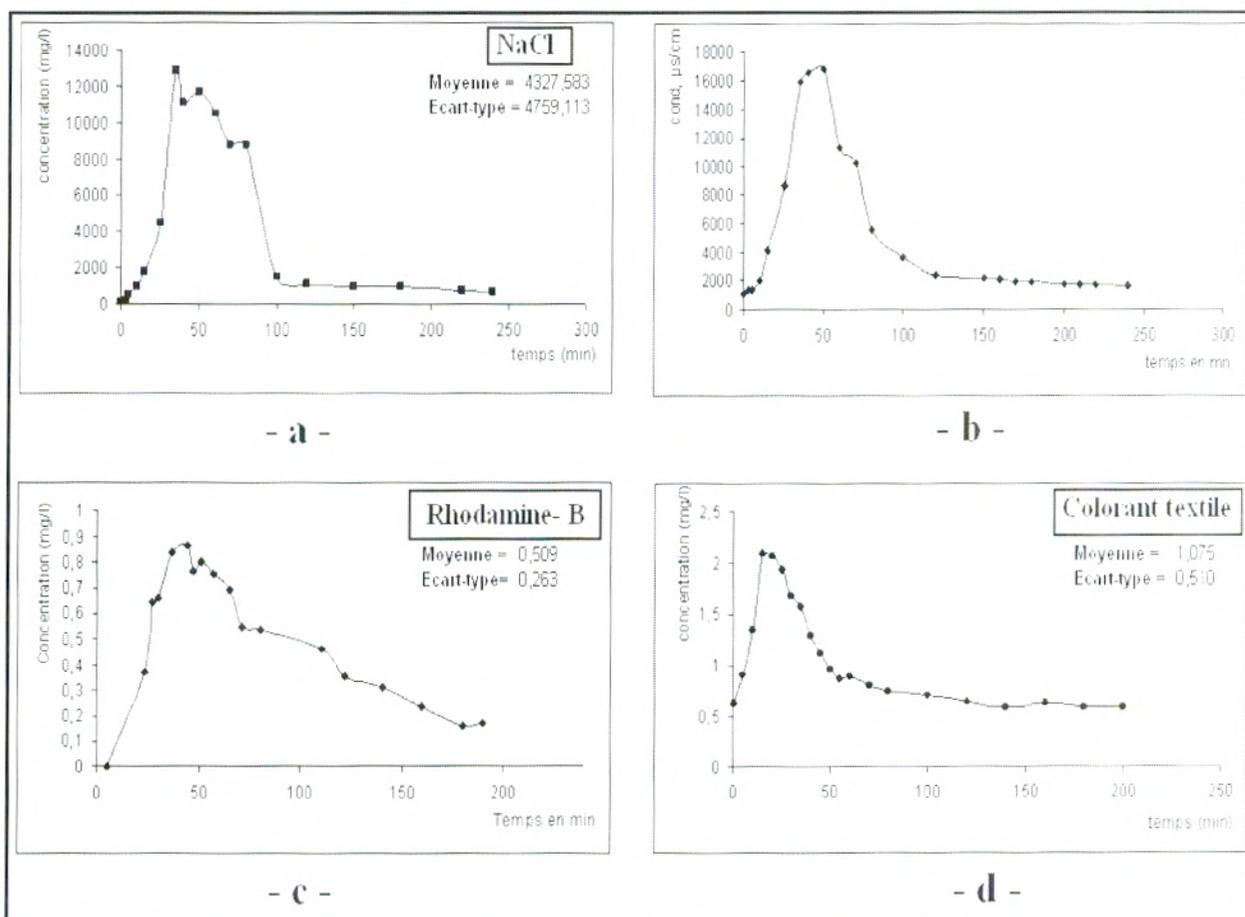


Fig. 32 : Courbes de restitution des traceurs injectés, en écoulement provoqué (Pompage au puits A).

Les différents temps caractéristiques d'un transfert radial convergent lors d'une injection instantanée, des traceurs utilisés, déterminés par la méthode d'identification de Wang, sont représentés dans le tableau 16.

Tableau 16 : Temps caractéristiques en écoulement radial convergent lors de l'injection instantanée des trois traceurs (d'après Wang, 1987).

	NaCl	Rhodamine -B	Colorant textile
$t_{pic} (min)$	35	44	15
$t_c = \bar{t} (min)$	66,52	87,33	80,54
$t_m (min)$	59,86	76,8	125,59
$t_h (min)$	77,18	125,54	177

Dans cet essai, on remarque que les temps caractéristiques du transfert radial convergent réalisé sur le puits « A », sont inférieurs à ceux trouvés pour l'écoulement monodimensionnel, et cela s'explique par le pompage qui fait augmenter la vitesse de l'écoulement en le convergeant vers le puits ; et aussi par la courte distance entre le point d'injection des traceurs et le puits de pompage (0,75 m).

1.2.3.2 Pompage au puits « B »

Les courbes de restitutions de la figure 33, obtenues pour les trois traceurs au point de pompage « B », montrent comme précédemment une évolution régulière de la concentration

en fonction du temps, avec des pics assez importants, traduisant l'homogénéité du milieu aquifère simulé.

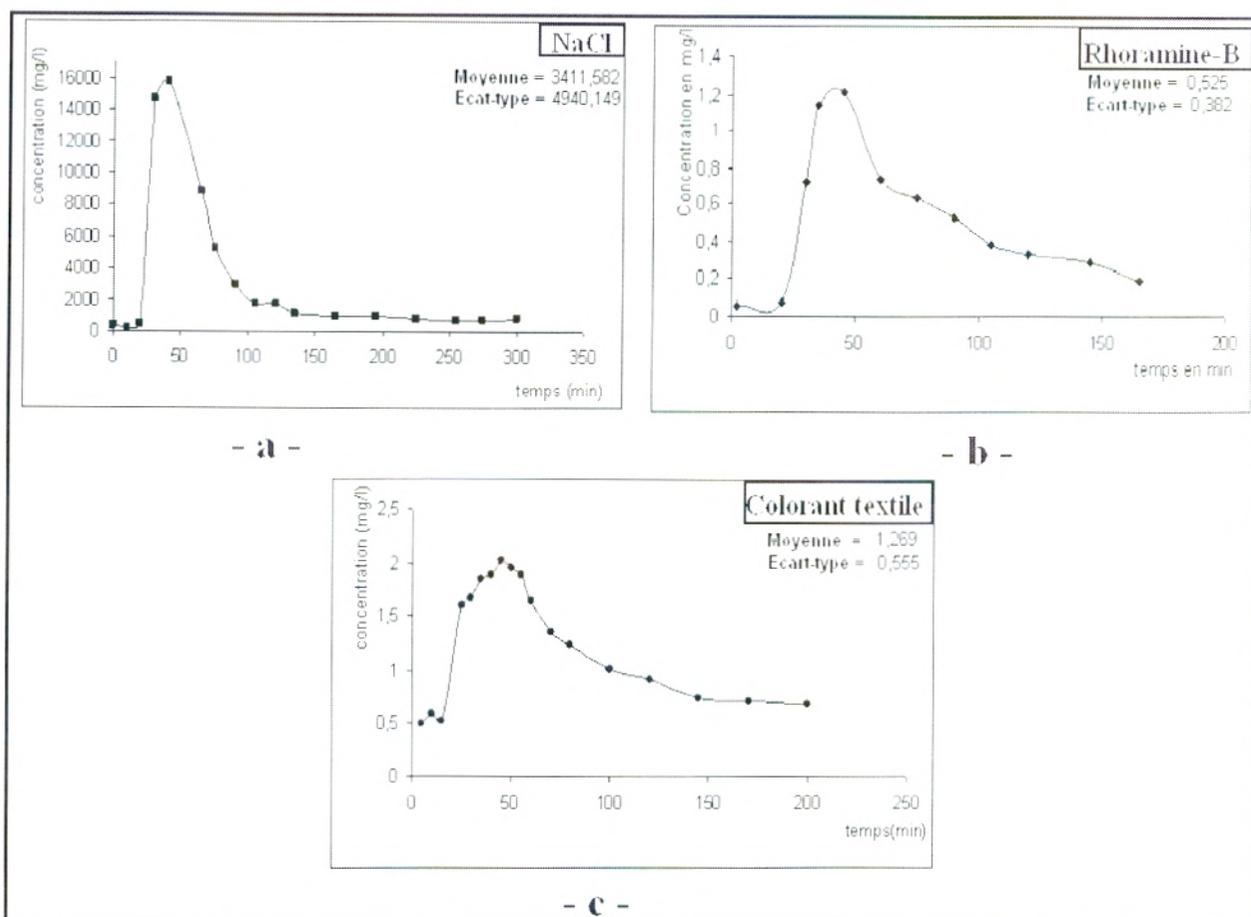


Fig. 33 : Courbes de restitution des traceurs injectés, en écoulement provoqué (Pompage au puits B).

Les temps caractéristiques du transfert radial convergent réalisé par écoulement provoqué au puits « B » sont représentés dans le tableau 17 :

Tableau 17 : Temps caractéristique en écoulement radial convergent lors de l'injection instantanée des trois traceurs.

	NaCl	Rhodamine-B	Colorant textile
$t_{pic} (min)$	40	45	45
$t_c = \bar{t} (min)$	72,74	80,94	104,92
$t_m (min)$	122	71,37	110,69
$t_h (min)$	116,69	98,92	182

Les temps de pic des concentrations des trois traceurs sont pratiquement égaux. Le temps de convection des chlorures de sodium est inférieur par rapport à celui des deux autres traceurs. Pour NaCl et le colorant textile, les temps modaux et harmoniques ont des valeurs supérieures à celles trouvées pour la rhodamine- B.

I.3 COMPORTEMENT PHYSICO-CHIMIQUE DES TRACEURS INJECTES

La figure 34 présente l'évolution temporelle des concentrations cumulées des différents traceurs injectés en amont de la formation sableuse, en écoulement naturel.

L'évolution croissante des concentrations cumulées des chlorures de sodium et leurs stabilités à un taux de restitution très élevé (pratiquement 100%), proviendrait probablement du fait que ce traceur présente des propriétés conservatifs (pas d'adsorption) sur une telle formation (Brouyere, 2001).

Par comparaison, la rhodamine-B présente un taux de restitution de 85%, cela pourrait s'expliquer par son caractère sorptif. (Brouyere, 2001 ; Hanich, 1991 ; Pang et al., 2004).

Le colorant textile présente également un taux de restitution très faible (proche de 45%). La valeur de ce taux laisse supposer que ce polluant a des propriétés de sorption.

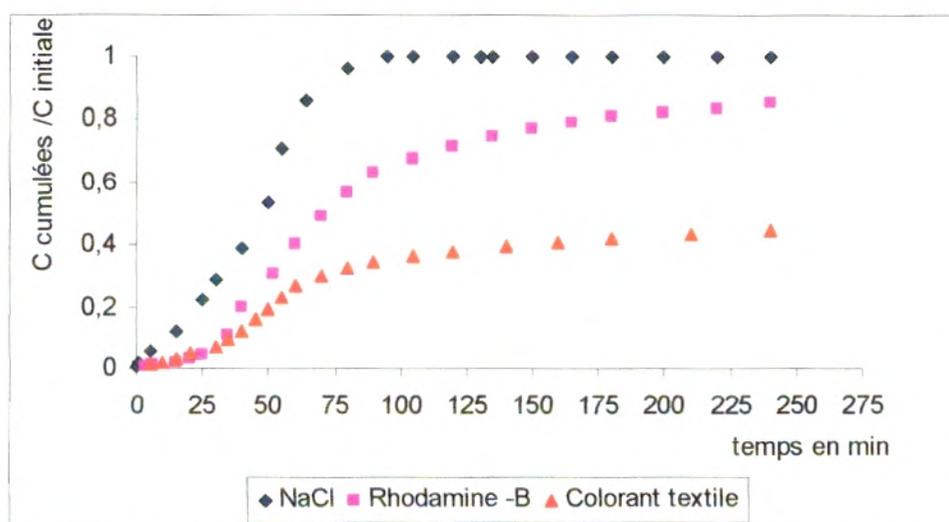


Fig. 34 : Courbes cumulatives des concentrations restituées des traceurs injectés en milieu homogène.

La figure 35 présente l'évolution temporelle des concentrations cumulées des différents traceurs injectés en amont de la formation sableuse, en écoulement provoqué au niveau du puits «B».

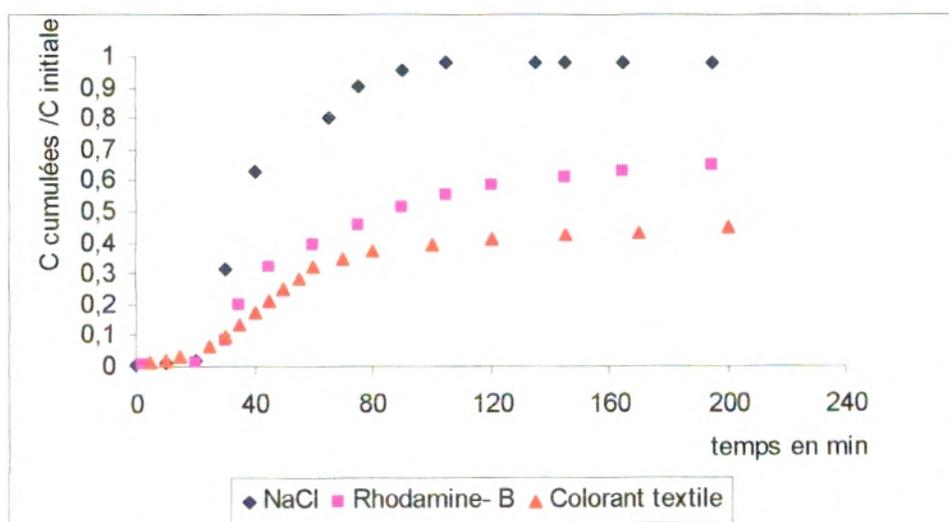


Fig. 35 : Courbes cumulatives des concentrations restituées des traceurs injectés en milieu homogène.

Lors des essais de traçage en écoulement radial convergent réalisés sur cette formation homogène, les traceurs utilisés présentent les mêmes comportements physico-chimiques que ceux pour l'écoulement naturel : les chlorures de sodium ont un taux de restitution très élevé, indiquant leurs caractère conservatif, la rhodamine -B a un taux de 65 % et le colorant textile un taux de 45%.

I.4 DISCUSSION DES RESULTATS

Les courbes de restitution obtenues des différents essais de traçage réalisés sur la formation sableuse en écoulement naturel et convergent, présentent une forme plus au moins homogène, dissymétrique, constituée d'un accroissement de la concentration en fonction du temps, suivi d'une décroissance assez longue ; ce qui est très fréquent dans les milieux homogènes (Hanich, 1991).

Les temps d'arrivée des traceurs aux points d'échantillonnage, en écoulement monodimensionnel et radial convergent, sont très courts, confirmant l'homogénéité du milieu.

Les temps de convection (t_c) permettront de nous donner une idée sur les vitesses de transfert qui seront relativement proches des vitesses d'écoulement : le mouvement du panache de pollution se fera donc selon le chemin préférentiel d'écoulement, c'est-à-dire suivant celui du fluide en relation avec à la loi de Darcy (par convection).

Les taux de restitution des traceurs utilisés indiquent que le chlorure de sodium est plus conservatif (pas d'adsorption) que la rhodamine-B et le colorant textile qui présentent des caractères sorptifs.

II. ESSAI DE TRAÇAGE EN MILIEU HETEROGENE

La propagation d'une pollution dans un milieu hétérogène à lentille dépend des paramètres propres à chaque portion du milieu ; la méthode de traçage en écoulement radial convergent est celle la plus appropriée, puisqu'elle permet une investigation localisée sur une courte distance autour du puits de récupération. En plus, elle permet la récupération maximale du traceur injecté dans le milieu (Matheron et De Marsily, 1980).

II.1 CONDITIONS EXPERIMENTALES

Ce traçage en écoulement radial convergent est réalisé grâce à un pompage continu et à débit constant au puits « B » qui se trouve après la lentille de calcaire argileux afin d'étudier les moindres variations des paramètres de la totalité du milieu.

Des solutions de chlorure de sodium et de Rhodamine-B sont utilisées pour ces essais. Leur injection est réalisée au même point que celui du milieu homogène.

Le tableau 18 résume les conditions de réalisation des essais de traçage pour les deux types de formations à lentille.

Tableau 18 : Conditions des différents essais de traçage réalisés pour les deux cas du milieu hétérogène

Produit injecté	Lentille à 15 % de calcaire argileux		Lentille à 30 % de calcaire argileux	
	Chlorure de Sodium (NaCl)	Rhodamine B	Chlorure de Sodium (NaCl)	Rhodamine B
Conditions aux limites	Limites étanches Régime transitoire	Limites étanches Régime transitoire	Limites étanches Régime transitoire	Limites étanches Régime transitoire
Débit d'alimentation	0,05 l/s	0,05 l/s	0,05 l/s	0,05 l/s
Lieu injection	X	X	X	X
Lieu de récupération	B (distance 1.35 m)	B	B	B
Débit de pompage	0,016 l/s	0,015 l/s	0,015l/s	0,015l/s
Masse injectée	100 g	0,1 g	100 g	0,1 g
Concentration initiale	10 g/l	10 mg/l	10 g/l	10 mg/l
Prélèvement après	5 min d'injection	05 min d'injection	5 min d'injection	5 min d'injection
Temps de restitution	240 min	240 min	240 min	210 min
Incidents	-	-	-	-

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau en annexe II.b.

II.2 RESULTATS ET ANALYSES

Suite aux difficultés rencontrées lors du lavage du bassin du banc, après l'utilisation de la rhodamine –B, le traçage au colorant textile n'a pas pu être réalisé.

II.2.1 Milieu hétérogène avec lentille de 15 % de calcaire argileux

Les courbes de restitution des chlorures de sodium et des valeurs de conductivité mesurées au moment de l'échantillonnage au point de pompage « B » (Fig. 36) montrent comme précédemment en milieu homogène, une évolution régulière de la concentration en fonction du temps, avec un pic assez important (2,6 g/l) par rapport à la moyenne arithmétique ($\approx 1,15$ g/l) après 40 minutes de restitution.

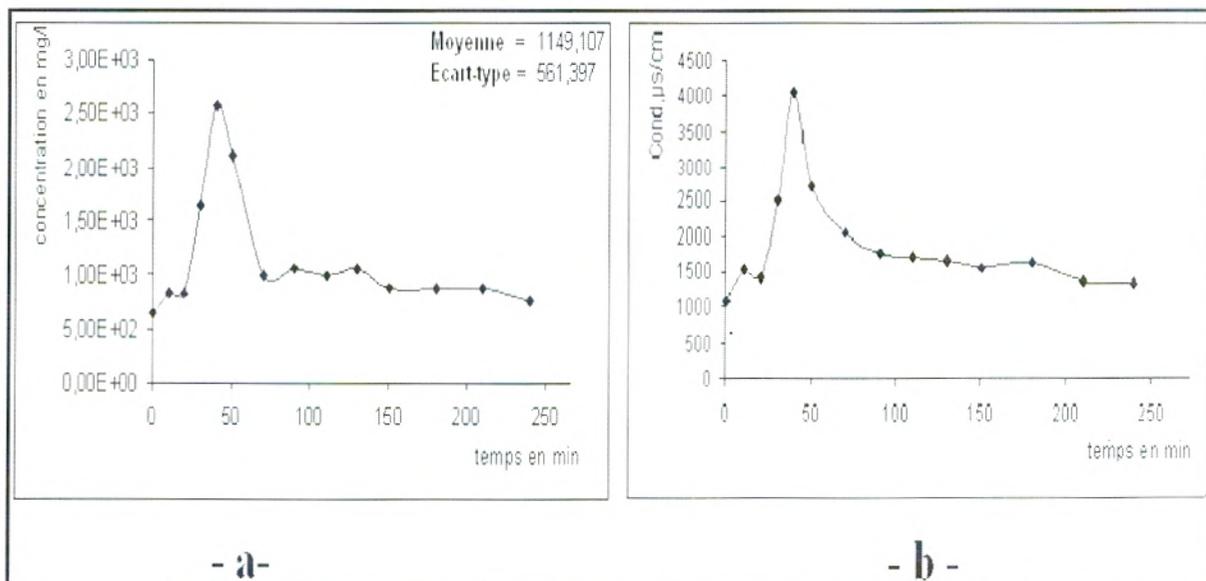


Fig. 36 : Courbes de restitution en écoulement provoqué (pompage au puits B). a- Courbe de restitution de NaCl injecté ; b- Courbe de restitution de la conductivité mesurée.

Par contre la courbe de restitution de la Rhodamine-B au point de pompage «B» (Fig. 37) montre une évolution irrégulière des concentrations en fonction du temps : on remarque une augmentation régulière avec un maximum accusé à 40 minutes de restitution puis une décroissance assez irrégulière qui pourrait s'expliquer par l'hétérogénéité du milieu.

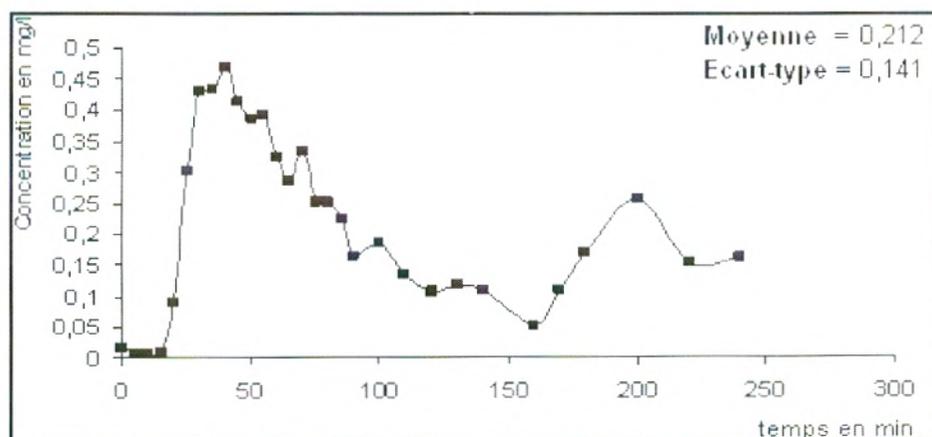


Fig. 37 : Courbe de restitution de la Rhodamine –B en écoulement provoqué (Pompage au puits B).

De ces courbes de restitution (Fig. 36a et Fig. 37), on peut déduire les temps caractéristiques suivantes (Tableau. 19) :

Tableau 19 : Temps caractéristique en écoulement radial convergent lors de l'injection instantanée des traceurs en milieu hétérogène avec lentille à 15 % de calcaire argileux

	Chlorure de sodium	Rhodamine-B
Temps d'arrivée (min)	10	25
t_{pic} (min)	40	40
$t_c = \bar{t}$ (min)	158,83	59,44
t_m (min)	165	54
t_h (min)	272,5	68,53

Les courbes de restitution des deux traceurs « chlorure de sodium et rhodamine-B » en écoulement radial convergent ont montré que le temps des pics de concentration est resté dans ce premier cas du milieu hétérogène semblable à celui trouvé pour le milieu homogène. Toutefois le temps d'arrivée de la rhodamine-B au point de pompage est légèrement retardé 5 minutes.

II.2.2 Milieu hétérogène avec lentille à 30 % de calcaire argileux

La courbe de restitution des chlorures de sodium (Fig. 38) injectés dans ce milieu en écoulement provoqué présente un retard d'arrivée du traceur au niveau du puits de pompage suivi d'une augmentation régulière de la concentration du traceur avec un maximum de 3g/l, maintenu durant 20 min. Par la suite on assiste à une chute des concentrations à 1.5g/l qui se poursuit plus ou moins régulièrement.

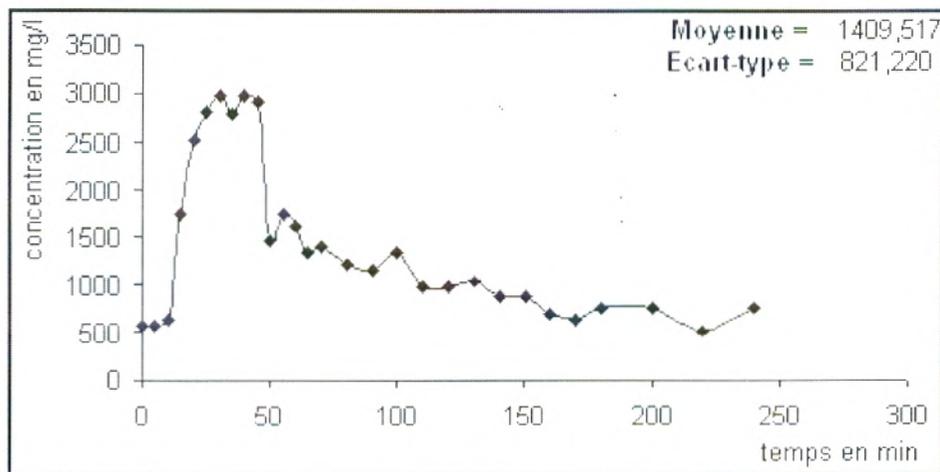


Fig. 38 : Courbe de restitution de NaCl injecté dans le cas d'un écoulement provoqué (Pompage au puits B).

La courbe de restitution de la rhodamine-B injectée dans ce 2^{ème} cas du milieu hétérogène en écoulement provoqué (Fig. 39) montrent un retard d'arrivée du traceur considérable (de 35 mn de l'injection), suivis d'une augmentation régulière avec un pic de 0,76 mg/l, puis une décroissance régulière et assez longue.

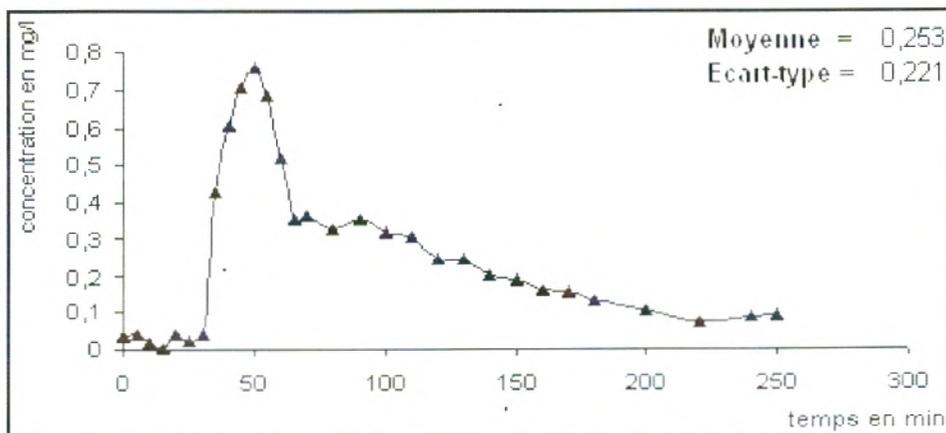


Fig. 39 : Courbe de restitution de la Rhodamine -B injectée en écoulement provoqué (Pompage au puits B).

Les temps caractéristiques correspondants aux courbes de restitution des figures 38 et 39 sont les suivants (Tableau. 20) :

Tableau. 20 : Temps caractéristique en écoulement radial convergent lors de l'injection instantanée des traceurs en milieu hétérogène avec lentille à 30 % de calcaire argileux

	Chlorure de sodium	Rhodamine-B
Temps d'arrivée (min)	10	35
t_{pic} (min)	30	50
$t_c = \bar{t}$ (min)	114,37	75,78
t_m (min)	160	71,24
t_h (min)	236,36	82,55

II.3 COMPORTEMENT PHYSICO-CHIMIQUE DES TRACEURS INJECTES

L'évolution temporelle (Fig.40) des concentrations cumulées des différents traceurs injectés en amont de la formation sableuse à lentille à 15 %, en écoulement provoqué (pompage au puits B) montre un taux de restitution très important (de 95 %) pour le NaCl, qui ne peut être justifié que par le caractère conservatif de ce traceur ; tandis que la rhodamine -B présente un taux de restitution beaucoup plus faible (56 %), qui confirme ses propriétés d'adsorption.

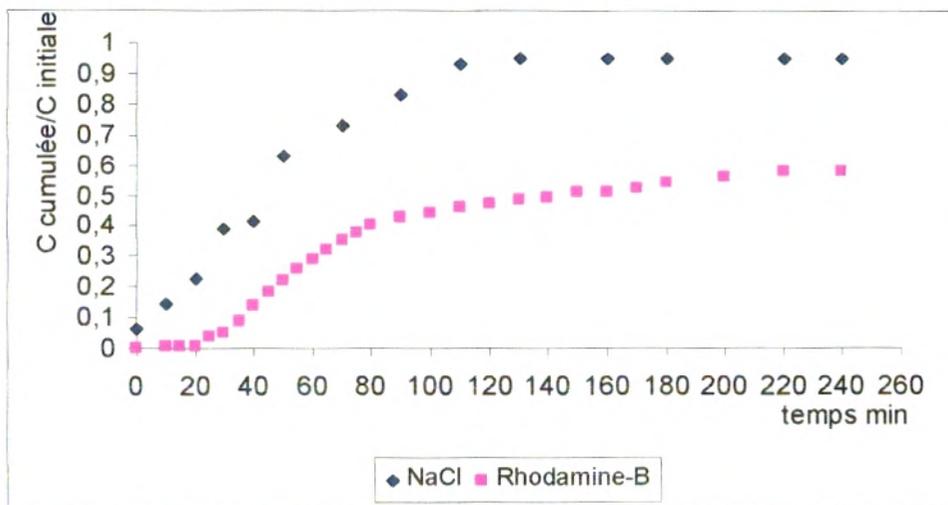


Fig. 40 : Courbes cumulatives des concentrations restituées des traceurs injectés au 1^{er} cas du milieu hétérogène.

L'évolution des concentrations cumulées du chlorure de sodium et de la rhodamine-B dans le cas de la lentille à 30% (Fig. 41) montre une allure différente de celle des courbes précédentes : la courbe de NaCl présente une montée rapide (40 min), puis une quasi-stabilité à un taux de restitution maximum (100 %) ; et celle de la rhodamine-B présente un taux de restitution de 75%.

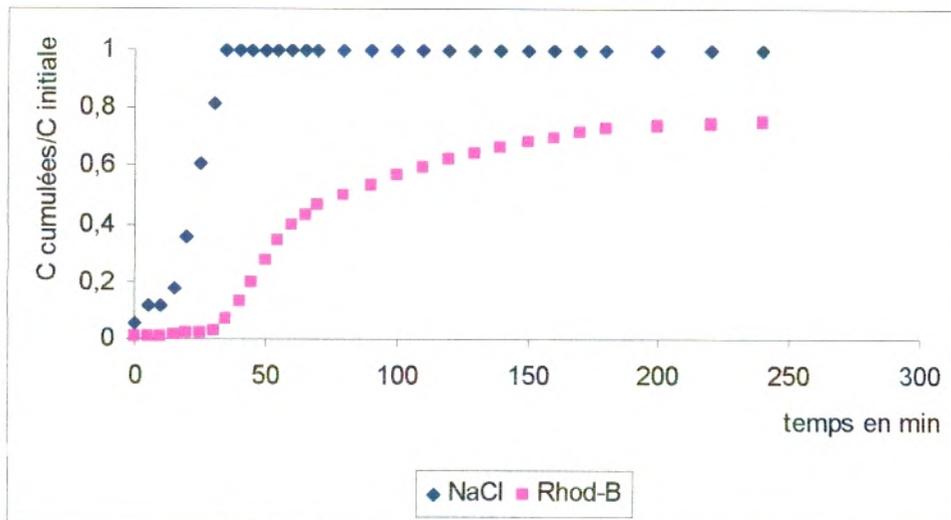


Fig. 41 : Courbes cumulatives des concentrations restituées des traceurs injectés au 2^{ème} cas du milieu hétérogène.

II.4 DISCUSSION DES RESULTATS

Les courbes de restitution obtenues par les différents essais de traçage, réalisés sur les 2 cas du milieu hétérogène constitués de la formation sableuse à lentille, en écoulement radial convergent, présentent des formes irrégulières, marquées par des retards des temps d'arrivée au puits B et des décroissances irrégulières de concentrations des traceurs utilisés.

Les taux de restitution du chlorure de sodium sont proches de 100 %, ce qui indique qu'ils sont conservatifs même dans de tels milieux. Pour la rhodamine-B, le taux de restitution du 1^{er} cas (lentille à 15%) est inférieur à celui du milieu homogène, par contre celui du 2^{ème} cas (lentille à 30%) est plus élevé.

Dans ce dernier cas deux explications peuvent être apportées :

- D'abord, les caractéristiques hydrodynamiques montrent un ralentissement de l'écoulement au niveau de la lentille de perméabilité plus faible que celle de la formation sableuse. Ceci est en harmonie avec le retard de l'arrivée du traceur au puits de pompage. Ce qui témoigne d'un freinage du transfert des solutions chimiques.

- En outre, ces résultats peuvent être indicateurs d'une "reconcentration" du traceur au niveau de la lentille, ce qui justifie ces taux de restitution (Fig. 41) et la stabilité du maximum de NaCl pendant 20 minutes (Fig. 38).

Toutefois, les taux de restitution de la rhodamine-B, témoignent des propriétés d'adsorption de ce traceur dans ces formations à composante argileuse.

III. DETERMINATION DES PARAMETRES DE DIFFUSION ET DE DISPERSION

Pour les différents essais de traçage réalisés sur le banc expérimental, la détermination des caractéristiques hydrodispersives est réalisée à l'aide de la méthode graphique linéaire (Wang, 1987) qui a pour avantage de se focaliser sur la montée seule des courbes de restitution, permettant de traiter séparément les phénomènes de convection–dispersion des phénomènes secondaires (diffusion moléculaire, sorption).

III.1 MILIEU HOMOGENE

La figure 42 montre l'évolution de la variation des logarithmes népériens du produit concentration–temps pendant un intervalle de temps (dt), en fonction de l'inverse du produit $t \times (t+dt)$, pour tous les cas étudiés en écoulement monodimensionnel et radial convergent dans le milieu homogène. Ces différentes droites d'équation : $H' = aX + b$ ont permis la détermination des paramètres hydrodispersifs du milieu.

III.1.1 Ecoulement monodimensionnel

Les courbes des Figures 42a, b et c, ont servis pour la détermination des paramètres hydrodispersifs donnés au tableau 21 :

Tableau. 21 : Paramètres hydrodispersifs du milieu homogène, en écoulement monodimensionnel

	C initiale (g/l)	C pic (mg/l)	Pe	tc (min)	V (m/s)	α_l (m)	D_L (m ² /s)
Chlorure de Sodium	20	3450	3,63	142	$2,34 \cdot 10^{-4}$	0,55	$1,29 \cdot 10^{-4}$
Rhodamine-B	0,01	1,08	4,68	123	$2,71 \cdot 10^{-4}$	0,42	$1,15 \cdot 10^{-4}$
Colorant textile	0,05	1,85	3,6	136,46	$2,44 \cdot 10^{-4}$	0,55	$1,35 \cdot 10^{-4}$

Ces résultats montrent que les valeurs des coefficients de dispersivité (α_l) du chlorure de sodium et du colorant textile sont égaux et que celles de leur coefficient de dispersion longitudinale sont relativement proches, alors que pour la rhodamine–B les valeurs de ces mêmes coefficients sont légèrement plus faibles.

Les vitesses de transfert (V) sont très élevées pour les trois traceurs par rapport à la vitesse fictive du flux d'eau en écoulement uniforme ($2,5 \cdot 10^{-5}$ m/s), ce qui indique un transfert par convection pure.

III.1.2 Ecoulement radial convergent (provoqué)

III.1.2.1 Pompage « A »

Nous avons utilisé les courbes des figures 42d, e, f, pour la détermination des paramètres hydrodispersifs donnés au tableau 22 :

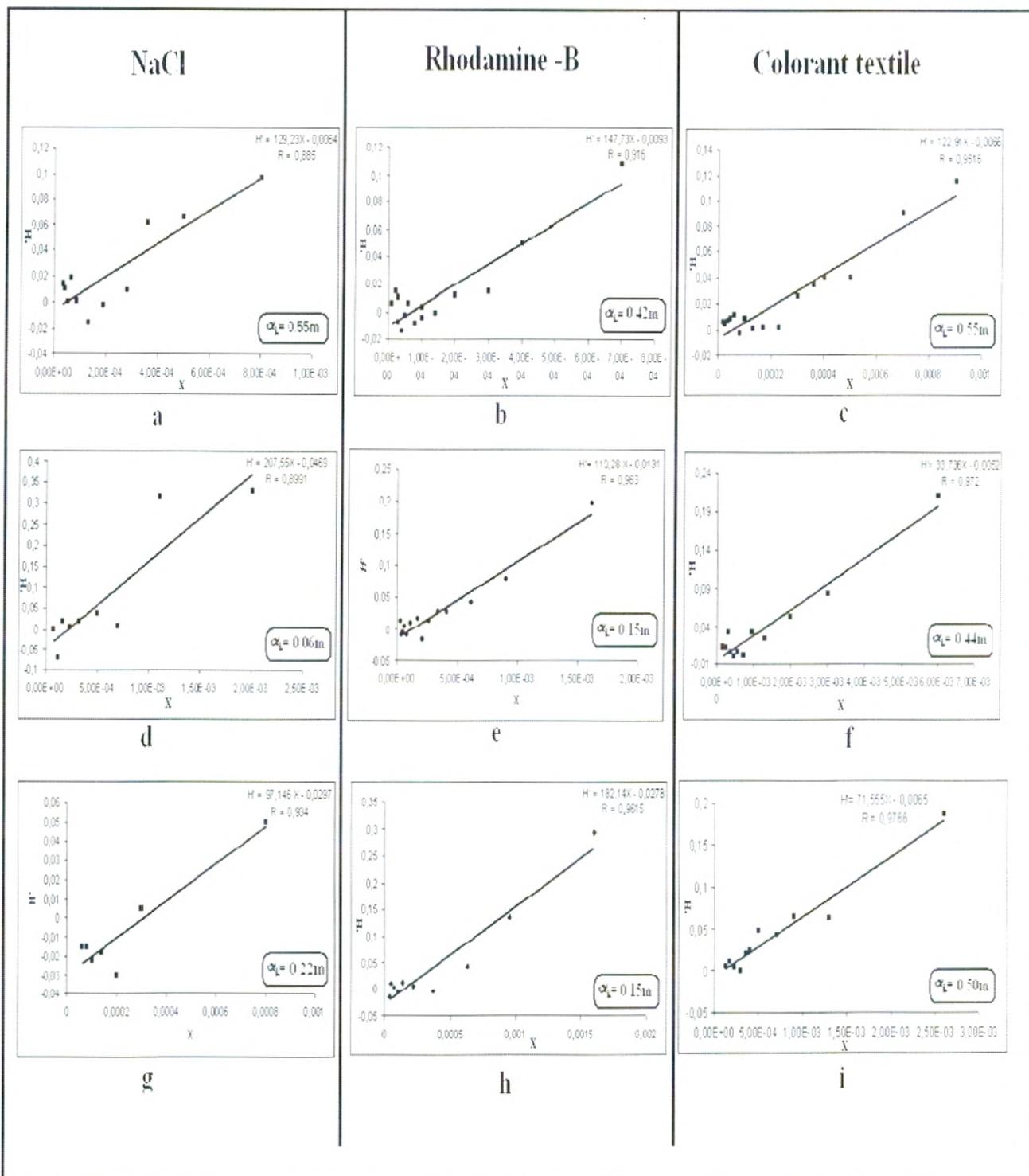


Fig. 42 : Détermination de la dispersivité par la méthode de Wang pour le traçage dans le milieu homogène (Sables de Targa).

a, b et c : représentations graphiques linéaires pour le traçage en écoulement naturel ; **d, e et f :** représentations graphiques linéaires pour le traçage en écoulement provoqué (pompage au puits A) ; **g, h et i :** représentations graphiques linéaires pour le traçage en écoulement provoqué (pompage au puits B).

Tableau 22 : Paramètres hydrodispersifs du milieu homogène, en écoulement radial convergent (pompage puits A)

	C initiale (g/l)	C pic (mg/l)	Pe	tc= \bar{t} (min)	V (m/s)	α_l (m)	D _L (m ² /s)
Chlorure de Sodium	20	12870	12,47	66,52	1,12 10 ⁻²	0,06	6,78 10 ⁻⁴
Rhodamine- B	0,01	0,886	5	95,42	7,85 10 ⁻³	0,15	1,17 10 ⁻³
Colorant textile	0,05	2,091	1,67	80,54	9,31 10 ⁻³	0,44	4,18 10 ⁻³

Les valeurs des paramètres hydrodispersifs du chlorure de sodium ne sont pas représentatives, puisque le puits de pompage A été colmaté, au moment de l'essai.

Les valeurs des coefficients de dispersivité (α_l) de la rhodamine-B et du colorant textile sont inférieures à celles de l'expérience précédente, ce qui peut être justifié par la courte distance entre les points d'injection et de pompage (75cm).

Les valeurs des vitesses du transfert des traceurs et celles des coefficients de dispersion longitudinale sont de l'ordre de 10⁻³.

III.1.2.2 Pompage « B »

Les paramètres hydrodispersifs du tableau 23, sont calculés à partir des droites des figures 42 g, h et i :

Tableau 23 : Paramètres hydrodispersifs du milieu homogène, en écoulement radial convergent (pompage puits B)

	C initiale (g/l)	C pic (mg/l)	Pe	tc= \bar{t} (min)	V (m/s)	α_l (m)	D _L (m ² /s)
Chlorure de Sodium	50	15790	6,79	57,19	2,36 10 ⁻²	0,22	5,2 10 ⁻³
Rhodamine- B	0,01	1,212	9	80,94	1,16 10 ⁻²	0,15	2,5 10 ⁻³
Colorant textile	0,05	2,025	2,72	104,92	1,28 10 ⁻²	0,50	6,38 10 ⁻³

La valeur du coefficient de dispersivité (α_l) du colorant textile est plus élevée (0,5 m) que celles des chlorures de sodium et de la rhodamine-B (entre 0,15 et 0,22 m).

Les valeurs des vitesses du transfert (V) des traceurs sont comprises entre 1,16 10⁻² m/s et 2,36 10⁻² m/s, et celles de leur coefficient de dispersion longitudinale (D_L) entre 2,5 10⁻³ et 6,38 10⁻³ m²/s.

Les paramètres hydrodispersifs de la rhodamine-B sont inférieurs à ceux des autres traceurs.

III.2 MILIEU HETEROGENE

La figure 43 montre l'évolution de la variation des logarithmes népériens du produit concentration–temps pendant un intervalle de temps (dt), en fonction de l'inverse du produit $t \times (t+dt)$, des deux traceurs (NaCl et Rhodamine–B) utilisés.

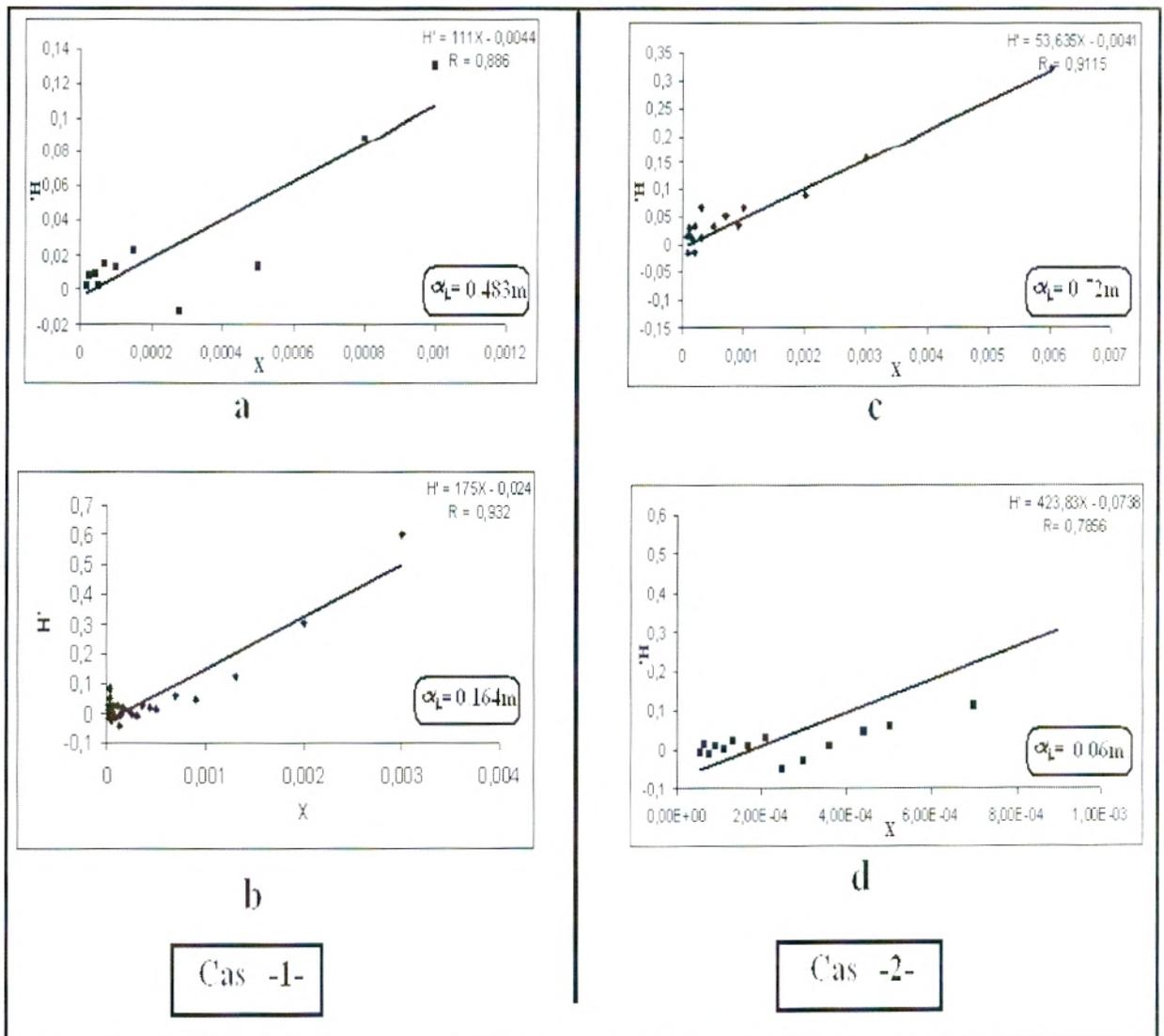


Fig. 43: Détermination de la dispersivité par la méthode de « Wang » pour le traçage dans le milieu hétérogène en écoulement provoqué (pompage au puits B).

a, b : représentations graphiques linéaires pour le traçage dans le milieu hétérogène à lentille sableuse à 15% de calcaire argileux ; **c, d :** représentations graphiques linéaires pour le traçage dans le milieu hétérogène à lentille sableuse à 30% de calcaire argileux.

III.2.1 Milieu hétérogène avec lentille à 15 % de calcaire argileux

Les paramètres hydrodispersifs (tableau 24) sont déterminés à partir des courbes des figures 43a et b :

Tableau 24 : Paramètres hydrodispersifs du 1^{er} cas du milieu hétérogène, en écoulement radial convergent (pompage puits B)

	C initiale (g/l)	C pic (mg/l)	Pe	tc= \bar{t} (min)	V (m/s)	α_l (m)	D _L (m ² /s)
Chlorure de Sodium	10	2574	2,795	158,83	8,5 10 ⁻³	0,483	4,1 10 ⁻³
Rhodamine- B	0,01	0,471	8,19	85,391	1,5 10 ⁻²	0,164	2,6 10 ⁻³

Le coefficient de dispersivité (α_l) du chlorure de sodium est plus élevé que celui de la rhodamine-B.

Les coefficients de dispersion longitudinale sont de l'ordre de 10⁻³m²/s.

Contrairement au milieu homogène, la vitesse de transfert de la rhodamine-B est supérieure à celle du chlorure de sodium.

III.2.2 Milieu hétérogène à une Lentille à 30 % de calcaire argileux

Des courbes des figures 43 **c** et **d**, nous tirons les paramètres hydrodispersifs donnés au tableau 25 :

Tableau 25 : Les paramètres hydrodispersifs du 2^{ème} cas du milieu hétérogène, en écoulement radial convergent (pompage puits B) :

	C initiale (g/l)	C pic (mg/l)	Pe	tc= \bar{t} (min)	V (m/s)	α_l (m)	D _L (m ² /s)
Chlorure de Sodium	10	2983	1,875	114,37	1,18 10 ⁻²	0,72	8,50 10 ⁻³
Rhodamine - B	0,01	0,759	22,37	75,78	1,78 10 ⁻²	0,06	1,07 10 ⁻³

Le coefficient de dispersivité (α_l) du chlorure de sodium est très élevé comparé à celui de la rhodamine-B et aussi par rapport à ceux des essais précédents. Les coefficients de dispersion longitudinale sont de l'ordre de 10⁻³m²/s, et la vitesse de transfert de la rhodamine-B est supérieure à celle des chlorures de sodium.

Remarque :

Plusieurs auteurs (Matheron et De Marsily, 1980 ; Dieulin et al., 1981 in Hanich, 1991) ont démontré que l'application de l'équation de dispersion – convection dans un milieu hétérogène n'est possible, que si le milieu s'étend sur une grande échelle. On considérera alors celui-ci comme globalement homogène.

La détermination des paramètres hydrodispersifs des milieux hétérogènes peut être envisagée par l'utilisation de la méthode du traçage en puits unique. Cette méthode, qui offre la possibilité d'investigation sur une courte distance, ne peut être réalisée sur le banc d'essai du laboratoire.

Partie III : MODELISATION

Chapitre VI : MODELISATION HYDRODYNAMIQUE

I. OBJECTIFS

La modélisation envisagée dans le cas du milieu homogène existant dans le banc d'essai hydrologique, a pour but de tester la proposition de fonctionnement des transferts des fluides et la prévision de distribution des concentrations des substances polluantes du système hydrogéologique, en se basant sur un scénario réalisé au laboratoire (qui définit les conditions initiales et les conditions aux limites) et en utilisant les paramètres physiques du milieu, qui ont pu être mesurés durant la phase expérimentale. Pour ce faire nous utilisons le code de calcul « aquifère simulation model »ASM5

II. PRESENTATION DU MODELE ASM.

Le modèle hydrodynamique A.S.M. (Aquifer Simulation Model) est l'adaptation complète d'un modèle d'eaux souterraines en deux dimensions (2-D) utilisable sur un ordinateur, sous MS-DOS. La première version d'ASM a été mise en point par Kinzelbach et Rausch en 1989 pour la gestion des ressources en eaux souterraines. L'ASM a été continuellement amélioré depuis.

Pour les essais de modélisation dans ce travail, nous utilisons la version 5 de l'ASM (Kinzelbach & Rausch, 1995).

La modélisation d'un système hydrogéologique passe par la résolution des équations d'écoulements (Mania, 2001 ; Patriarche, 2001 ; Ledoux, 2003). Afin de réaliser cette modélisation, un nombre minimal de données est requis : il s'agit de données reflétant des conditions initiales (pour un instant 0 de simulation) et les conditions aux limites du système. Ces conditions sont imposées systématiquement aux maillages du domaine discrétisé par le logiciel A.S.M.

Les conditions aux limites des domaines d'intégration sont de deux types :

- Limites à potentiel imposé : cette condition porte sur la variable h . Elle s'applique lorsque la charge hydraulique à la limite considérée est indépendante des conditions de circulation dans l'aquifère.
- Limites à flux imposé : cette condition vise à imposer une valeur du gradient de charge à la limite considérée ;
 - limites à flux nul : cette option peut être utilisée pour décrire le contact entre un aquifère et une strate imperméable ;
 - limites à flux non nul : chaque nœud de la limite est alors traité comme source par le modèle.

Les équations discrétisées de l'écoulement sont résolues par la méthode de Gauss Seidel. Leurs solutions sont basées sur la méthode des différences finies.

L'aquifère est représenté par des mailles rectangulaires ou carrées à dimensions variables.

II.1 Disponibilité des données

II.1.1 Géométrie

Le domaine est discrétisé en 210 mailles, de 0,1 m de coté, pour 190 d'entre elles, et de 0,05 m de largeur et de 0,1 m de longueur pour les 20 mailles restantes ; soit 21 colonnes et 10 lignes (Fig. 44)

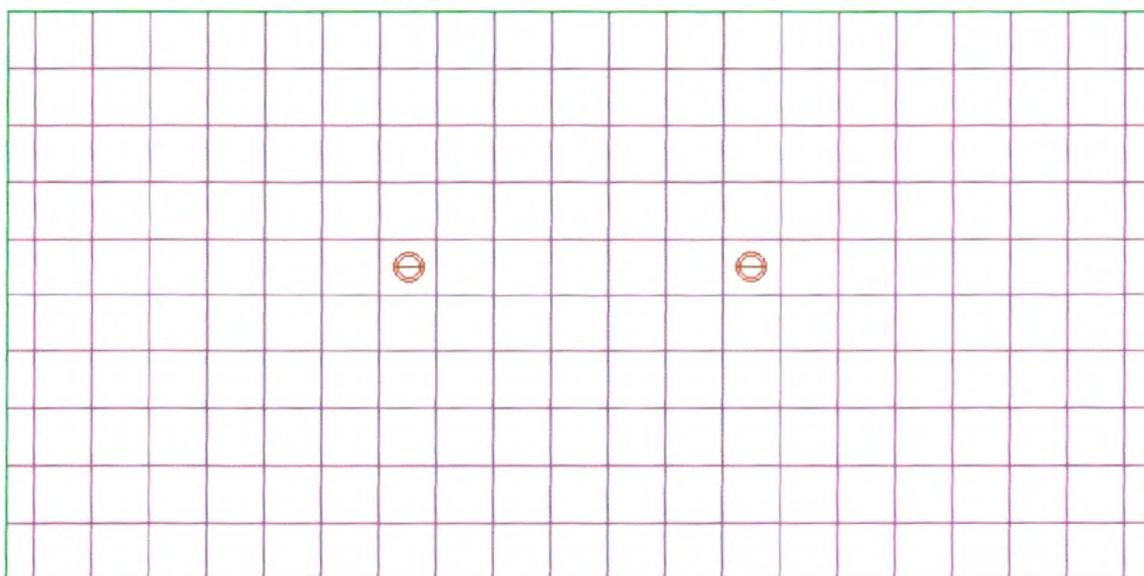


Fig. 44 : Discrétisation du domaine et position des puits de pompage.

II.1.2 Paramètres physiques et calage

Les paramètres physiques intervenant lors de la modélisation sont les paramètres utilisés par les équations d'écoulement et de transfert.

Le modèle hydrodynamique calcule les potentiels hydrauliques à partir des paramètres hydrodynamiques (Perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement), des conditions aux limites et des débits imposés (Débit d'alimentation, débit de décharge, pompages,...)

- En régime permanent, l'écoulement est simulé avec une alimentation en amont et une décharge en aval : débit $Q = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$;
- Les charges mesurées, pour ce type de régime considéré comme stabilisé, ont été introduites dans ce modèle comme état de référence ;
- La perméabilité moyenne du matériau utilisé (sable) a été fixée au départ à $6,25 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Le calage est effectué, en réalisant de nombreuses simulations au cours desquelles on change les valeurs du coefficient de perméabilité de manière à s'approcher, par le calcul des charges piézométriques mesurées.

La qualité de la simulation est généralement évaluée en mesurant les écarts entre les séries simulées et observées, l'ajustement des paramètres consiste à rechercher l'écart minimum.

II.3 Validation des résultats

Le modèle calé, constitue une représentation simplifiée de la réalité :

- La carte piézométrique (Fig. 45) trouvée par le modèle est assez similaire à la carte piézométrique mesurée, présentée au chapitre III de la deuxième partie (Fig. 13) ;

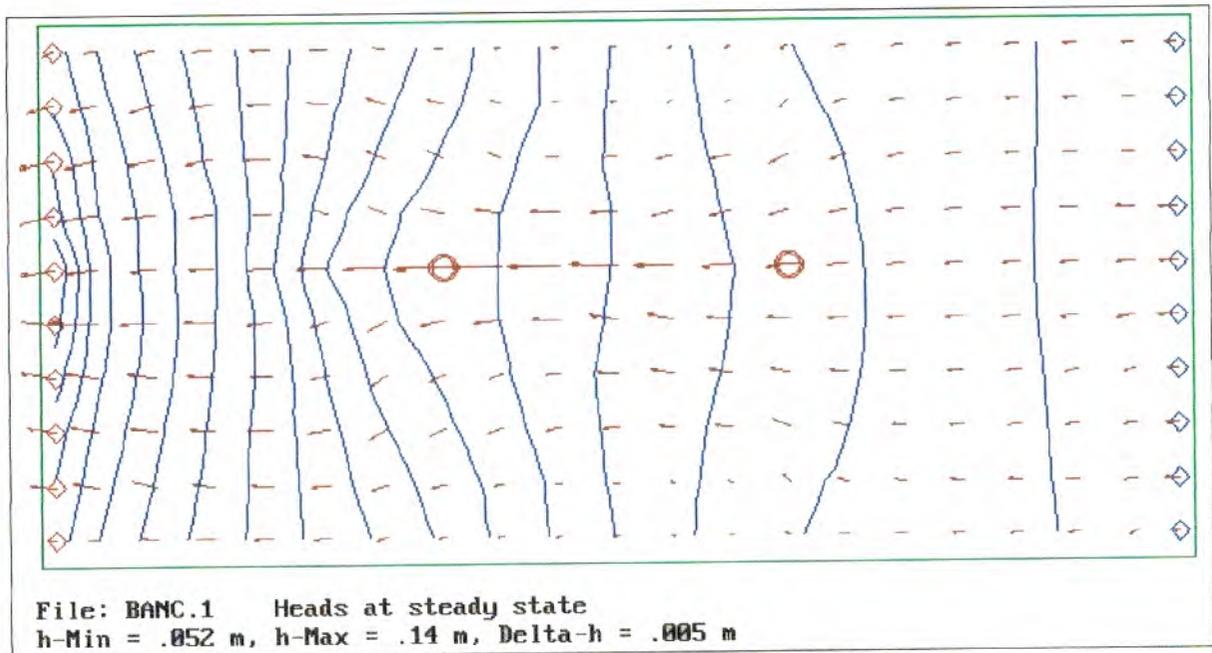


Fig. 45 : Carte piézométrique après calage.

- La carte de perméabilité adoptée pour le calage (Fig. 46) comporte cinq zones :

- Zone 1 : $2,5 \cdot 10^{-2}$ m/s ;
- Zone 2 : $2,02 \cdot 10^{-2}$ m/s ;
- Zone 3 : $1,54 \cdot 10^{-2}$ m/s ;
- Zone 4 : $1 \cdot 10^{-2}$ m/s ;
- Zone 5 : $5,8 \cdot 10^{-3}$ m/s.

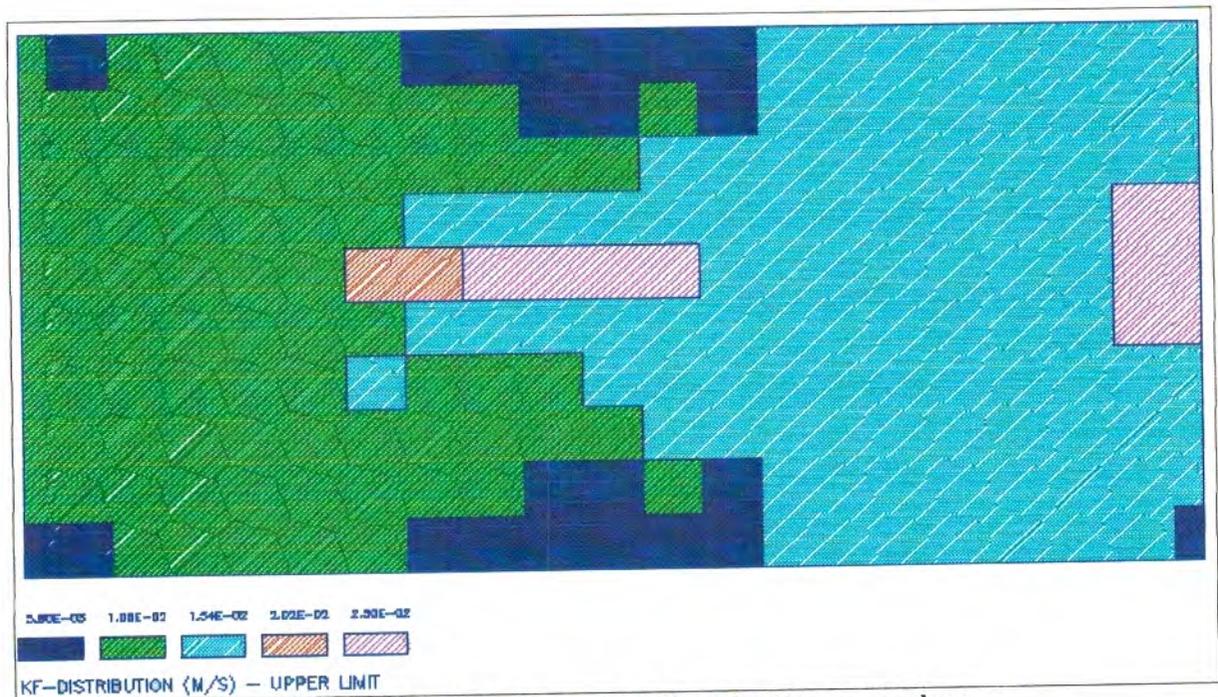


Fig. 46 : Carte de la perméabilité adoptées pour calage.

La validation de ce modèle hydrodynamique, offre des possibilités d'exploration, en réalisant des simulations des transferts des substances polluantes dans un tel milieu.

Chapitre VII : MODELISATION DU TRANSFERT : MODELE HYDRODYSPERSIF

I. APPLICATION DE LA METHODE DES DIFFERENCES FINIES A LA RESOLUTION DE L'EQUATION DE LA DISPERSION

D'une manière générale, la méthode des différences finies se révèle peu efficace pour la résolution de l'équation de la dispersion avec les hypothèses qui ont été formulées.

Les directions principales du tenseur de dispersion est portée par la vitesse de Darcy, ce qui implique que normalement ces directions puissent évoluer dans l'espace, et même dans le temps, ce qui est incommode sinon impossible à réaliser en différences finies.

Certains cas particuliers peuvent cependant relever de cette méthode, lorsque la direction de la vitesse d'écoulement est uniforme quand la dispersion peut être négligée devant la convection, ou encore lorsque le tenseur de dispersion est isotrope. (Ledoux, 2003)

Un aperçu de la mise en oeuvre des différences finies dans ce dernier cas est donné pour un système aquifère monocouche en considérant un élément dissous qui n'interfère pas avec la fraction immobile du milieu.

L'équation à résoudre est alors la suivante:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial(vxc)}{\partial x} - \frac{\partial(vyc)}{\partial y} = \varepsilon_c \frac{\partial C}{\partial t}$$

Comme dans le cas de l'écoulement, on réalise un maillage du domaine d'intégration à partir d'éléments carrés réguliers, de côté, auxquels on attribue une valeur discrète des différentes grandeurs intervenant dans l'équation de dispersion (Fig. 47).

Le système d'équations discrétisées donnant la concentration est alors obtenu en écrivant pour chaque maille le bilan des flux de matière accompagnant le mouvement de l'eau.

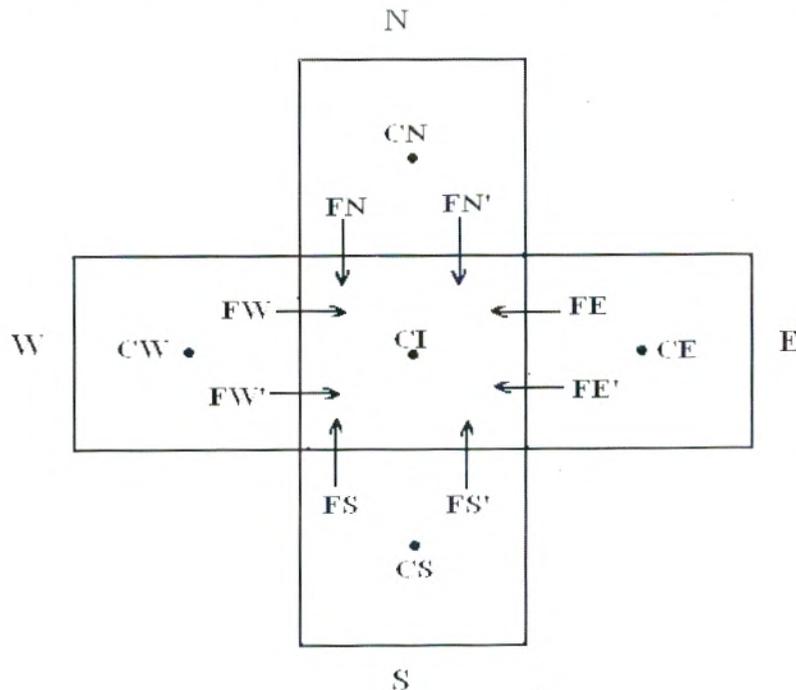


Fig. 47: Bilan des flux de matière en différences finies dans la maille i.

I.1 Calcul du flux dispersif

Ce calcul est semblable en tout point à celui qui a été décrit dans le cas de l'équation de diffusivité.

Flux traversant la limite nord:

$$FN = DN \times e(CN - Ci)$$

Où :

Ci : la concentration dans la maille i ;

CN : la concentration de la maille située au nord de i ;

DN : le coefficient de dispersion dans la direction nord qui peut être obtenu à partir des coefficients de dispersion affectés à chaque maille, par exemple en affectant la moyenne harmonique. Rappelons que ce coefficient de dispersion peut être proportionnel au module $|V|$ de la vitesse de Darcy ;

e : l'épaisseur moyenne de l'aquifère.

Une formulation analogue s'applique au trois autres directions est, sud et ouest.

I.2 Calcul du flux convectif

Le flux convectif FN' traversant, par exemple, la limite nord est le produit de la composante normale de la vitesse de Darcy par la concentration véhiculée par l'écoulement. La solution offrant le maximum de signification physique consiste à utiliser la concentration de la maille située en amont de l'écoulement, ce qui implique donc un choix variable suivant le sens de la vitesse normale.

Fixant arbitrairement une valeur positive à la vitesse VN entre la maille i et la maille nord lorsqu'elle est dirigée vers i , on écrira:

- $FN' = VN \times a \times e \times CN$ pour $VN > 0$
- $FN' = VN \times a \times e \times Ci$ pour $VN < 0$

Le bilan complet s'établit comme suit:

$$FN + FE + FS + FW + FN' + FE' + FS' + FW' = Fem$$

Flux dispersif flux convectif

Fem représente le flux de matière emmagasiné, c'est-à-dire la variation à chaque instant de la masse contenue dans la porosité cinématique.

$$Fem = a^2 \times e \times \varepsilon_c \frac{\partial Ci}{\partial t}$$

D'où, finalement, le système d'équations discrétisées s'exprimant en notation matricielle par:

$$\overline{AC} = a^2 \times \overline{E} \frac{dC}{dt}$$

en introduisant le vecteur $C = \begin{bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix}$ dont les composantes sont les concentrations sur les n

mailles, la matrice \overline{A} construite à partir des coefficients de dispersion et des vitesses de Darcy et la matrice diagonale \overline{E} contenant les porosités cinématiques.

I.3 Résolution du système d'équations discrétisées

On constate facilement qu'avec les hypothèses utilisées, la matrice \bar{A} possède les mêmes propriétés que la matrice \bar{T} relative à l'écoulement, excepté la propriété de symétrie qui est supprimée par la présence du terme convectif. Les méthodes numériques proposées pour l'écoulement s'appliquent donc ici dans les mêmes conditions.

En pratique, le calcul des concentrations devra être mené en parallèle avec celui de l'écoulement qui permet de définir les vitesses de Darcy qui interviennent comme paramètres de l'équation de dispersion. Dans la mesure où l'on admet que la concentration en substance dissoute n'a pas d'influence sur l'écoulement (hypothèse du "traceur" déjà citée), ces calculs peuvent être totalement découplés. (Ledoux, 2003)

II. APPLICATIONS DU MODELE HYDRODISPERSIF (Utilisation du logiciel A.S.M. 5)

Le modèle calcule les transports des polluants à partir des paramètres hydrodispersifs (Dispersivité longitudinale et transversale, Facteur de retard, Coefficients de dispersion et de distribution), des conditions aux limites et des concentrations imposés (Concentration imposée avant transport, généralement nulle, et concentration du flux entrant aux limites).

Ces transferts sont effectués, en réalisant de nombreuses simulations sur modèle hydrodynamique calé, au cours desquelles on change les polluants (traceurs) en variant leurs paramètres hydrodispersifs et leurs types d'écoulements (naturel et provoqué), de manière à observer l'évolution des concentrations de ces traceurs en fonction du temps et de la distance par rapport au point d'injection, représenté par (+) sur la figure 48. Les points d'observation sont implantés sur la trajectoire de l'axe de drainage (Fig. 48), suivant les positions [2, 5], [11, 5] et [20, 5].

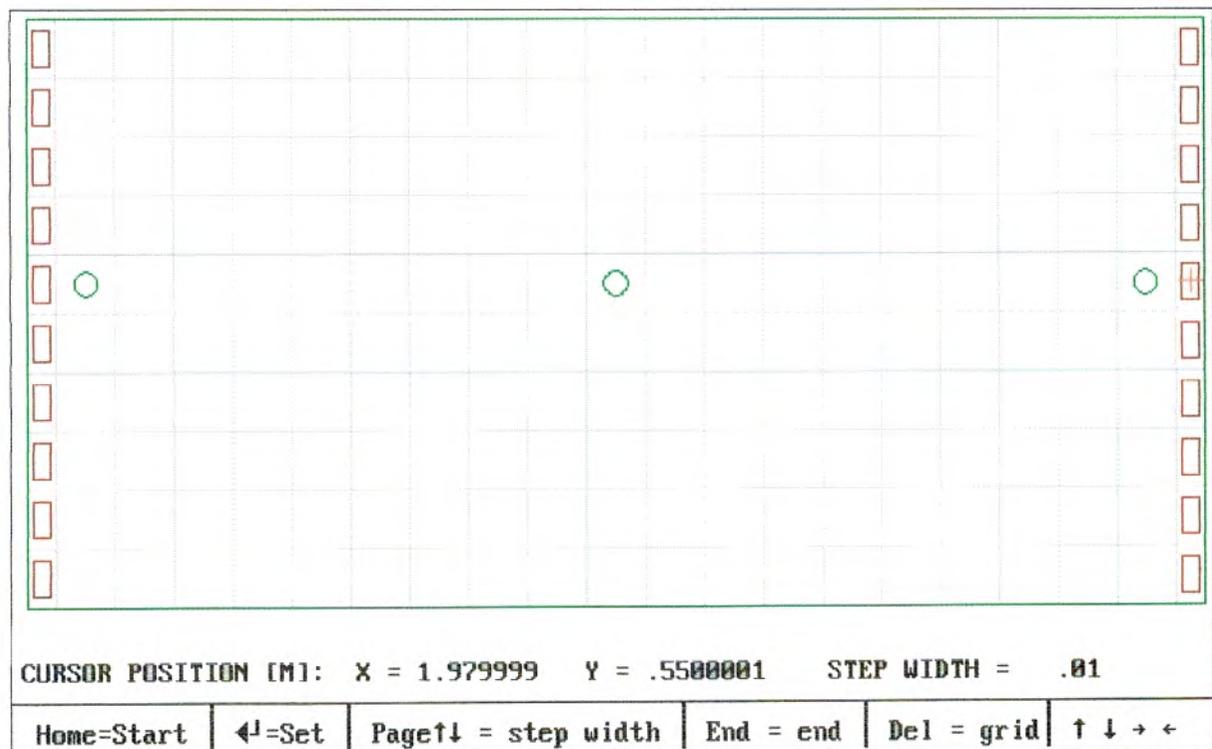


Fig. 48 : Position des points d'observation sur le domaine (Banc d'essai).

Pour nos essais de simulation de transport de polluant, deux types d'écoulements sont utilisés : l'écoulement naturel et l'écoulement radial convergent ; ce dernier a été réalisé sous les conditions suivantes :

A partir du modèle hydrodynamique considéré comme état de référence, on a changé les conditions aux limites et les débits imposés.

- Régime transitoire : Alimentation en amont avec un débit de $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ et en aval avec un débit de $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$;
- Pompage au puits B avec un débit de $4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

Le modèle a donné la carte piézométrique représentée sur la figure suivante (Fig. 49)

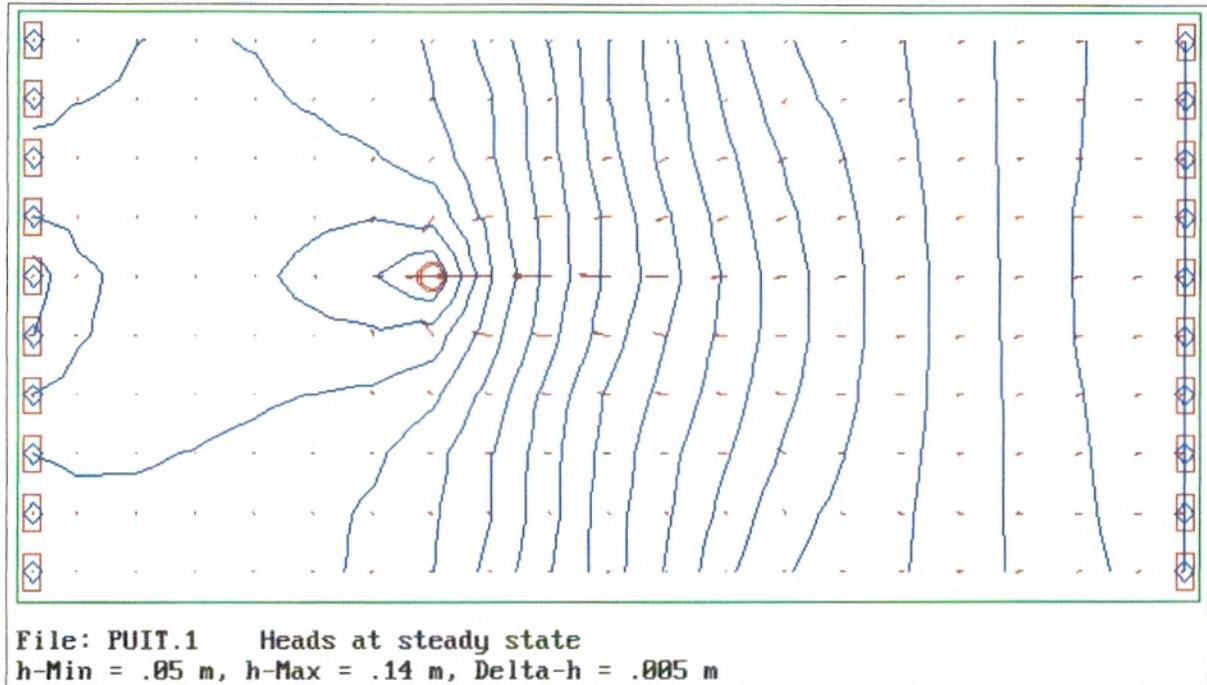


Fig. 49 : Carte piézométrique avec pompage au puits B.

III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1 Cartes des transferts des substances chimiques en milieu homogène

L'utilisation du module de suivi des particules ASMPATH sur le programme ASM, offre plusieurs méthodes d'interpolation des vitesses et utilise l'intégration d'Euler pour calculer les lignes de courant et les temps de transit.

ASMPATH calcule et affiche simultanément les lignes de courant et des marques de temps de transit sur des graphiques qui comprennent les isopièzes, et les isovaleurs des rabattements.

Le suivi des particules en régime permanent et en régime transitoire avec pompage ; sur modèles hydrodynamiques a donné les cartes ou les graphiques suivant (Fig. 50 et 51) :

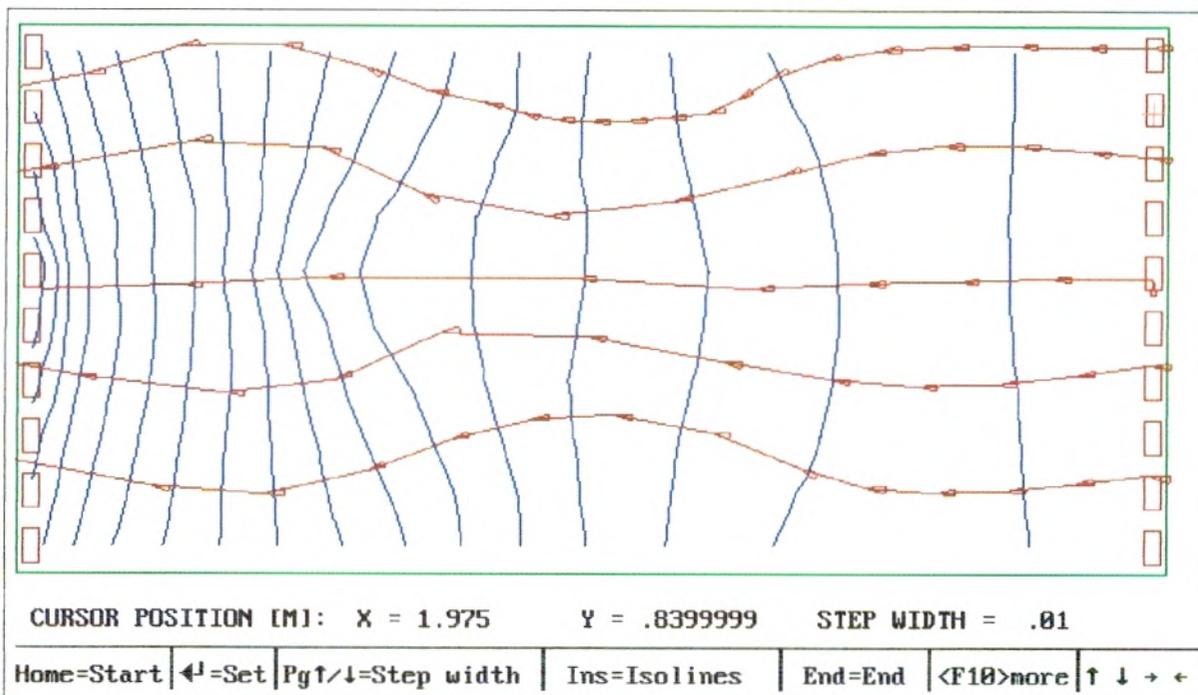


Fig. 50 : Carte de transport du traceur en écoulement naturel donnée par module ASMPHATH.

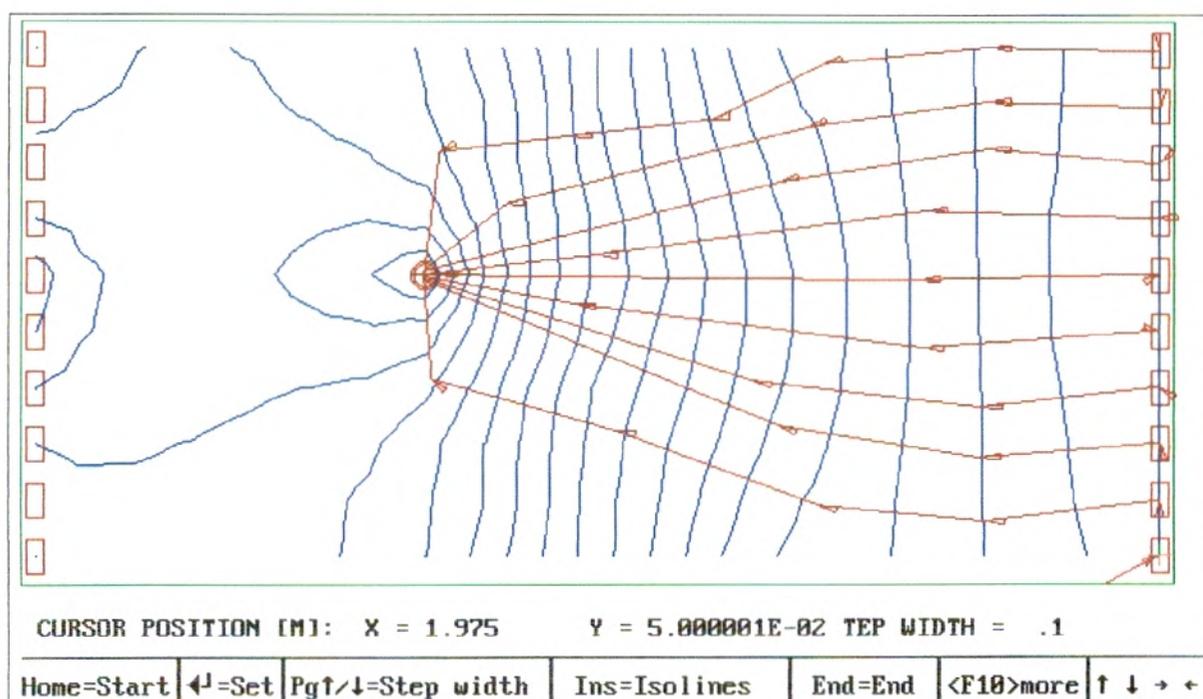


Fig. 51: Carte de transport du traceur en écoulement provoqué donnée par module ASMPHATH.

De ces deux graphiques, on constate qu'en régime permanent (écoulement naturel), le transport des traceurs se fait suivant les lignes de courant, de la partie amont du banc d'essai (points d'injection) vers la partie aval (exutoire).

En régime transitoire avec pompage, le transfert de ces substances chimiques est effectué suivant les écoulements de la partie amont ou l'injection a eu lieu jusqu'au puits de récupération ou de pompage.

III.2 Evolution spatio-temporelle du traceur (NaCl) dans le milieu homogène

L'observation de l'évolution spatio-temporelle du traceur NaCl injecté dans le milieu homogène (sable), en écoulement naturel, a été réalisé par le modèle mathématique (ASM.5), en introduisant, les mêmes conditions expérimentales réalisées au laboratoire (Conditions aux limites, Ecoulement naturel, Régime permanent, Concentration initial du traceur) ainsi que les paramètres hydrodispersifs de ce traceur (Dispersivité longitudinal, Coefficient de dispersion) trouvés dans les chapitres précédents, sur le modèle hydrodynamique calé.

Cette évolution est réalisée en interrompant la dispersion du traceur à des temps différents : 10 minutes, 25 minutes, 50 minutes, 75 minutes, 125 minutes après injection du traceur dans le banc. (Fig. 52, 53, 54, 55, 56).

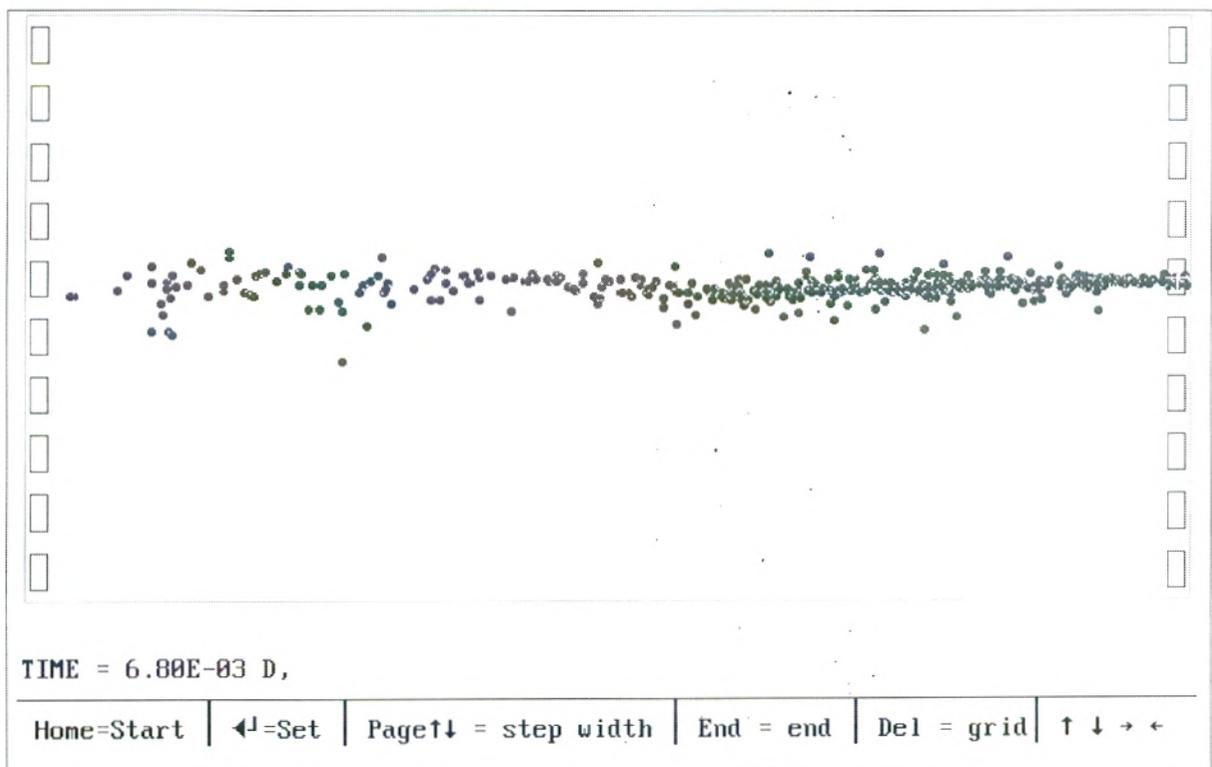


Fig. 52 : Evolution du traceur à 10 minutes de l'injection.

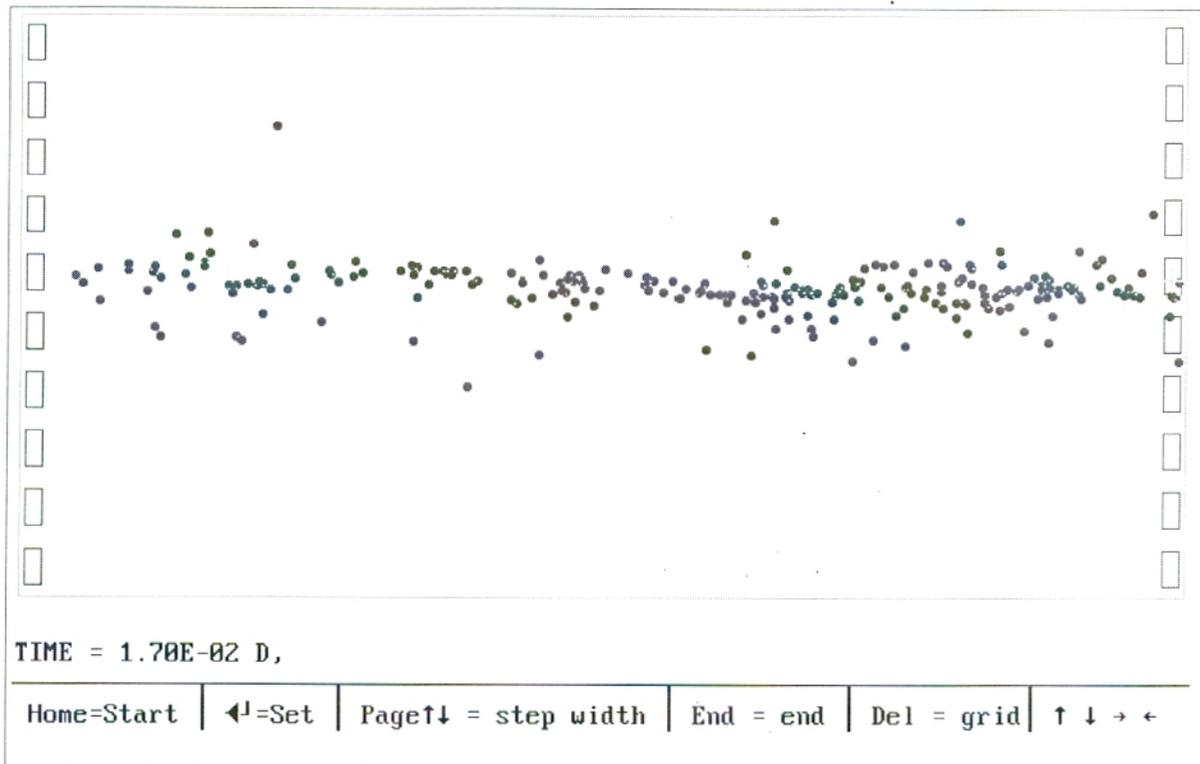


Fig. 53 : Evolution du traceur à 25 minutes de l'injection.

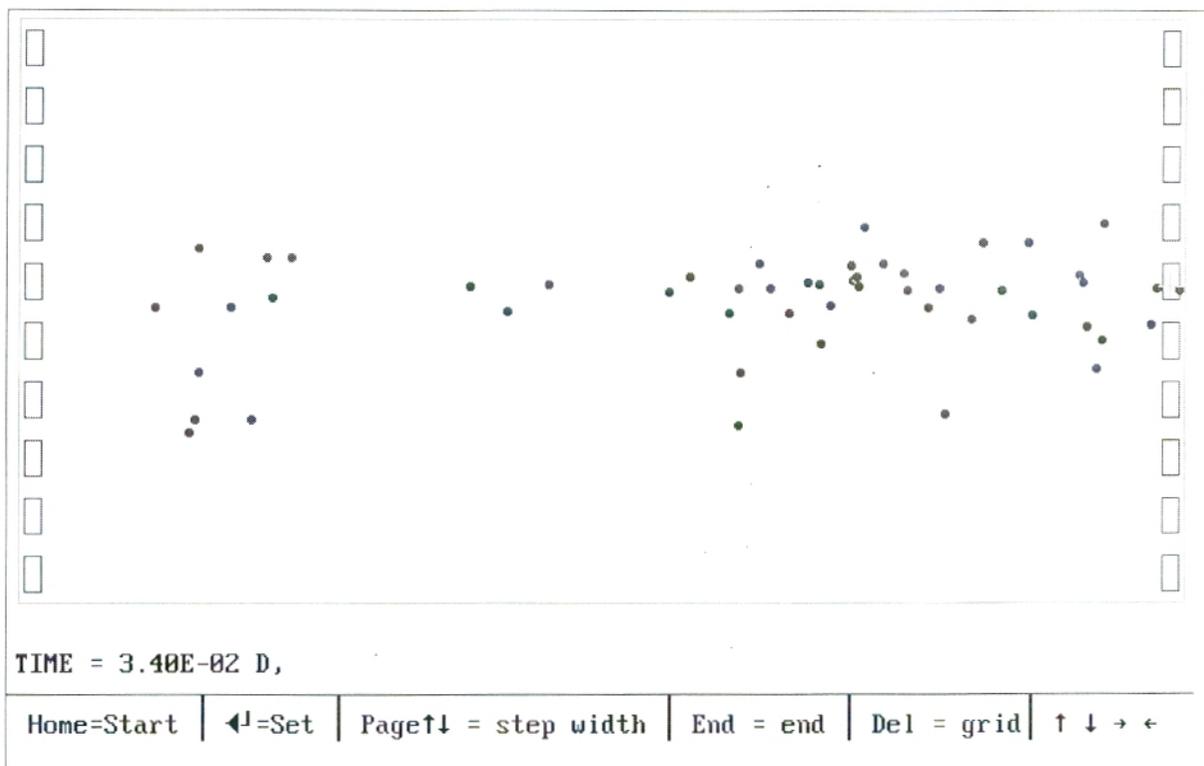


Fig. 54: Evolution du traceur à 50 minutes de l'injection.

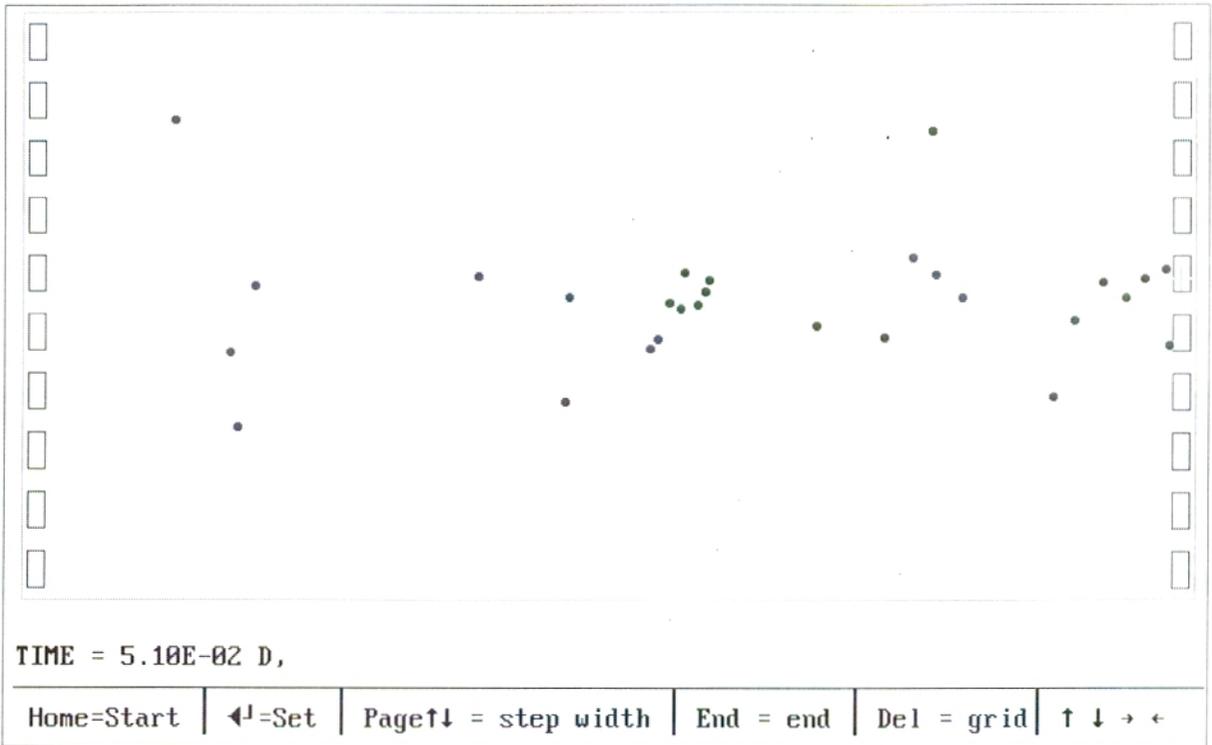


Fig. 55 : Evolution du traceur à 75 minutes de l'injection.



Fig. 56 : Evolution du traceur à 125 minutes de l'injection.

On constate :

- L'évolution spatio-temporelle du traceur sur cette formation, montre que la propagation du contaminant s'effectue par convection (suivant l'axe de drainage), ce qui confirme, l'interprétation des essais de traçage par la méthode statistique de Wang étudiée au chapitre V ;
- A 10 min de l'injection, le traceur est plus concentré en amont (point d'injection) et l'apparition des premières traces de NaCl à l'exutoire du banc d'essai ;
- A 25 min, la dispersion du traceur est plus au moins homogène sur tout le chemin préférentiel de la formation, indiquant une diminution de la concentration et une dilution du traceur.
- A 50 et 75 min, on observe une diminution de concentration et une dispersion du traceur sur un rayon plus large. Ces résultats sont en harmonie avec la courbe cumulative des concentrations restituées des chlorures de sodium injectés dans le milieu homogène (Fig.34), qui présente la stabilité du taux maximum de restitution entre 50 et 75 minutes après l'injection du traceur.
- A 125 min, on remarque qu'il n'on reste que des traces du contaminant qui peuvent facilement disparaître si l'on prolonge le temps de restitution.

III.3 Rayon d'influence du panache de pollution :

En positionnant les points d'observation aux mailles : [11,3] et [11,7] et à une distance de 20 cm par rapport au point d'observation du centre du banc, maille : [11,5], présentés dans la figure suivante.

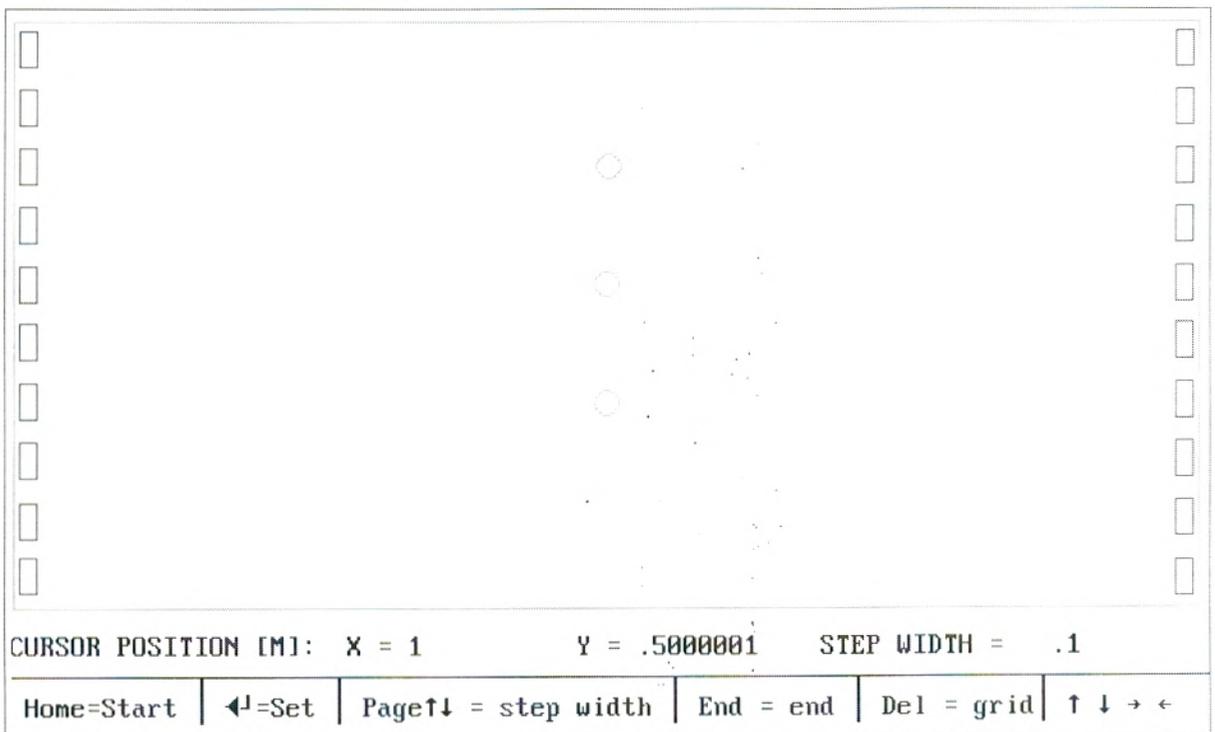


Fig. 57 : Position des points d'observation pour calcul de rayon d'influence.

Le modèle a donné les courbes de restitution de la figure 58,

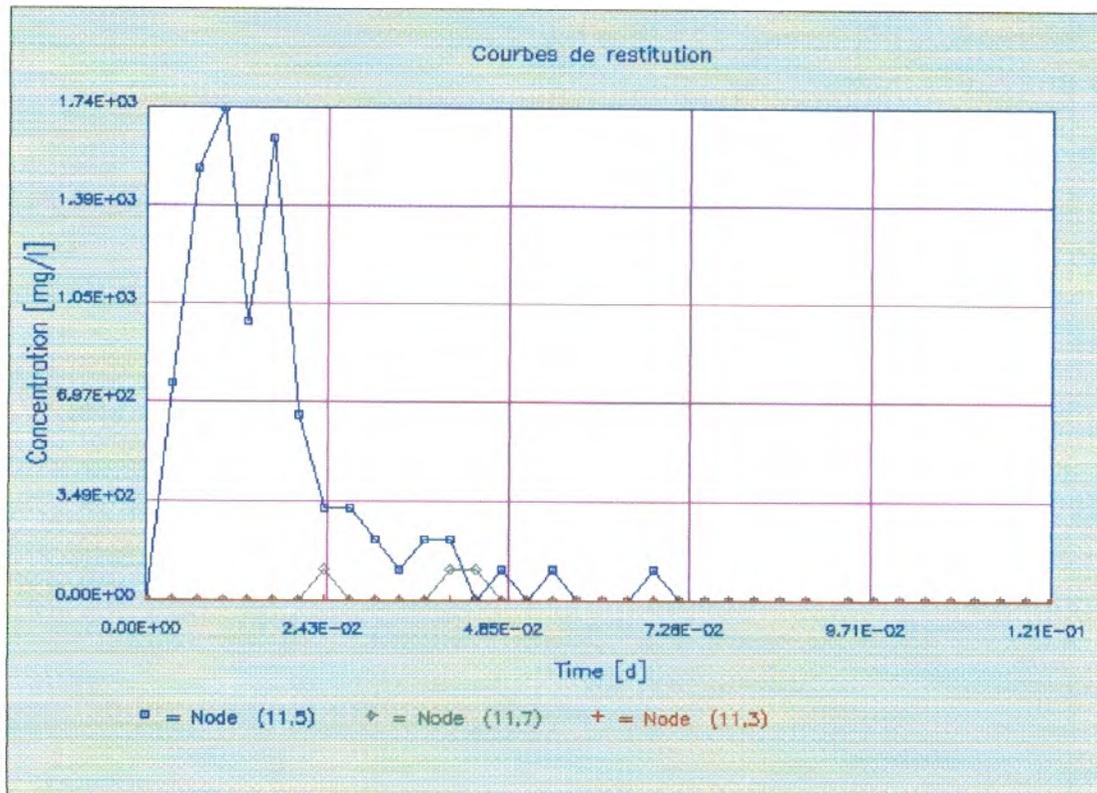


Fig. 58 : Courbes de restitution du traceur NaCl aux points d'observation [11,3], [11,5] et [11,7].

L'évolution de la concentration du NaCl est plus au moins régulière au point d'observation [11,5], cela s'explique par sa position se trouvant au centre de l'axe de drainage de l'écoulement, tandis que les deux autres points d'observation, montrent des évolutions de concentration quasiment nulles. De ces résultats, on déduit que le panache de pollution a un rayon d'influence d'environ 40 cm.

III.4 Interprétations des courbes de restitution données par le modèle ASM.5

III.4.1 Ecoulement naturel

Les courbes de restitutions (Fig. 59) des différents traceurs, en écoulement naturel, aux différents points d'observation, simulé sur modèle mathématique montrent une évolution régulière des concentrations en fonction du temps ; on remarque :

- Les concentrations maximums des traceurs où les plus importants pics sont observés au point [20,5] se trouvant à une distance très proche du point d'injection. La diminution respective des concentrations dans les deux autres points [11,5] et [2,5] s'explique par la dilution des traceurs en fonction de la distance.
- Les temps d'arrivée des traceurs sont plus courts aux [20,5] et [11,5] que ceux observés au point [2,5], cela s'explique par la différence de distance de ces points d'observation par rapport au point d'injection ;
- Le temps de restitution maximum est de 71 minutes pour le colorant textile, de 77 minutes pour NaCl et 107 minutes pour la rhodamine-B. La dispersion de la rhodamine-B est donc plus lente que celle du traceur NaCl et du polluant textile.

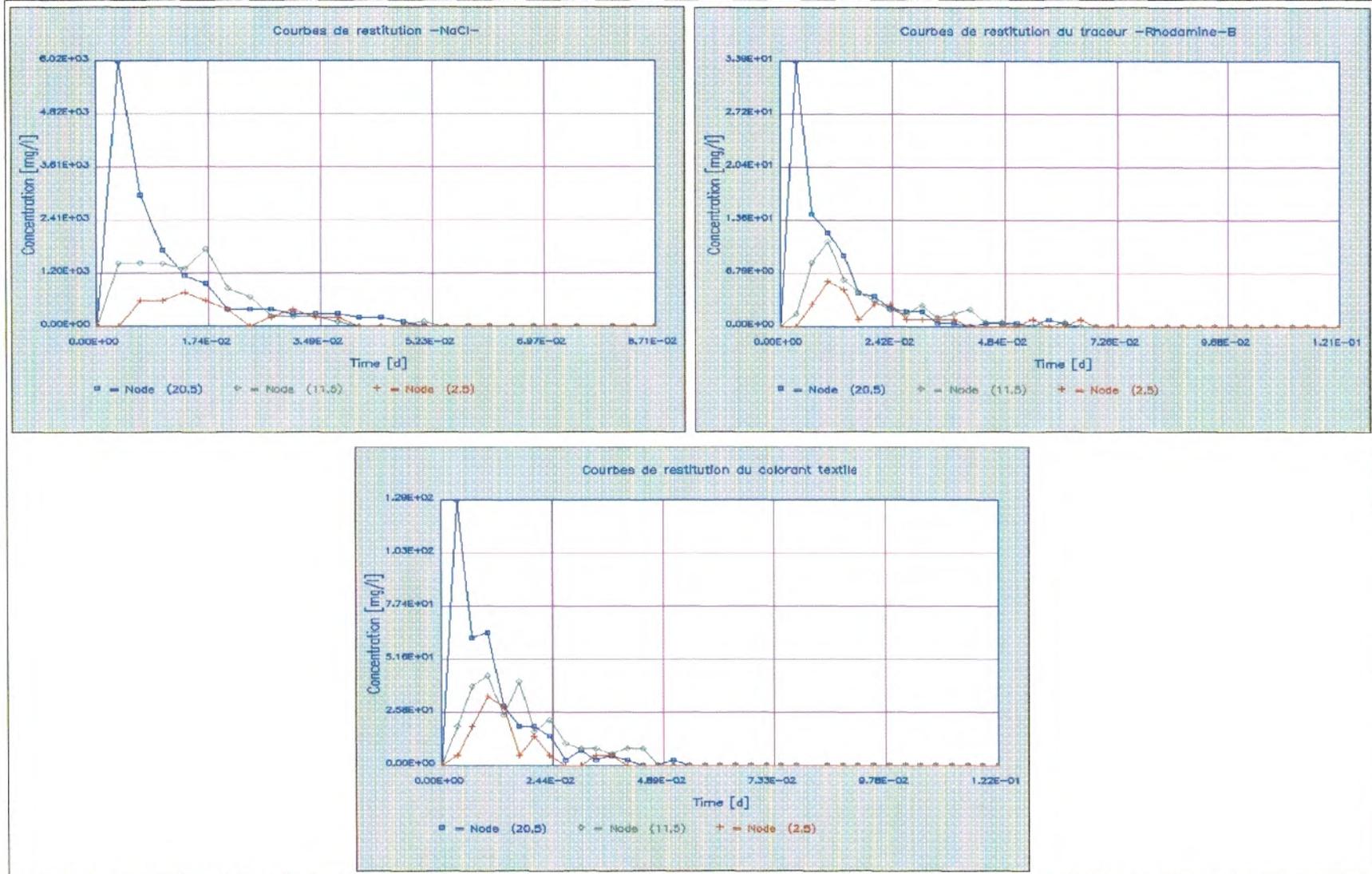


Fig. 59 : Courbes de restitution des traceurs (NaCl, Rhodamine- B et Colorant textile) dans les essais de traçage en écoulement naturel, données par le logiciel ASM. 5.

III.4.2 Ecoulement radial convergent

Les courbes de restitutions des différents traceurs en écoulement provoqué au puits B, simulé sur modèle sont présentées sur la figure 60 ; on remarque :

- Pour les **Chlorures de sodium**, la courbe de restitution obtenue au point d'observation [20, 5] montre une évolution régulière de concentration en fonction du temps, avec un maximum de $7,21 \cdot 10^4$ mg/l suivi d'une décroissance jusqu'à une restitution complète après 150 minutes d'injection. Au point d'observation [11, 5], la courbe de restitution est assez similaire à la courbe précédente, avec un maximum de $3,6 \cdot 10^4$ mg/l et une décroissance avec de légères fluctuations. La courbe de restitution obtenue au point [2, 5] est irrégulière représentée par des fluctuations de faibles amplitudes ;
- Les courbes de restitution du **colorant textile** obtenues aux points d'observation [20, 5] et [11, 5] montrent une évolution assez régulière, avec des pics respectifs de $5,77 \cdot 10^1$ mg/l et de $4,62 \cdot 10^1$ mg/l, suivis de décroissance ; tandis qu'au point [2, 5], la courbe de restitution présente une évolution irrégulière de la concentration avec d'importantes amplitudes ;
- Pour la **Rhodamine-B**, les points d'observation [20, 5] et [11, 5] ont donné pratiquement la même courbe de restitution, unimodale de $1,02 \cdot 10^1$ mg/l. Au point d'observation [10, 5], le pic de 6,06 mg/l est maintenu durant une courte durée accompagnée d'une décroissance de concentration assez régulière. La restitution au point d'observation [2, 5] est quasiment nulle.

L'apparition des chlorures de sodium et du colorant textile au niveau du point d'observation [2, 5] représentée par d'importantes fluctuations de concentration en fonction du temps sur les courbes de restitution, est interprétée par la rapidité de dispersion de ces deux traceurs sur de tel milieu, justifiée par leurs coefficients de dispersivité utilisés pour les calculs du modèle, qui sont nettement plus importants (α_l entre **0,4** et **0,5 m**) que celui de la rhodamine-B ($\alpha_l=0,15m$).

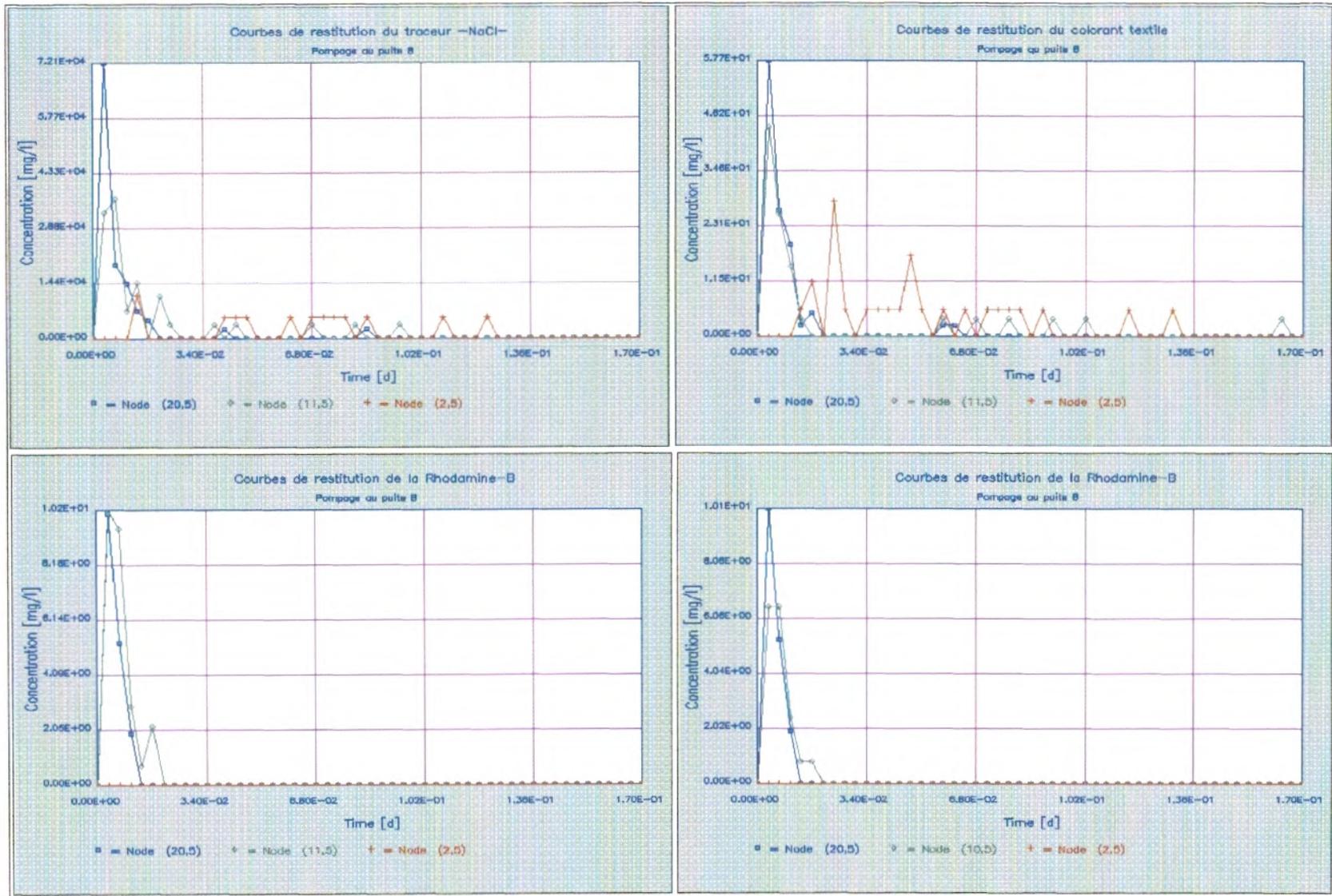


Fig. 60 : Courbes de restitutions des traceurs (NaCl, Rhodamine- B et Colorant textile) dans les essais de traçage en écoulement provoqué, données par le logiciel ASM. 5.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'utilisation du modèle physique d'un aquifère à perméabilité d'interstices, au laboratoire, permet de comprendre les phénomènes hydrodynamiques (Stockage et transmission des eaux souterraines) et les phénomènes hydrodispersifs c'est-à-dire la prévision de la migration des substances polluantes dans l'eau souterraine.

Dans le milieu homogène constitué de la formation sableuse (Sable de Terga), classée dans la catégorie granulométrique des gros sables et uniformes, la perméabilité est de $6,25 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Dans les cas des milieux hétérogènes, constitués d'une formation de même nature, les lentilles, insérées successivement, au milieu du bassin et constituées d'un mélange de sable grossier et de calcaire argileux à 15 et 30% ont des coefficients de perméabilité respectivement de $4,84 \cdot 10^{-3}$ et $1,21 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Les études hydrodynamiques établies pour les différents milieux étudiés montrent que :

- En régime permanent, l'écoulement des eaux se fait principalement selon l'axe de drainage, de l'amont vers l'aval, du bassin du banc d'essai. L'existence de la lentille dans des deux cas du milieu hétérogène entraîne un ralentissement des écoulements à son niveau.
- En régime transitoire, l'écoulement souterrain se fait des deux limites du bassin (amont et aval) vers le centre. Toutefois, les hauteurs piézométriques restent plus importantes en amont qu'en aval, le débit d'alimentation étant plus important en amont qu'en aval.
- La transmission ainsi que l'emmagasinement des eaux souterraines sont plus élevés dans le sable que dans les deux lentilles moins perméables.

Les différents essais de traçage réalisés sur le milieu homogène (formation sableuse), en écoulement naturel et convergent, montrent que la propagation des traceurs utilisés s'effectue principalement par convection, suivant le chemin préférentiel de l'écoulement ; les vitesses de transit étant très rapides.

Les taux de restitution des traceurs utilisés pour la réalisation des différents essais de traçage, montrent que le chlorure de sodium est un traceur conservatif dans les deux milieux étudiés et que la rhodamine-B et le colorant textile sont des traceurs à caractère sorptifs.

Les coefficients de dispersivité et de dispersion longitudinale sont plus importants pour le chlorure de sodium et le colorant textile que pour la rhodamine-B.

Dans le cas des essais de traçage en milieux hétérogènes, le ralentissement des écoulements aux niveaux des lentilles entraîne une "reconcentration" des traceurs utilisés.

De part cette étude des comportements de ces trois traceurs en hydrogéologie sur banc d'essai au laboratoire, nous considérons que le chlorure de sodium est le traceur le mieux adapté pour les essais de traçage en milieu poreux.

Les méthodes des essais de traçage permettent une connaissance des différents comportements des traceurs dans le milieu souterrain. Pour compléter cette approche, la

modélisation mathématique du transfert des substances chimiques par l'utilisation du modèle numérique a été envisagée.

Les résultats du modèle hydrodynamique sont très satisfaisants puisque les charges piézométriques calculées par le logiciel ASM.5 sont similaires aux charges mesurées sur banc d'essai.

La validation de ce modèle hydrodynamique, offre des possibilités d'exploration, en réalisant des simulations de transfert des contaminants dans de tel milieu.

Les différents essais de simulation de transport des polluants en milieu homogène (formation sableuse), montrent que :

- la propagation des contaminants s'effectue principalement par convection (suivant l'axe de drainage), avec un panache de pollution de 40 cm de rayon d'influence ; confirmant l'interprétation des essais de traçage réalisés sur les différents milieux du banc d'essai, par la méthode statistique de Wang.
- Dans le cas d'écoulement naturel sur milieu homogène, les courbes de restitution données par modèle hydrodispersif, montrent des évolutions régulières de concentration en fonction du temps et de la distance. La dispersion du colorant textile est la plus élevée, suivie de celle des chlorures de sodium, alors que la rhodamine-B présente des propriétés de dispersion beaucoup plus lente ;
- Dans le cas de l'écoulement provoqué, les courbes de restitution traduisent des évolutions irrégulières. L'apparition des traceurs (Chlorures de sodium et Colorant textile) après le puits de pompage, ne peut être expliqué que par la rapidité de dispersion de ces deux traceurs, justifiée par leurs coefficients de dispersivité utilisés pour les calculs du modèle, qui sont important (entre 0,4 et 0,5) par rapport à celui de la rhodamine-B (0,15).

A la lumière des résultats obtenus, il apparaît clairement que pour l'étude du comportement des polluants chimiques en hydrogéologie, il convient d'appliquer ces méthodes à des cas réels de terrain. Bien que les caractéristiques réelles du terrain ne sont pas aussi simples que celles d'un modèle réduit au laboratoire, toutefois une analogie est possible. Aussi le traitement d'un certain nombre de problèmes liés à la pollution des nappes et à la dépollution peuvent être pris en charge par modèle physique. Le gain de temps, de moyens humains et financiers serait conséquent.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEAR J. 1972.** Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier, New York, p. 764.
- BESSEDIK M. 1995.** Essai de modélisation d'une nappe, application à la nappe d'Hennaya et sur banc d'essai. Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 65 p.
- BROUYERE S. 2001.** Etude et modélisation du transport et du piégeage des solutés en milieu souterrain variablement saturé. Evaluation des paramètres hydrodispersifs par la réalisation et l'interprétation d'essais de traçage in situ. Th. Doc. Sci. Appliquée. Univ. Liège, 640 p.
- CASTANY G. 1982.** Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Ed. Dunod Paris, 235 p.
- CRAMPON N. 1977.** Quelques possibilités règlementaires et techniques d'amélioration de la protection des eaux souterraines captées. Colloque "protection des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaine", B.R.G.M. Orléans 1, 2 mars. 1977, p. 105-116.
- CRAMPON N, DEMASSIEUX L, SALADO J. 1978.** La protection des eaux souterraines contre les pollutions accidentelles dans le cadre de la préparation technique des périmètres règlementaires. Rapport 6, Société hydrotechnique de France, XV Journées de l'hydraulique, Toulouse 5, 6, 7 sept. 1978, 6 p.
- CRAMPON N. 1983.** Abaques de détermination rapide des caractéristiques hydrodispersives lors de traçage par injection brève. Hydrogéologie, géologie de l'ingénieur, 4, p. 287-292.
- CRAMPON N. 1987.** Détermination approchée des caractéristiques hydrodispersives en traçage par injection brève. Méthode des trois points. Ann. Soc. Géol. Nord. Cv, p. 234-248.
- DUCLUZAUX B. 1999.** Mesure en continu et in situ des traceurs pour les traçages artificiels et naturels. Interprétation des courbes de restitution perturbées par des précipitations. Actes 9^{ème} Rencontre d'Octobre, Paris.
- DUCLUZAUX B. 2001.** Mesures en continu et in situ des traceurs par des capteurs chimiques. Application à l'ion iodure. 7th Conférence on Limestone Hydrology and Fissured Media, Besançon, France 20, 22 Sept. 2001. Sciences et techniques de l'environnement, Besançon, France, p.129-132.
- FRIED J.J, COUMBARNOUS M.A. 1971.** Dispersion in porous media. Advances in hydrosciences. Ed. Van to Chow, p. 167-282.
- GARNIER J.M, CRAMPON N., PREAUX C., POREL G. et VREULX M. 1985.** Traçage par C^{13} , H^2 , Γ et Uranine dans la nappe de la craie sénonnaise en écoulement radial convergent (Béthune, France). hydrology Journ. 78. Elsevier, p. 379-392.
- HANICH L. 1991.** Les traçages d'essai en aquifère hétérogène : méthodes, intérêts et limites. Th. Doc. Univ. Sci. Lille, Flandres- Artrois, 165 p.
- Instruction manual. 1999.** Essais de reconnaissance des sols : Tome 1. Comité français de mécanique de sols et des formations (CFMS).
- Instruction manual. 1983.** Hydrology system. Armfield. Technical. Ed. Co. Ltd. Issue 2a, 31p.
- Instruction manuel. 1988.** Field drain filters test apparatus fel Issue 2a.

- JOERIN C. 2000.** Etude des processus hydrologiques par l'application du traçage d'essai environnemental. Association a des mesures effectuées à l'échelle locale et analyse d'incertitude. Th. Doc. Sci. Technique, Lausanne, 220 p.
- LASSABATERE L. 2002.** Modification du transfert de trois métaux lourds (Zn, Pb, Cd) dans un sol issu d'un depot fluvio – glaciaire carbonate par l'introduction géotextile. Th. Doc. Inst. Sci. Appliquée, Lyon, 225 p.
- LEDOUX E. 2003.** Modèles mathématiques en hydrogéologie. Documents LHM-RD – 86/12. Centre d'Informatique Géologique Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 133p.
- LEMIERE B., SEGUIN J. J., LE GUERN C., GUYONNET D., BARANGERB PH. 2001.** 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. Documents du BRGM.300. Ed. BRGM, France, 126 p.
- MANIA J. 2001.** Théorie et modélisation du transport de masse pour une application au transport de contaminants, Cours, DEA génie civil, Ecole Doc. Génie civil, Lille, 98 p.
- MANIA J. 2001.** Application of numerical methods in the modeling of groundwaters. Conference. Polytecnic school of engineers of Lille (EUDIL). Department of geotechnics and civil engineering University of technologies and sciences of Lille – France.
- MATHERON G., DE MARSILY G. 1980.** Is transfert in porous media always diffusive? A counterexample. Water Resour. Res. Vol. 16, n°5, p.901-907.
- PANG L., CLOSE M., GREENFIELD H. et STANTON G. 2004.** Adsorption and transport of Cadmium and Rhodamine –WT in pumice sand columns. Journ. Marine and Freshwater Research, Vol. 38: p. 367–378. Ed, Royal Society of New Zealand
- PATRIARCHE D. 2001.** Caractérisation et modélisation des traceurs naturels dans les argilites de Tournemire. Th. Doc. Ecole des mines, Paris, 260 p.
- PREAUX C., CARLIER E. et CRAMPON N. 1983.** Détermination des paramètres hydrodispersifs par calages successifs de la courbe de restitution à l'aide d'abaques. Hydrogéologie, Géologie de l'ingénieur 4, p.331- 336.
- RODIER J. 1997.** L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Ed. Dunod, Paris, 1383 p.
- SAUTY J.P. 1977.** Contribution à l'identification des paramètres de dispersion dans les aquifères par interprétation des expériences de traçage .Th. Doc. Ing. Univ. Grenoble, 157 p.
- TRAVI Y., LAVABRE J., BLAVOUX B. 1994.** Traçage chimique et isotopique (Cl⁻, O¹⁸) d'une crue d'automne sur un petit bassin versant Méditerranéen incendié. Journ. Sci. Hydrol. 39, p.605 - 619.
- WANG H.Q. 1987.** Modélisation des transferts de masse en milieu saturé à double porosité. Application aux écoulements convergents en craie fissurée semi –confinée et multicouches. Th. Doc. Univ. Paris XI, Orsay, 273p.

LISTES DES TABLEAUX ET FIGURES

LISTE DES FIGURES

	Page
Fig. 01 : Courbe granulométrique cumulative.	8
Fig. 02: Test de traçage sur un puits unique à piézomètres d'observation multiples. (I) : l'injection du traceur dans le puits ;(II) : pompage dans le même puits.	18
Fig. 03: Test de traçage avec deux puits (le doublet).	19
Fig. 04: Courbe de restitution (évolution de la concentration en fonction du temps à distance fixe).	20
Fig. 05 : Courbe cumulative de la concentration en fonction du temps pour une distance fixe.	20
Fig. 06 : Représentation graphique de la fonction de répartition de la loi de Gauss. Avec m : moyenne, σ : écart type.	22
Fig. 07 : Détermination de la dispersivité par la méthode graphique linéaire de Wang pour traçage d'essai.	25
Fig. 08 : Représentation du banc d'essai hydrologique.	28
Fig. 09 : Localisation des puits et des piézomètres.	29
Fig. 10 : Carte piézométrique du bassin à nappe libre en régime permanent avec un débit d'alimentation et de décharge égale à 0,05 l/s.	33
Fig. 11 : Profil piézométrique du bassin à nappe libre en régime permanent avec un débit d'alimentation et de décharge égale à 0,05 l/s.	33
Fig. 12 : Carte piézométrique du bassin à nappe libre en régime transitoire avec un débit d'alimentation égale à 0,05 l/s.	34
Fig. 13 : Profil piézométrique du bassin à nappe libre en régime transitoire avec un débit d'alimentation égale à 0,05 l/s.	34
Fig. 14 : Carte piézométrique du milieu hétérogène (Cas de lentille à 15% de calcaire argileux) à nappe libre.	35
Fig. 15 : Profil piézométrique du milieu hétérogène (Cas de lentille à 15% de calcaire argileux) à nappe libre.	36
Fig. 16: Carte piézométrique du milieu hétérogène (Cas de lentille à 30% de calcaire argileux) à nappe libre.	36
Fig. 17 : Profil piézométrique du milieu hétérogène (Cas de lentille à 30% de calcaire argileux) à nappe libre.	37
Fig. 18 : Carte piézométrique du milieu hétérogène (Cas de lentille à 30% de calcaire argileux) à nappe libre, en régime transitoire.	37
Fig. 19 : Profil piézométrique du milieu hétérogène (Cas de lentille à 30% de calcaire	38

argileux) à nappe libre.

Fig.20 : Localisation des puits de pompage et des piézomètres qui les entourent.	41
Fig. 21 : Courbes représentatives des rabattements (cm) / temps de pompage (s) aux piézomètres P ₉ , P ₁₂ , P ₁₃ , P ₁₆ .	41
Fig. 22 : Droites représentatives de la descente aux piézomètres P ₉ , P ₁₂ , P ₁₃ et P ₁₆ .	42
Fig. 23 : Courbes représentatives des rabattements (cm) / temps de pompage (s) aux piézomètres P ₄ , P ₅ .	42
Fig. 24 : Droites représentatives de la descente aux piézomètres P ₄ , P ₅ .	43
Fig. 25 : courbes représentatives des rabattements (cm)/ temps de pompage (s) aux piézomètres P ₄ , P ₅ , P ₇ , P ₉ , P ₁₂ , P ₁₃ , P ₁₆ .	44
Fig. 26 : Droites représentatives de la descente aux piézomètres P ₄ , P ₅ , P ₇ , P ₉ , P ₁₂ , P ₁₃ , P ₁₆ .	44
Fig. 27 : Courbes représentatives des rabattements (cm)/ temps de pompage (s) aux piézomètres P ₄ , P ₅ , P ₉ , P ₁₂ , P ₁₃ , P ₁₆ .	45
Fig. 28 : Droites représentatives de la descente aux piézomètres P ₄ , P ₅ , P ₉ , P ₁₂ , P ₁₃ , P ₁₆ .	46
Fig. 29 : Histogrammes représentatifs des paramètres hydrodynamiques sur les différents milieux étudiés.	47
Fig.30 : Réalisation des essais de traçage sur le bassin du banc d'essai hydrologique.	48
Fig. 31 : Courbes de restitution des traceurs injectés en amont du bassin.	50
Fig. 32 : Courbes de restitution des traceurs injectés, en écoulement provoqué (Pompage au puits A)	53
Fig. 33 : Courbes de restitution des traceurs injectés, en écoulement provoqué (Pompage au puits B).	54
Fig. 34 : Courbes cumulatives des concentrations restituées des traceurs injectés en milieu homogène.	55
Fig. 35 : Courbes cumulatives des concentrations restituées des traceurs injectés en milieu homogène.	55
Fig. 36 : Courbes de restitution en écoulement provoqué (pompage au puits B). a- Courbe de restitution de NaCl injecté ; b- Courbe de restitution de la conductivité mesurée.	58
Fig. 37 : Courbe de restitution de la Rhodamine –B en écoulement provoqué (Pompage au puits B).	58
Fig. 38 : Courbe de restitution de NaCl injecté dans le cas d'un écoulement provoqué (Pompage au puits B).	59
Fig. 39 : Courbe de restitution de la Rhodamine –B injectée en écoulement provoqué (Pompage au puits B).	59
Fig. 40 : Courbes cumulatives des concentrations restituées des traceurs injectés au 1 ^{er}	60

cas du milieu hétérogène.

Fig. 41: Courbes cumulatives des concentrations restituées des traceurs injectés au 2^{ème} cas du milieu hétérogène.	61
Fig. 42 : Détermination de la dispersivité par la méthode de Wang pour le traçage dans le milieu homogène (Sables de Targa).	63
Fig. 43: Détermination de la dispersivité par la méthode de « Wang » pour le traçage dans le milieu hétérogène en écoulement provoqué (pompage au puits B).	65
Fig. 44 : Discrétisation du domaine et position des puits de pompage.	68
Fig. 45 : Carte piézométrique après calage.	69
Fig. 46 : Carte de la perméabilité adoptées pour calage.	69
Fig. 47: Bilan des flux de matière en différences finies dans la maille i.	70
Fig. 48 : Position des points d'observation sur le domaine (Banc d'essai).	72
Fig. 49 : Carte piézométrique avec pompage au puits B.	73
Fig. 50 : Carte de transport du traceur en écoulement naturel donnée par module ASMPHATH.	74
Fig. 51: Carte de transport du traceur en écoulement provoqué donnée par module ASMPHATH.	74
Fig. 52 : Evolution du traceur à 10 minutes de l'injection.	75
Fig. 53 : Evolution du traceur à 25 minutes de l'injection.	76
Fig. 54: Evolution du traceur à 50 minutes de l'injection.	76
Fig. 55: Evolution du traceur à 75 minutes de l'injection.	77
Fig. 56: Evolution du traceur à 125 minutes de l'injection.	77
Fig. 57 : Position des points d'observation pour calcul de rayon d'influence.	78
Fig. 58 : Courbes de restitution du traceur NaCl aux points d'observation [11,3], [11,5] et [11,7].	79
Fig. 59 : Courbes de restitutions des traceurs (NaCl, Rhodamine– B et Colorant textile) dans les essais de traçage en écoulement naturel, données par le logiciel ASM. 5.	80
Fig. 60 : Courbes de restitutions des traceurs (NaCl, Rhodamine– B et Colorant textile) dans les essais de traçage en écoulement provoqué, données par le logiciel ASM. 5.	82

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 01 : Temps caractéristiques d'un transfert radial convergent.	26
Tableau 02 : Temps caractéristiques d'un transfert naturel monodimensionnel.	27
Tableau 03: Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie.	32
Tableau 04 : Valeurs des coefficients de perméabilité et d'uniformité des trois formations analysées, en fonction de leurs diamètres efficaces d_{10} , d_{60}	38
Tableau 05 : Valeurs des coefficients de perméabilité des trois formations calculées à partir du perméamètre	39
Tableau 06: Valeurs des coefficients de perméabilité calculés à partir de différents débits sur le milieu homogène (formation sableuse)	40
Tableau 07: Valeurs de transmissivité et du coefficient d'emménagement des piézomètres P_9 , P_{12} , P_{13} , P_{16}	42
Tableau 08: Valeurs de transmissivité et du coefficient d'emménagement des piézomètres P_4 , P_5 .	43
Tableau 09: Valeurs de transmissivité et du coefficient d'emménagement des piézomètres P_4 , P_5 , P_7 , P_9 , P_{12} , P_{13} , P_{16} .	45
Tableau 10: Valeurs de transmissivité et du coefficient d'emménagement des piézomètres P_4 , P_5 , P_9 , P_{12} , P_{13} , P_{16} .	46
Tableau 11: Paramètres hydrodynamiques des milieux étudiés	47
Tableau 12: Valeurs des concentrations des traceurs injectés	49
Tableau 13: Temps caractéristique en écoulement monodimensionnel lors de l'injection instantanée des traceurs utilisés.	50
Tableau 14 : Conditions des différents essais de traçage réalisés au puits « A »	51
Tableau 15 : Conditions des différents essais de traçage réalisés au puits « B »	52
Tableau 16 : Temps caractéristique en écoulement radial convergent lors de l'injection instantanée des trois traceurs (d'après Wang, 1987).	53
Tableau 17 : Temps caractéristique en écoulement radial convergent lors de l'injection instantanée des trois traceurs	54
Tableau 18 : Conditions des différents essais de traçage réalisés au puits « B » pour les deux cas du milieu hétérogène	57
Tableau 19 : Temps caractéristique en écoulement radial convergent lors de l'injection instantanée des traceurs en milieu hétérogène avec lentille à 15 % de calcaire argileux	58

Tableau 20 : Temps caractéristique en écoulement radial convergent lors de l'injection instantanée des traceurs en milieu hétérogène avec lentille à 30 % de calcaire argileux	60
Tableau 21 : Paramètres hydrodispersifs du milieu homogène, en écoulement monodimensionnel	62
Tableau 22 : Paramètres hydrodispersifs du milieu homogène, en écoulement radial convergent (pompage puits A)	64
Tableau 23 : Paramètres hydrodispersifs du milieu homogène, en écoulement radial convergent (pompage puits B)	64
Tableau 24 : Paramètres hydrodispersives du 1^{er} cas du milieu hétérogène, en écoulement radial convergent (pompage puits B)	66
Tableau 25 : Les paramètres hydrodispersives du 2^{ème} cas du milieu hétérogène, en écoulement radial convergent (pompage puits B)	66

PLANCHES

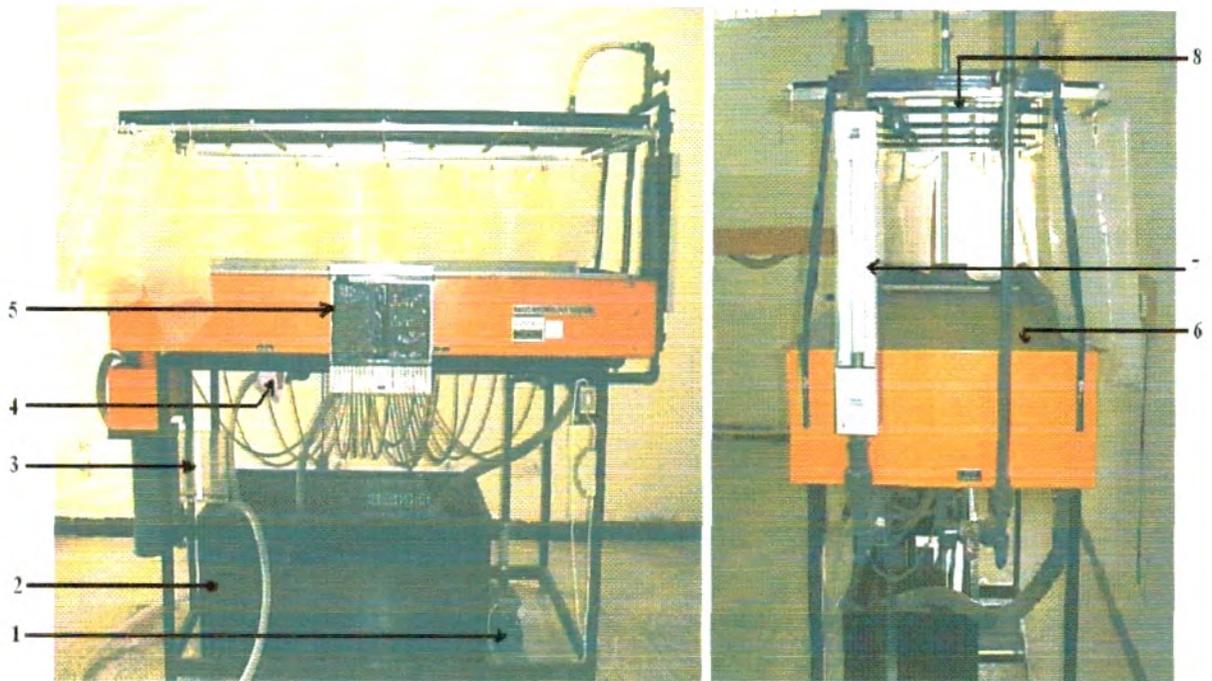


Planche 1 : Banc d'essai hydrologique (vue de face et de profil)

1 : Pompe, 2 : réservoir, 3 : mesure de débit de sortie, 4 : Vannes des puits de pompage, 5 : piézomètres manométriques, 6 : bassin du banc d'essai, 7 : régulateur de débit. 8 : alimentation pluviométrique simulée.

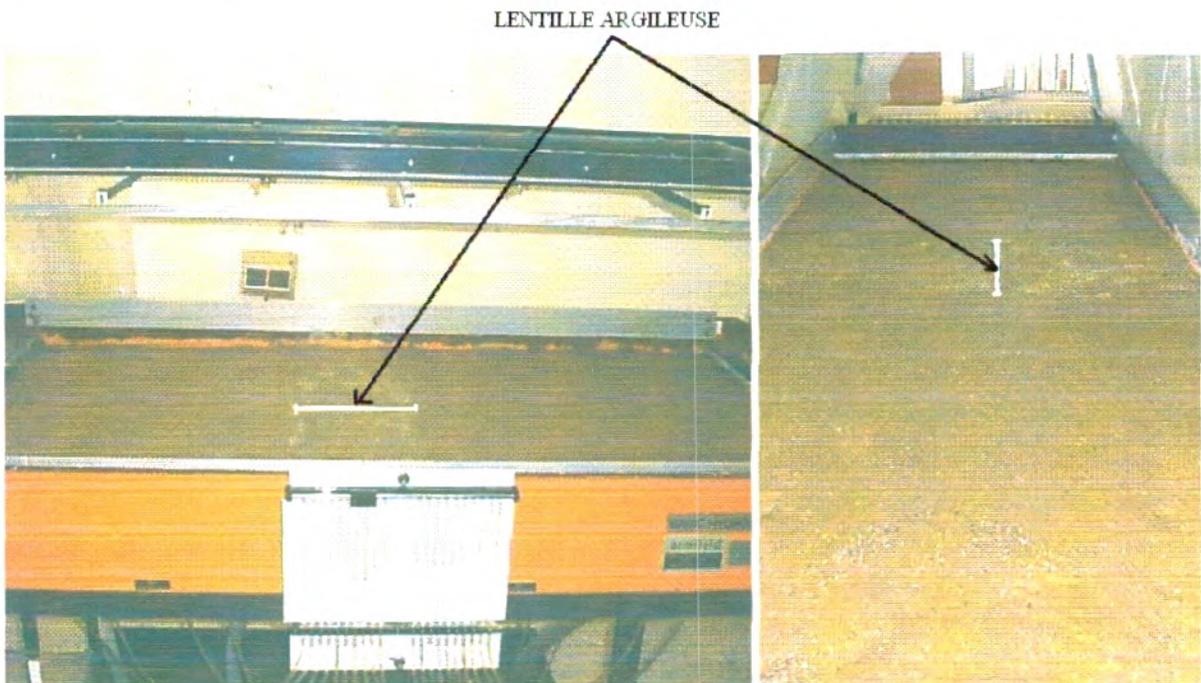


Planche 2 : Formation sableuse à lentille (vue de face et de profil).

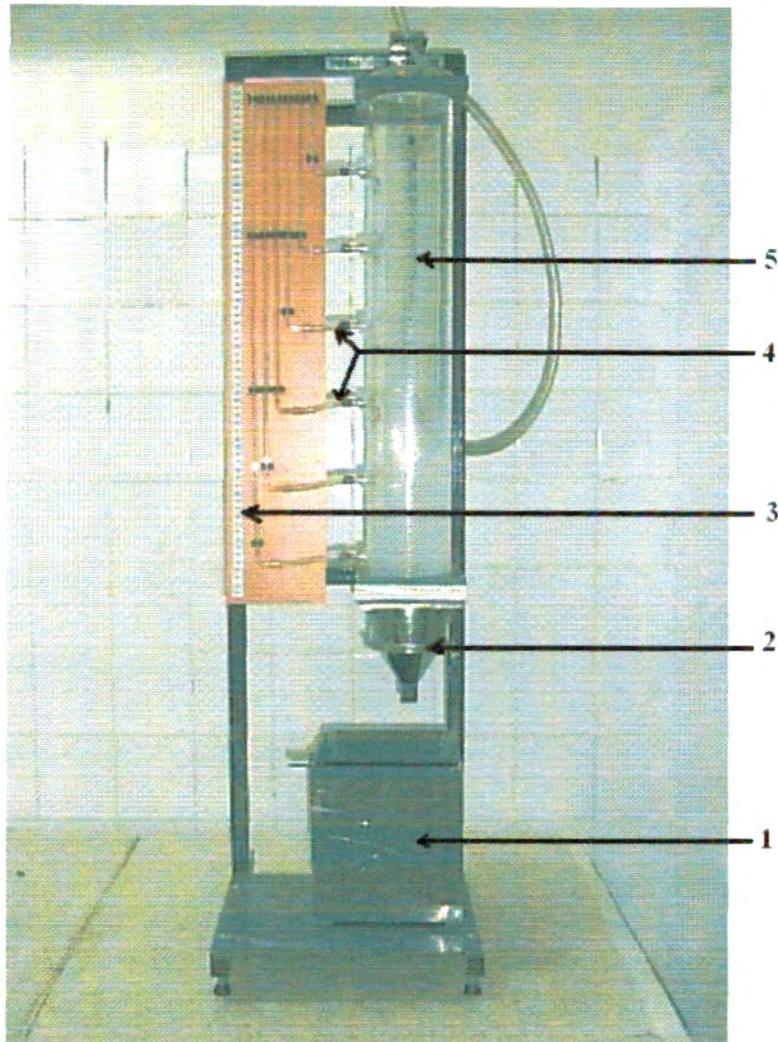
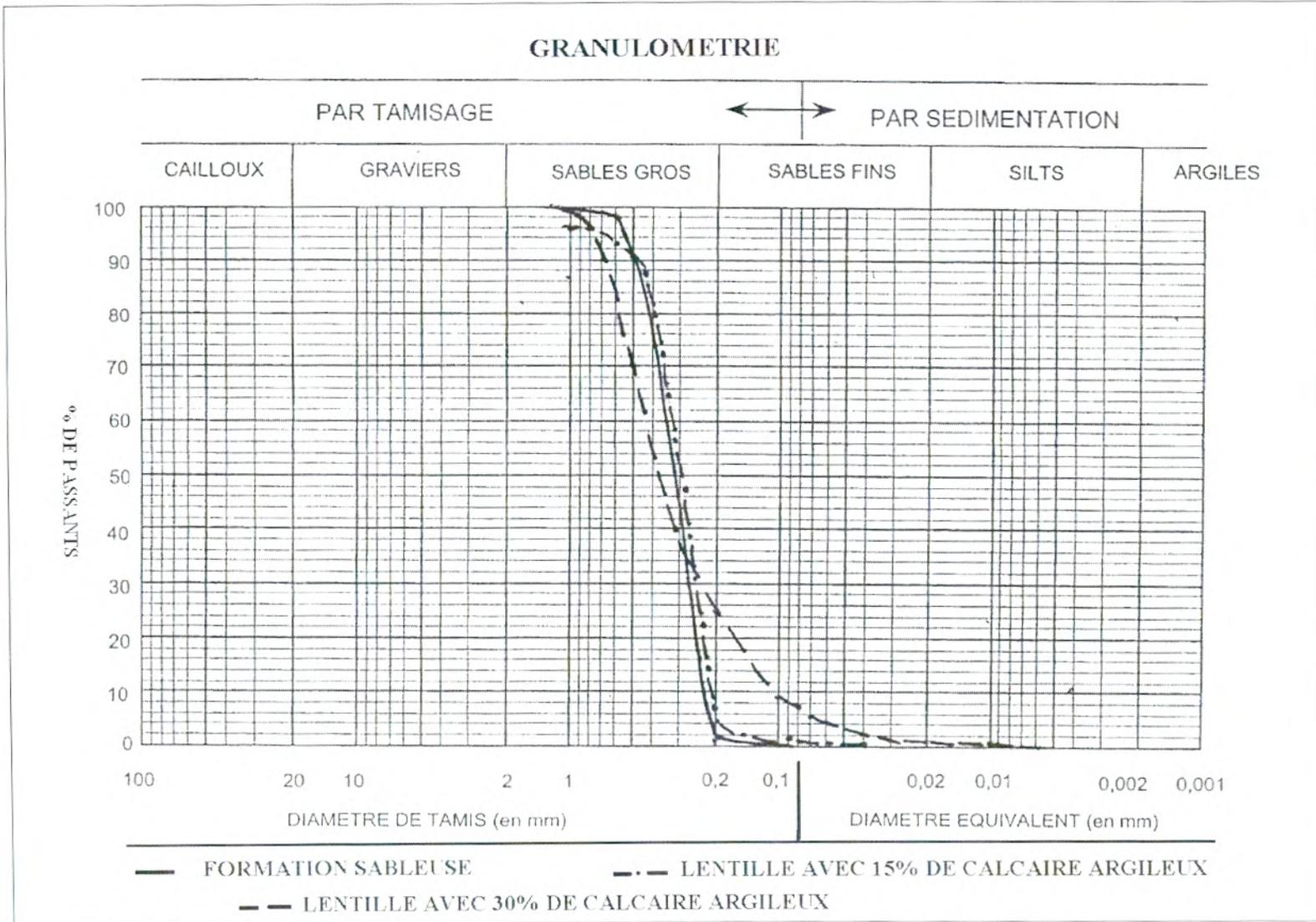


Planche 3 : Perméamètre.

1 : bassin de récupération d'eau, 2 : entonnoir, 3 : gradué, 4 : tubes piézométriques.
5 : éprouvette graduée.

ANNEXES



Courbes granulométriques

Annexe I.b : Etude piézométrique

Niveaux piézométriques de différents milieux sur banc d'essai hydrologique

Piézomètres	Milieu homogène (Sable)		Milieu hétérogène à lentille de 15% de calcaire argileux	Milieu hétérogène à lentille de 30% de calcaire argileux	
	Régime permanent	Régime transitoire	Régime permanent	Régime permanent	Régime transitoire
1	4,8	12,8	4,4	3,8	11,2
2	8,8	13,4	4,9	4	11
3	10,6	13	5,5	4,8	11
4	11,2	13,1	5,8	5	11,1
5	12	13,2	6,6	5,8	9,2
6	12,2	13,2	8	7,8	10,8
7	12,4	13,2	9	7,4	9,2
8	12	13,2	10	10,2	11,6
9	12,8	13,4	11,2	10,6	11,6
10	13	13,4	11,2	10,6	11,6
11	13	13,4	10,4	10,6	11,6
12	13	13,6	10,5	10,8	11,8
13	13	13,4	10,2	10,4	11,8
14	13	13,6	10	10,2	12
15	13	13,6	10	10	12
16	13,2	13,4	10,8	11	12
17	13,4	13,4	11,4	11,6	12,2
18	13,4	13,4	11,8	12	12,4
19	13,6	13,4	12,2	12,4	12,4
20	14	13,6	12,6	12,8	12,6

Annexe I.c : Essai de pompage sur banc d'essai

Essai de pompage (Puits A et B) en milieu homogène

		Hauteur d'eau (cm) aux piézomètres					
		Pompage d'essai au puits A				Pompage au puits B	
		Temps (s)	P 9	P12	P13	P16	P 4
la descente	0	13,4	13,4	13,4	13,4	12,6	12,8
	15	11,2	12,2	12,4	12,6	10	10,4
	30	11,2	12,2	12	12,6	9,8	9,9
	45	11,2	12,2	11,9	12,6	9,2	9,4
	60	11,2	12,2	11,9	12,4	9	9,2
	75	11,2	12,2	11,8	12,4	8,6	8,8
	90	11,1	12,2	11,8	12,2	8	8,2
	105	11,1	12,1	11,8	12,2	7,4	7,4
	120	11,1	12	11,7	12	6,9	6,9
	135	11	12	11,7	11,8	6,6	6,6
	150	11	12	11,6	11,4	6,4	6,4
	165	10,8	12	11,6	11,2	6,2	6,2
	180	10,6	12	11,6	11	6,2	6,2
	195	10,2	12	11,5	10,8	9,4	9,4
La remontée	210	13	13,1	13	12,4	9,8	9,4
	225	13	13	13,1	12,5	10,1	10,1
	240	13	13	13	12,5	10,2	10,2
	255	13	13	13	12,4	10,2	10,2
	270	13	13	13	12,4	10,2	10,2
	285	13	13	13	12,3	10,2	10,2
	300	13	13	13	12,3	10,1	10,1
	315	12,9	13	13	12,2	10	10
	330	12,9	13	13	12	10	10
	345	12,9	13	13	12	10	10
	360	12,9	13	13	12	10	10

Essai de pompage (Puits A et B) en milieu hétérogène (formation sableuse à lentille à 15% de calcaire argileux.

		Hauteur d'eau (cm) aux piézomètres							
		Pompage d'essai au puits A				Pompage au puits B			
		temps (s)	P9	P12	P13	Temps (s)	P16	Temps (s)	P4
0	11,8	12	12	0	12,2	0	11,6	11,4	
5	10	10,2	10,8	5	10,2	5	10,4	10	
15	9,5	9,9	10,3	15	10	15	10	9	
30	9,4	9,8	10,1	30	9,8	30	9,6	8,2	
45	9,4	9,8	10,1	45	9,7	45	9,4	8	
60	9,3	9,8	10	60	9,6	60	9,2	7,8	
75	9,3	9,7	10	75	9,4	75	9,1	7,8	

90	9,2	9,7	9,9	90	9,3	90	8,9	7,3
95	10	9,6	11	105	9,2	105	8,8	6,6
105	11	11,2	11,7	120	9,1	120	8,7	6
120	11,6	11,8	11,9	135	9,1	135	8,6	5,9
135	11,7	12	12	150	9	150	8,5	5,8
150	11,8	12	12	165	9	165	8,4	5,8
180	11,8	12	12	180	8,8	180	8,2	5,6
				195	10	195	9,8	9,2
				210	10	210	10	9,4
				225	10	225	10,2	9,6
				240	10	240	10,2	9,7
				255	10	255	10,2	9,8
				270	10,2	270	10,3	9,8
				285	10,4	285	10,3	9,8
				300	10,6	300	10,4	10
				315	10,7	315	10,4	10
				330	10,8	330	10,4	10,2
				345	10,8	345	10,5	10,2
				360	10,8	360	10,5	10,2

Essai de pompage (Puits A et B) en milieu hétérogène (formation sableuse à lentille à 30% de calcaire argileux)

		Hauteur d'eau (cm) aux piézomètres					
		Pompage d'essai au puits A				Pompage au puits B	
		Temps (s)	P9	P12	P13	P16	P4
La descente	0	12	12,2	12	12,2	11,4	11
	3	9,4	9,4	11	9	7,6	8,8
	5	8	9	10,4	9	7,4	8,6
	10	7,6	8,6	8,8	8,9	7,2	8
	15	6,8	8,4	8,8	8,8	6,8	7,8
	30	6,4	8,2	8,2	8,7	6,8	7,4
	45	6,4	8,2	8	8,6	6,7	7,2
	60	6,4	8	8	8,6	6,6	7
	75	6,4	7,8	8	8,4	6,4	6,9
	90	6,2	7,8	7,9	8,4	6,2	6,8
	105	6,2	7,8	7,9	8,3	6	6,8
	120	6,2	7,8	7,9	8,3	6	6,6
La remontée	125	7	8,2	8,4	9,5	9,2	9
	130	7,4	8,8	9,2	10	10	9,6
	135	8	9,2	9,6	12	10	10
	150	11,6	11,8	11,8	12	10	10,2
	165	11,8	12	12	12	10	10,3
	180	12	12	12	12	10,1	10,3
	195	12	12	12	12,2	10,2	10,4
	210	12	12,2	12	12,2	10,3	10,4
	225	12	12,2	12	12,3	10,4	10,4
	240	12	12,2	12	12,3	10,4	10,4

Annexe II : Résultats des essais de traçage

Annexe II.a : Essai de traçage en milieu homogène

Essai de traçage en écoulement naturel

Temps (min)	Cond. (µS/cm)	C _{NaCl} (mg/l)	Temps (min)	C _{Rhod} (mg/l)	Temps (min)	C _{colorant} (mg/l)
0	1200	175,5	3	0,053	0	0
1	1330	269,1	6	0,069	5	0,501
5	1354	760,5	15	0,084	10	0,551
10	1235		20	0,105	15	0,651
15	1394	1228,5	25	0,157	20	0,902
20	2350		35	0,622	30	0,852
25	1994	2047,5	40	0,881	35	1,203
30	4660	1228,5	52	1,08	40	1,554
35	6230		60	0,984	45	1,654
37	9640		70	0,881	50	1,805
38	11210		78	0,778	55	1,855
40	10460	2106	90	0,622	60	1,855
45	7820		105	0,467	70	1,504
50	8220	2925	120	0,338	80	1,253
55	15100	3451,5	135	0,312	90	1,053
64	10400	2983,5	150	0,26	105	0,952
69	8400		165	0,183	120	0,752
75	6170		180	0,188	140	0,752
80	4430	2047,5	200	0,141	160	0,742
85	3690		220	0,157	180	0,727
90	2920		240	0,157	210	0,651
95	2610	1228,5			240	0,651
100	2530					
105	2270					
110	2230					
115	2280					
120	2100	877,5				
125	2160					
130	2160	936				
135	2180					
140	1814					
145	1748					
150	1797	760,5				
155	1752					
160	1577					
165	1546	760,5				
170	1520					
180	1599	819				

Essai de traçage en écoulement provoqué (Par pompage)

Restitution des Chlorures de sodium					
Au puits A			Au puits B		
Temps (min)	Cond. (µS/cm)	C NaCl (mg/l)	Temps (mn)	Cond. (µS/cm)	C _{NaCl} (mg/l)
0	1128	163,8	0	1200	351
3	1398	245,7	10	1390	204,75
5	1362	526,5	20	1490	403,65
10	1975	994,5	30	19650	14625
15	4150	1813,5	40	20000	15795
25	8720	4446	65	19200	8775
35	15920	12870	75	15030	5206,5
40	16550	11115	90	7370	2983,5
50	16850	11700	105	4480	1696,5
60	11320	10530	120	4440	1755
70	10260	8775	135	3300	1170
80	5590	8808	150	3660	
100	3620	1462,5	165	2590	994,5
120	2420	1111,5	172	2360	
150	2160	936	180	2500	
160	2100	-	195	2350	994,5
170	1890	-	225	2160	819
180	1936	936	255	2050	702
200	1746	-	275	2130	702
210	1753	-	300	2100	819
220	1698	760,5			
240	1631	702			

Restitution de la Rhodamine-B				Restitution du colorant textile			
Au puit A		Au puits B		Au puits A		Au puits B	
Temps (min)	C _{Rhod} (mg/)	Temps (min)	C _{Rhod.} (mg/l)	Temps (min)	C _{Colorant} (mg/l)	Temps (min)	C _{Colorant} (mg/l)
5	0	2	0,053	0,5	0,621	5	0,511
23	0,369	20	0,07	5	0,902	10	0,601
27	0,643	30	0,726	10	1,338	15	0,536
30	0,659	35	1,14	15	2,091	25	1,604
37	0,84	45	1,212	20	2,061	30	1,679
44	0,866	60	0,741	25	1,93	35	1,85
47	0,762	75	0,633	30	1,669	40	1,885
51	0,803	90	0,529	35	1,569	45	2,025
57	0,752	105	0,39	40	1,293	50	1,955
65	0,695	120	0,333	45	1,123	55	1,885
71	0,55	145	0,291	50	0,962	60	1,654
80	0,54	165	0,183	55	0,862	70	1,353
110	0,462			60	0,892	80	1,233
122	0,353			70	0,802	100	1,012
140	0,312			80	0,747	120	0,922
160	0,234			100	0,702	145	0,742
180	0,162			120	0,641	170	0,712
190	0,172			140	0,591	200	0,692
				160	0,626		
				180	0,581		
				200	0,591		

Annexe II.b : Essai de traçage en milieu hétérogène (Ecoulement provoqué)

Milieu hétérogène à une Lentille à 15 % de calcaire argileux					Milieu hétérogène à une Lentille à 30 % de calcaire argileux			
Au puits B					Au puits B			
Restitution des chlorures de sodium			Restitution de la Rhodamine- B		Restitution des chlorures de sodium		Restitution de la Rhodamine- B	
Temps (min)	Cond. $\mu\text{S/cm}$	C _{NaCl} (mg/l)	Temps (min)	C _{Rhod} (mg/l)	Temps (min)	C _{NaCl} (mg/l)	Temps (min)	C _{Rhod} (mg/l)
0	1087	643,5	0	0,016	0	577,5	0	0,036
10	1525	819	5	0,0048	5	585	5	0,04
20	1422	819	10	0,0048	10	643,5	10	0,02
30	2520	1638	15	0,0069	15	1755	15	0,0048
40	4060	2574	20	0,0918	20	2515,5	20	0,04
50	2720	2106	25	0,30125	25	2808	25	0,024
70	2050	994,5	30	0,431	30	2983,5	30	0,04
90	1750	1053	35	0,435	35	2800	35	0,427
110	1700	994,5	40	0,471	40	2983,5	40	0,609
130	1660	1053	45	0,4158	45	2925	45	0,708
150	1540	877,5	50	0,388	50	1462,5	50	0,759
180	1640	877,5	55	0,392	55	1755	55	0,684
210	1371	877,5	60	0,324	60	1638	60	0,518
240	1342	760,5	65	0,285	65	1345,5	65	0,352
			70	0,336	70	1404	70	0,364
			75	0,253	80	1228,5	80	0,328
			80	0,253	90	1170	90	0,356
			85	0,226	100	1345,5	100	0,317
			90	0,166	110	994,5	110	0,305
			100	0,186	120	994,5	120	0,242
			110	0,135	130	1053	130	0,242
			120	0,107	140	877,5	140	0,202
			130	0,119	150	877,5	150	0,19
			140	0,111	160	702	160	0,159
			160	0,052	170	643,5	170	0,155
			170	0,111	180	760,5	180	0,135
			180	0,17	200	760,5	200	0,107
			200	0,257	220	526,5	220	0,072
			220	0,155	240	760,5	240	0,087
			240	0,162			250	0,091