

THESE

présentée à



n° 5245

L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE
ET INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE
DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de
DOCTEUR - INGENIEUR

par
Jean-Pierre SAUTY

Ingénieur E. I. H.

SUJET

**Contribution à l'identification
des paramètres de dispersion dans les aquifères
par interprétation des expériences de traçage**

Soutenu le 20 Septembre 1977 devant la Commission d'Examen

M. G. LESPINARD President

M. P.A. WITHERSPOON

M. G. VACHAUD

M. J. MARGAT

M. J. GUIZERIX

Examineurs

GRENOBLE

R E S U M E

Le comportement hydrodispersif (convection et dispersion prépondérantes) d'une substance miscible à l'eau au sein d'un aquifère est étudié en milieu poreux saturé pour les conditions de traçage **les** plus courantes :

- injection brève ou continue de traceur,
- écoulement satisfaisant autant que possible à l'une des conditions de symétrie suivantes :
 - écoulement mono- ou bidimensionnel à vitesse uniforme
 - ou bien écoulement radial [convergent, divergent ou alterné].

Quand la vitesse est uniforme, la loi d'évolution des concentrations est donnée sous forme analytique. Par contre, en écoulement radial, **il** est nécessaire de recourir à une intégration numérique : une méthode affranchie du phénomène parasite de dispersion numérique est développée et appliquée.

Pour chaque combinaison de type d'injection et d'écoulement, un abaque universel dont les courbes sont différenciées par un paramètre unique [nombre de Péclet) est établi en variables adimensionnelles. La validité de solutions approchées et la possibilité d'employer des paramètres de forme facilement identifiables est examinée.

Ensuite, est définie une méthode d'identification visuelle des paramètres (dispersivité et porosité cinématique) par superposition des concentrations mesurées aux courbes de l'abaque : **de** façon analogue à l'interprétation des résultats de pompage d'essai (par **les** courbes de THEIS, BOULTON, ...1).

Ces différents résultats théoriques sont ensuite appliqués à l'interprétation de traçages réalisés sur **le** terrain en écoulement uniforme ou radial. Des paramètres ainsi mesurés in situ sont tirés des enseignements divers, notamment sur l'effet des hétérogénéités et de la dispersion transversale.

S O M M A I R E

	<u>Pages</u>
TABLE DES ANNEXES	V
TAELE DES SYMBOLES	VI 1
1. - INTRODUCTION	1
1.1. - GENERALITES - DEFINITION DU SUJET	1
1.2. - <i>PHYSIQUE</i> DES TRANSFERTS	4
1.2.1. - Convection	4
1.2.2. - <i>Dispersion</i>	6
1.2.3. - Echanges	8
1.2.4. - <i>Réactions chimiques et ohaniques</i>	9
1.2.5. - <i>Equations aux dérivées partielles</i>	9
1.3. MESURES PAR TRACAGES - REALISATTON - INTERPRETATION	12
1.3.1. - <i>Réalisation des traçages</i>	12
1.3.2. - <i>Interprétation den traçages</i>	14
1.4. EXPLOITATION DES PARAMETRES MESURES	15
1.4.1. - <i>Paramètres intrinsèques</i>	15
1.4.2. - <i>Echelle de représentativité</i>	16
1.4.3. - <i>Application aux transferts de chaleur</i>	16
2. - TRACAGE EN ECOULEMENT MONODI MENS I ONNEL UNI FORME	17
2.1. - CONDITIONS DE VALIDITE DU SCHEMA	1:
2.2. - EQUATION AUX DERIVEES PARTIELLES	18
2.2.1. - <i>Mise en équation</i>	18
2.2.2. - <i>Choix des variables sans dimeniion</i>	13
2.3. . REPONSE A UN ECHELON DE CONCENTRATION	21
2.3.1. - <i>Conditions de validité du dchéma</i>	21
2.3.2. - <i>Equation de la combe de restitution</i>	21
2.3.3. - Abaque	22
2.3.4. - <i>Propriétés de l'équation simplifiée</i>	22
2.3.5. - <i>Validité de l'équation simplifiée</i>	23

2.4.	-	REPDNSE A UNE INJECTION CONTINUE	26
2.4.1.	-	<i>Conditions de validité du bch�ma</i>	26
2.4.2.	-	<i>Equatcon de La combe de restitution</i>	27
2.4.3.	-	<i>Abaque</i>	27
2.4.4.	-	<i>Validité de l'équation simplifiée</i>	29
2.5.	-	REPONSE A UNE INJECTION BREVE	31
2.5.1.	-	<i>Equation de la coutbe de restitution</i>	31
2.5.2.	-	<i>LU différentes vitesses</i>	32
2.5.3.	-	<i>Abaque</i>	34
2.5.4.	-	<i>Compatidon � la d�hiw�e de la h�ponbe � un échelon de concentration</i>	34
2.5.5.	-	<i>Faotewr de forme</i>	36
3.	-	TRACAGE EN ECOULEMENT BIDIMENSIONNEL A VITESSE UNIFORME	37
3.1.	-	CONQITZONS DE VALIQITE QU SCHEMA	37
3.2.	-	EZUATION AUX DERIVEES PARTIELLES	38
3.2.1.	-	<i>Mhe en équation</i>	38
3.2.2.	-	<i>Choix den variables sans dimension</i>	40
3.3.	-	REPONSE A UNE INJECTION CONTINUE	41
3.3.1.	-	<i>Equation de La coutbe de restitution</i>	41
3.3.2.	-	<i>Abaque</i>	42
3.3.3.	-	<i>Comparaison de la combe de restitution buh L'axe � la solution en $\frac{1}{T} \text{Erfc}$</i>	43
3.3.4.	-	<i>Validité des calculs d'identification simplifiés</i>	44
3.4.	-	REPONSE A UNE INJECTION BREVE	45
3.4. 1.	-	<i>Equation de la combe de restitution</i>	45
3.4.2.	-	<i>Led différentes vitesses</i>	46
3.4.3.	-	<i>Abaques : $C_R(\frac{ut}{x})$</i>	48
3.4.4.	-	<i>Abaque $C_R(\frac{ut}{\alpha L})$</i>	52
3.4.5.	-	<i>Campahabon avec &e cab monodimensionnel</i>	53
3.4.6.	-	<i>Influence de l'éloignement � l'axe de L'�codement</i>	54

4.	- TRACAGE EN ECOULEMENT RADIAL	59
4.1.	- CONDITIONS DE VALIDITE DU SCHEMA	59
4.2.	- EQUATION AUX DERIVEES PARTIELLES	61
4.2.1.	- Mise en CiquaLion	61
4.2.2.	- Elimination du tenme transversal	63
4.2.3.	- Choix deci variables sans dimension	65
4.3.	- INTEGRATIUN DES EQUATTUNS PAR VOIE NUMERIQUE	66
4.3.1.	- Intégration analytique	66
4.3.2.	- ietr méthodes usuelles	68
4.3.3.	- La dispersion numé-que	69
4.3.4.	- Discrétisation retenue	71
4.3.5.	- Pnéchsion d a calculs	72
4.3.6.	- Programmation et contrôle des résultats	73
4.4.	REPONSE A UNE INJECTZON CONTINUE EN ECOULEHIENT DIVERGENT	75
4.4.1.	- Abaque	75
4.4.2.	- Comparaison à Pa solution approchée de RAIMONDI	76
4.4.3.	- Compakahan à La solution appmchée de LAU	77
4.4.4.	- Comparaison à L'injection continue en écoulement monodimensionnel unidohme	70
4.5.	REPONSE A UNE INJECTION CONTINUE VANS UN ECOULEMENT CONVERGENT	79
4.5.1.	- Abaque	79
4.5.2.	- Comparaison entre injections continues en écoulements convergent et divergent	80
4.5.3.	- Cornparlainon à L'éckeRun imposé en écoulement mono- dimensionneet uniforme	el
4.6.	REPONSE A UNE IMPULSION DANS UN ECOULEMENT DTVERGENT	82
4.6.1.	- Abaque	82
4.6.2.	- Comparaison à l'impulsion en écoulement manu- dimensionnd unidohme	83
4.7.	REPONSE A UNE ZMPULSION DANS UN ECUULEMENT CONVERGENT	04
4.7.1.	- Abaque	84
4.7.2.	- Compazahan entre impulsions entre écoulements conuehgent et divugent	84
4.7.3.	- Comparaison entre impulsion en écoulement convergent et la dérivée de la réponse à un échelon en écoule- ment monodimensionnel uniforme	85

4.8.	-	REPONSE A UNE IMPULSION EN ECOULEMENT ALTERNE (PUITS UNIQUE]	87
4.8.1.	-	<i>Conditions de validité</i>	87
4. b. 2.	-	Choix de variables adimensionnelles	88
4.ti.3.	-	abaque^	89
4.9.	-	CONCLUSION CONCERNANT LES FORMULES APPROCUEES EN ECOULEMENT RADIAL	90
5.	-	EXEMPLES D'APPLI CATIONS	92
5.1.	-	METUOPES P'ZDENTIFICATION PROPOSEES	92
5. 1.1.	-	<i>Paramètres de forme</i>	92
5.1.2.	-	<i>Identification manuelle par abaques</i>	94
5.1.3.	-	<i>IdenXidication automatique</i>	108
5.2.	-	INTERPRETATION DE MESURES EN ECOULEMENT UNZFORME	104
5.2. 1.	-	<i>Origine d a mesures interprétées</i>	104
5.2.2.	-	<i>Description du site et des niebuha</i>	104
5.2.3.	-	<i>Analyse du traçage au tritium</i>	109
5.2.4.	-	<i>Analyse comparative de plusieurs Ltaçaga effectués nuh Les m�men puits</i>	123
5.2.5.	-	<i>Effet de la &tance suivant l'axe de L'�coufement</i>	125
5.2.6.	-	<i>Effet de Ca distance transversale</i>	126
5.3.	-	INTERPRETATION DE MESURZ EN ECOULEMENT RADIAL	128
5.3.1.	-	Choix du traçage par impulsion en écoulement conuehgent	128
5.3.2.	-	Ohigine d a mesures interprétées	1?9
5.3.3.	-	MeRhode d interprétation	130
5.3.4.	-	Exemple n�1	131
5.3.5.	-	Exeniple no2	133
5.3.6.	-	Exemple n"3	13E
5.3.7.	-	Exempkb n� 4, 7 et 6	139
6.	-	CONCLUSIONS	143

TABLE DES ANNEXES

- Annexe 1,I : DETERMINATION DE LA POROSITE *CINEMATIQUE* POUR UN SYSTEME FERME A **A** DIFFUSION
- Annexe 1,II : EFFETS CONJUGUES DE LA DISPERSION CINEMATIQUE ET DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE SUR LES TRANSFERTS DE CHALEUR VAN; LES AQUIFERES
- o
o o
- Annexe 2,I : ECHELON DE CONCENTRATION EN ECOULEMENT MONODIMENSIONNEL UNIFORME **Im U eu semi-infini**
1. Déhivation **de la boldon** par transformation **de Laplace**
 2. **Pente de la combe simplifiée de hépame** à un Echdan
- Annexe 2,11 : INJECTION CONTINUE EN ECOULEMENT MONODIMENSIONNEL UNIFORME (*milieu infini*)
- Annexe 2,111 : INJECTION INSTANTANEE EN ECOULEMENT MONODIMENSIONNEL UNIFORME
1. Equation aux variables réelles
 2. Masse restituée à la sortie
 3. Equation aux variables **héduiteh**
 4. Aire **de** La combe nommée pah l'amplitude **du pic**
- Annexe 2,IV : VITESSES MODALE, MEDZANE ET MOYENNE POUR LA COURBE DE RESTITUTION A UNE INJECTION BREVE DANS UN ECOULEMENT MOIVODIMENSIONNEI A VZTESSE UNIFORME
1. Vitesse modale
 2. Vitesse **médiane**
 3. Vitesse **moyenne**
- Annexe 2,V : FONCTION QERIVEE DE LA REPONSE A UN ECHELON DE CONCENTRATION EN ECOULEMENT MONODIMENSIONNEL UNIFORME (Répome à un **chgneau de cvuhte dutéel**)
1. Equation **de la combe de restitution**
 2. Combe **de restitution** ($x=X$) en variables réduites
 3. Feux **de traceur** transitant pm convection à La **&tance** X
 4. Masse totale **de traceur contenue** dam l'aquifère
- o
o o

Annexe 3,1 : INJECTION CONTINUE DANS UN ECOULEMENT BI DIMENSIONNEL UNI FORME
 Régime stabilisé
 Régime transitoire
 Calcul pratique

Annexe 3,II : INJECTION INSTANTANEE DANS UN ECOULEMENT BI DIMENSIONNEL UNI FORME
 1. Equation aux variables réelles
 2. Equation aux variables réduites avec $t_R = \frac{Ut}{x}$
 3. Equation aux variables réduites avec $t'_R = \frac{Ut}{\alpha L}$
 4. kue de la combe notrmée par l'amplitude du pic

ANNEXE 3,111 : VITESSES MODALE, MEUIANE ET MOYENNE POUR LA COURBE DE KESTI JUTION
 A UNE INJECTION BREVE DANS UN ECOULEMENT BI DIMENSIONNEL A VITESSE
 UNI FORME
 1. Vitesse modale
 2. Vitesse médiane
 3. Vitesse moyenne

o
 o o

ANNEXE 5,1 : ANALYSE COMPARATIVE UE PLUSIEURS TRACAGES EFFECTUES SUR
 LES MEMES PUI TS

ANNEXE 5, II : EFFETS **DES** DISTANCES LONGI TUDINALE E I TRANSVERSALE
 (Bvuuaud : BC, BD, BN5, BN4, BN6)

ANNEXE 5, II 1 : ZUENTI FICATION DE LA DI SPERSI V17-E TRANSVERSALE

1. Identification de α_T d'aphè a en 6uppudant N5 sur l'axe
2. Identification de α_T d'aptrèd C_{max} en nuppodant N5 sur L'axe
3. Identification de α_T d'aptrèb les trois "ombres de Péclè.t mixtes"
 a_4, a_5 et a_6

1. - INTRODUCTION

1.1. - GENERALITES - DEFINITION DU SUJET

Les eaux souterraines constituent une ressource de qualité généralement supérieure à celle des eaux de surface grâce à la protection naturelle des couches de sol susjacentes et aux propriétés filtrantes des terrains. Cependant, l'accroissement des causes de pollution (rejets d'usines, excès d'engrais ou de pesticides, dépôts d'ordure, stockage souterrain **de** déchets, etc.. .) est tel que l'enfouissement de l'eau dans **le** sous-sol n'est plus un gage suffisant de pureté.

Après une période où l'hydrogéologie était; principalement vouée à l'évaluation quantitative des ressources avec la création d'une méthodologie **de** mesures [piézométrie, essais de débit, ...] et d'outils de synthèse (modèles analogiques puis numériques), vient donc une époque où l'hydrogéologue doit de plus en plus fréquemment faire face aux problèmes pratiques posés par l'évolution de la qualité **des** eaux souterraines.

La migration des produits nocifs, matières organiques et sels dissous, entraînés par l'eau en mouvement, est régie par la convection, la dispersion (diffusion moléculaire et dispersion mécanique, par **le**); échanges physiques avec **le** milieu et **les** réactions chimiques et biologiques. Les deux premiers phénomènes sont la cause du déplacement des produits dans **les** nappes ; **les** suivants sont plutôt une cause **de** destruction, ou au moins de retard, mais leur influence relative tend à s'atténuer avec l'accroissement des quantités **de** polluants déversés dans **les** aquifères.

Il est donc important, au premier chef, de doter **les** hydrogéologues praticiens de méthodes de prévisions du comportement des polluants dans les nappes pour lesquelles des problèmes de protection leur sont couramment posés. Les bases théoriques des différents phénomènes régissant la migration de ces produits sont bien connues. La modélisation mathématique en est maintenant bien développée et, malgré quelques difficultés pas toujours complètement dominées [notamment dispersion numérique des calculs], la qualité de la résolution des équations est bien supérieure à la précision avec laquelle sont connus **les** paramètres représentatifs du terrain. Actuellement, la validité des modèles de prévision est limitée par **le** manque de données de terrain représentatives et dont la rareté s'explique par **le** coût et la difficulté **des** mesures.

Le mouvement de l'eau dans un milieu poreux (= 'transfert' ou déplacement (*) de l'eau) est régi par des phénomènes de convection et de dispersion, indépendamment de tout transport de matière par l'eau (par exemple, migration de solutés), traditionnellement désigné dans la littérature anglo-saxonne par la dénomination transfert de masse. La convection est due au déplacement de l'eau à l'échelle macroscopique ; la dispersion résulte du déplacement à l'échelle microscopique parmi les tortuosités des pores.

Convection et dispersion de l'eau entraînent la migration et la dispersion des matières transportées.

La connaissance de la vitesse effective de l'eau et de la dispersivité du milieu sur l'eau est le préalable nécessaire à l'évaluation de sa porosité effective et de sa dispersivité (qui pourraient éventuellement différer alors quelque peu sur des substances transportées).

Le déplacement et la dispersion de l'eau "pure" ne sont pas directement saisissables, mais peuvent être révélés par leurs effets sur ceux d'une substance de comportement identique [on peut donner la définition d'un traceur parfait comme étant la substance qui a un comportement exactement identique).

L'analyse des résultats d'expériences employant un traceur supposé parfait a pour but de parvenir à évaluer les paramètres décrivant le déplacement convectif de l'eau et l'hydrodispersivité du milieu (c'est le sujet de la recherche présente) et de fournir une référence vis-à-vis du comportement de substances quelconques (polluants notamment). Celles-ci pourront être sujettes à des phénomènes complémentaires qu'il conviendra de mesurer par des méthodes appropriées.

Le traçage permet de déterminer ces paramètres ; il est réalisé sur le terrain soit en écoulement naturel (généralement à vitesse uniforme à l'échelle de la mesure), soit en écoulement artificiel au voisinage d'un puits soumis à un pompage d'exhaure ou d'injection.

A l'échelle des mesures, la migration des traceurs est, dans la majeure partie des cas, un problème bidimensionnel du fait de la dispersion transversale dans le plan horizontal ; cependant, dans la pratique, l'interprétation de ces expérimentations est souvent faite suivant un schéma unidimensionnel.

(*) Une définition précise de la terminologie utilisée présentement pourra être consultée dans le Dictionnaire de G. CASCAXY et J. M G A T /9/

A côté de la méthode désormais classique de traçage en écoulement radial alterné avec injection suivie de pompage (méthode du puits unique), se développe en France, sous l'impulsion du BRGM[†] et du CENG, l'application d'une méthode de traçage radial convergent (pompage) avec injection dans un piézomètre latéral.

Le présent travail a été axé sur une étude systématique des équations de transfert correspondant aux différentes méthodes de traçage en milieu poreux saturé :

- transfert monodimensionnel dans un champ de vitesse uniforme
- transfert bidimensionnel dans un champ de vitesse uniforme
- transfert radial divergent à partir d'un puits central d'injection
- transfert radial convergent vers un puits central soumis à un pompage
- et transfert en écoulement radial alterné.

Cette étude est accompagnée d'un examen critique des approximations usuelles.

Dans chacun de ces cas, ont été bâtis des abaques universels représentatifs des courbes de restitution [loi d'évolution de la concentration en fonction du temps au point de prélèvement], grâce au choix de variables adimensionnelles appropriées. Le calcul des abaques dans le cas radial nécessite le recours à une résolution numérique étant donné l'absence de solution analytique exacte. A cette occasion, une méthode de discrétisation a été développée pour affranchir les résultats du phénomène parasite de dispersion numérique.

Une méthode simple d'identification manuelle des paramètres a été développée par exploitation de ces abaques et comparée à d'autres méthodes d'identification plus classiques.

Cette méthode, qui permet une interprétation plus nuancée qu'un ajustement automatique par ordinateur, est appliquée à l'interprétation de divers traçages réalisés sur le terrain tant en écoulement à vitesse uniforme qu'en écoulement radial. L'exploitation de ces mesures permet notamment de mettre en évidence l'effet de la distance de mesure, l'évaluation de la dispersivité transversale et l'influence de cheminements différenciés expliqués par un schéma "bicouche".

* BRGM = Bureau de Recherches Géologiques et Minières

† CENG = Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble

6. - CONCLUSIONS6.1. - PRINCIPAUX RESULTATS

Le comportement hydrodispersif [convection et dispersion prépondérantes] d'une substance miscible à l'eau au sein d'un aquifère a été étudié pour **les** conditions de traçage les plus courantes :

- injection brève ou continue de traceur en quantités suffisamment réduites pour que l'écoulement hydrodynamique local ne soit pas perturbé [le cas de l'échelon imposé dans la nappe a été examiné à titre de référence] ;
- écoulement monodimensionnel ou bidimensionnel à vitesse uniforme ou bien écoulement radial convergent, divergent ou alterné.

Pour chaque combinaison de type d'injection et d'écoulement, un abaque a été établi ; la validité de solutions approchées et la possibilité d'employer des paramètres de forme a été examinée.

Le tableau ci-dessous récapitule **les** principaux résultats théoriques rassemblés :

type d'écoulement \ type d'injection	injection continue	injection brève
monodimensionnel à vitesse uniforme	équation, abaque, (*) paramètres de forme tirés d'une équation Simplifiée.	Équation, abaque, vitesses modale, médiane et moyenne, paramètres de forme.
bidimensionnel, à vitesse uniforme [avec dispersion transversale]	équations [transitoire et régime stabilisé], abaque [fonction W de HAUPTMANN complétée par une solution approchée], paramètres de forme, cartographie des concentrations à stabilisation..	équation, abaque, vitesses modale, médiane et moyenne, paramètres de forme, cartographie de l'amplitude du pic, influence de l'écart angulaire entre la ligne de puits et la direction de l'écoulement.
radial, divergent	abaque, solution approchée	abaque, solution approchée
radial, convergent	abaque, solution approchée	abaque, solution approchée
radial, alterné	abaque, solution approchée	abaque

(*) équation, abaque et propriétés de la réponse à un échelon de concentration imposé dans la nappe ont été également étudiés (à titre comparatif).

Ces différents résultats théoriques ont été appliqués à l'identification des paramètres de dispersion à partir de traçages réalisés sur le terrain par injection de DIRAC en écoulement uniforme ou radial. Les valeurs ainsi obtenues apportent des enseignements divers, notamment sur les Bchelles d'hétérogénéité et l'effet de la dispersion transversale dans les terrain!; expérimentaux.

6.2. - ABAQUES-UXIVEZSEES

Dans chaque cas, un abaque universel [utilisable quelles que soient les porosité. et dispersivité d'une nappe à étudier; a été établi en variables adimensionnelles. Un seul paramètre différencie les courbes. Il a la structure d'un nombre de Péclet qui caractérise la nappe [par la dispersivité et la vitesse effective] munie de son dispositif d'observation [par la position relative du puits de prélèvement par rapport au puits d'injection).

6.3. - PARAMETRES DE FORME

Les paramètres de forme permettent d'évaluer directement la dispersivité et la vitesse effective par des formulations approchées. Dans le cas de l'injection continue, l'obtention des paramètres de forme est immédiate ; par contre, dans le cas d'une impulsion, leur évaluation fait appel à des intégrations [moments d'ordres divers).

6.4. - ÉCOULEMENT MONODIMENSIONNEL UNIFORME

Les résultats relatifs à ce type d'écoulement sont très applicables dans la pratique [aquifère réduit à un chenal de section constante ou écoulement bidimensionnel uniforme, en l'absence de gradients de concentration transversaux). Ils sont cependant communément exploités ; nous les avons donc étudiés pour permettre des évaluations comparatives par rapport aux formulations correctes.

trois types de conditions ont été étudiés :

- imposition d'un échelon de concentration dans l'aquifère,
- injection continue : échelon de concentration imposé uniquement au traceur injecté (dont le flux est faible par rapport à celui de la nappe),
- injection brève.

Les équations de la restitution à une injection continue ont été établies (annexe 2,111 et comparées à celles de l'échelon imposé qui, quoique conduisant à des résultats sensiblement différents, leur sont couramment assimilés.

6.5. - ÉCOULEMENT BIDIMENSIONNEL UNIFORME

Malgré l'influence de deux paramètres supplémentaires (dispersivité transversale et distance du point de mesure à l'axe de l'écoulement), il a été possible d'établir une équation aux variables réduites et un abaque universel fonctions d'un seul paramètre : un nombre de Péclet mixte caractérisant simultanément les effets longitudinaux et transversaux.

Dans le cas de l'injection continue, l'équation de la courbe de restitution fait appel à des fonctions $W(u, \beta)$ de HANTUSH qui ne sont pas tabulées pour les nombres de Péclet supérieurs à 10. Mais, pour ces valeurs, une formule analytique approchée prend la relève avec une excellente précision.

Deux variables sont cartographiées en fonction des coordonnées spatiales réduites $x_R = \frac{x}{\alpha_L}$ et $y_R = \frac{y}{\alpha_L}$, La première donne l'amplitude du pic de la courbe de restitution à une impulsion de DIRAC, la seconde les concentrations obtenues en régime stabilisé dans le cas d'une injection continue. Ce dernier résultat est essentiellement applicable au problème d'un rejet continu de polluant (un traçage ne pourrait, pour des raisons Écoimiques, être poursuivi suffisamment longtemps pour atteindre la stabilisation).

L'influence de la distance du point de mesure à l'axe de l'écoulement a été particulièrement étudiée tant du point de vue de l'affaiblissement des concentrations observées que de celui des erreurs d'interprétation commises en négligeant cette distance.

6.6. - ÉCOULEMENT RADIAL

Résolution numérique

L'absence de solutions analytiques exactes connues a imposé le recours à une intégration numérique. Une méthode "aux différences finies synchrones", affranchie du phénomène parasite de dispersion numérique pour les nombres de Péclet usuels, a été développée.

Abaque et formule approchées

Pour **les** différentes combinaisons de type d'écoulement et d'injection étudiées, un abaque a été calculé et tracé par ordinateur. Ces abaques ont été utilisés pour mettre en évidence la possibilité de recourir à des formulations analytiques approchées dont la précision est examinée.

6.7. - INTERPRÉTATION DES TRACAGES

Les résultats théoriques précédents ont été appliqués à l'interprétation de tracages par injection brève réalisés en vraie grandeur, dans des nappes en écoulement soit uniforme, soit radial convergent.

Trois méthodes ont été comparées pour identifier la dispersivité et la porosité effective :

- ajustement automatique,
- paramètres de forme,
- utilisation d'abaques.

6.8. - IDENTIFICATION PAR AJUSTEMENT AUTOMATIQUE ET PAR PARAMÈTRES DE FORME

À titre comparatif, une des courbes de restitution a été interprétée par ajustement automatique - qui est la méthode traditionnelle - puis d'après **les** paramètres de forme et à l'aide d'abaques.

Diverses normes d'erreur ont été minimisées au cours de **calculs** automatiques successifs. Les paramètres obtenus par ces différentes méthodes diffèrent **assez** peu. Les courbes de restitution correspondantes donnent un bon ajustement global des points de mesure.

Par contre, les paramètres de forme (tirés des vitesses nodale et médiane) conduisent à des estimations différentes, **surtout** en ce qui concerne **les** dispersivités : l'ajustement est beaucoup moins bon, bien **que** l'obtention des paramètres de forme ait requis un effort comparable à celui d'un ajustement automatique.

6.9. - IDENTIFICATION PAR ABAQUE

L'identification par abaque ne nécessite qu'un simple report des points de mesure sur un graphique et peut être utilisée en l'absence d'ordinateur ; elle permet à l'opérateur de mettre à profit son expérience et son intuition pour éventuellement donner plus de poids à telle ou **telle** partie de la courbe de restitution [dans **le** cas où l'ensemble des points de mesure ne s'adaptent pas à une des courbes théoriques du réseaul. La qualité **des** résultats obtenus est tout à fait comparable à celle des paraniètres évalués par ajustement automatique.

Par ailleurs, en ficoulement radial, l'absence de formule analytique exacte impose pratiquement l'utilisation d'uii abaque.

Abaque cartésien

L'utilisation d'un abaque tracé dans des axes cartésiens impose un report multiple des points de mesure (pour chaque nouvelle estimation de la porosité effective qui modifie la graduation de l'axe des temps]. Il a cependant l'intérêt didactique de bien mettre en évidence l'influence **de** chaque paramètre.

Abaque semi-logarithmique

Un seul report des points **de** mesure suffit. la normation des concentrations est toutefois encore nécessaire : repérage de la concentration maximale (observée ou extrapolée) et division des concentrations observées par cette valeur extrême.

Abaque bi-logarithmique

Cette fois, concentrations et dates peuvent être reportées directement dans les unités de mesure. L'identification porte sur trois paramètres : dispersivité, porosité effective et amplitude.

Il semblerait toutefois **que** la commodité d'emploi accrue par **le** recours à une ou deux échelles logarithmiques soit accompagnée d'une **légère** perte de précision par rapport à l'utilisation d'abaques en échelles cartésiennes.

Mise à part l'interprétation d'un traçage au tritium, toutes **les** applications ont été réalisées avec interprétation par la méthode de l'abaque, qui s'est avérée la mieux adaptée.

6.10. - APPLICATIONS : COMPARAISON DE DIFFERENTS TRACEURS

Les restitutions de différents traceurs donnant un taux élevé de **res-**titution, injectés à **des** dates différentes mais sur ^{un} **même** parcours, ont été interprétés comparativement. Elles conduisent à des estimations voisines des paramètres et **se** caractérisent toutes par l'apparence d'un schéma "bicouche" ou du moins à *cheminements différenciés* : l'un très dispersif, l'autre moins. L'analyse par schéma bicouche de deux traçages différents conduit aussi à des paramètres très voisins pour chaque couche.

6.11. - APPLICATIONS : EFFET DE LA DISTANCE

La comparaison de deux séries de traçages réalisées chacune sur un **même site** mais à des distances différentes conduit à des conclusions semblables en écoulement uniforme et en écoulement radial : à proximité du puits d'injection, la courbe **de** restitution donne nettement l'impression d'un effet "multicoiiche" qui s'estompe avec l'**éloignement**. Aux distances plus élevées, **les** points de mesure s'adaptent parfaitement à une courbe théorique de l'abaque témoignant d'un schéma monocouche équivalent.

La dispersion croît d'abord avec la distance, puis semble **se** stabiliser. **Les** évaluations de porosité dépendent beaucoup moins de la distance.

6.12. - APPLICATIONS : EFFET **DE** LA DISPERSION TRANSVERSALE

Écoulement radial

En écoulement radial isotrope, la dispersion transversale est sans action sur la courbe de restitution dans un schéma hydrodispersif pur :

- en écoulement radial divergent, la symétrie **des** conditions aux limites interdit les gradients **transversaux**,
- **en** écoulement radial convergent, la divergence des particules de traceur sous l'effet **de** la dispersion transversale est compensée par la convergence des filets fluides.

Écoulement bidimensionnel uniforme

La dispersion transversale est sans effet sur la forme de la courbe de restitution mesurée sur l'axe ; elle agit toutefois fortement sur son amplitude (concentrations proportionnelles à $c_T^{-0,5}$).

Si faible que soit l'importance de cette dispersion transversale, la forme des courbes de restitution est différente de celle **que** l'on aurait vu en écoulement monodimensionnel. Les écarts deviennent très élevés pour les nombres de Peclet inférieurs à 10.

Lors de la mise en place des forages, une erreur angulaire sur la direction **de** l'écoulement nuit énormément à la qualité de la courbe de restitution : du fait **de** l'affaiblissement des amplitudes, **les** incertitudes sur **les** mesures prennent une grande importance.

6.13. - CONCLUSIONS POUR LA RÉALISATION DE TRACAGES EN FORAGES

Écoulement uniforme

Le traçage en écoulement uniforme est riche en enseignements, mais coûteux à réaliser. Il convient en effet d'effectuer des mesures dans différents forages réalisés sur un arc **de** cercle ou une normale à l'axe présumé de l'écoulement : pour obtenir une mesure d'intensité exploitable et aussi pour évaluer la dispersion transversale dans le plan horizontal.

Ce type de traçage sera plutôt réalisé à titre expérimental sur des crédits de recherche suffisamment étoffés.

Écoulement radial convergent

Le traçage en écoulement radial convergent vers un puits central avec injection dans un piézomètre satellite permet généralement d'utiliser des forages et du matériel existant : soit amené pour un pompage d'essai, soit déjà en cours d'exploitation sur un captage en service.

Ce mode d'expérimentation est particulièrement recommandable pour définir les mesures à prendre dans un tut de protection des captages destinés à l'alimentation humaine : les paramètres sont en effet évalués dans les conditions même d'exploitation.

La qualité d'un traçage de ce type est automatiquement contrôlée, car en l'absence de fixation tout le traceur injecté devrait **se** retrouver au forage central. La courbe de restitution permet donc d'évaluer directement **le** rendement **de** la mesure.

Deux critiques peuvent toutefois lui être opposées :

- **Il** est possible qu'à l'échelle de la mesure l'écoulement ne soit pas isotrope ; cette anisotropie peut fréquemment être contrôlée grâce à la présence de plusieurs piézomètres satellites autour des captages de quelque importance : on peut alors injecter un produit différent dans chaque puits et relever de concert **les** deux courbes de restitution.
- **Cette** méthode ne permet pas d'évaluer la dispersion transversale, mais **il** **semble**, d'après différents essais effectués; sur le terrain, que **le** rapport α_L/α_T de la dispersivité longitudinale à la dispersivité transversale soit assez peu variable, de l'ordre de 15 à 20. S'il en est, bien ainsi, la mesure **de** α_T devient superflue.

Cette méthode de l'écoulement radial convergent a fait l'objet **de** plusieurs dizaines **de** traçages sur des sites différents. **Elle** mérite d'être systhatisée au même titre que les mesures des caractéristiques hydrodynamiques **par** pompages d'essai, au cours desquels **elles** pourraient d'ailleurs être réalisées.

Etudes méthodologiques à poursuivre

Par ailleurs, pour assurer **le** bien fondé des schémas physiques admis, **il** conviendrait notamment, au cours d'études méthodologiques :

- de vérifier sur le terrain l'influence de la vitesse sur **le** coefficient de dispersion : la relation $D = c_1 u^n$, $n \neq 1$, maintes fois vérifiée en laboratoire, l'est-elle encore à l'échelle du terrain ?
- de mesurer la variabilité de α_L avec la distance dans des aquifères divers afin de mettre en évidence leurs échelles d'hétérogénéité **et** voir éventuellement comment ces échelles varient avec **le** type de terrain ,
- **de** réaliser d'autres mesures du rapport α_L/α_T pour s'assurer que sa valeur demeure effectivement comprise à l'intérieur d'une fourchette étroite.

L'étude systématique de milieux multistrates pour commencer, avec des hétérogénéités plus complexes ensuite, permettra peut-être de prévoir des caractéristiques moyennes de couche unique équivalente à attendre sur de grandes distances à partir des dispersivités et porosités mesurées localement et interprétées par des schémas multicouches.

La prise en compte d'échanges et l'extension aux écoulements en milieux fissurés sont également d'un grand intérêt. Ils nécessitent des expérimentations in situ et le développement de théories.

6.14. - EXTUAPOLATION DES MESURES

Les mesures effectuées et interprétées conduisent à des paramètres intrinsèques : la dispersivité et la porosité cinématique. **Ils** sont donc théoriquement extrapolables sur des distances supérieures à **celle** de la mesure, et dans des conditions d'écoulement différentes, sous la réserve du bien-fondé des hypothèses théoriques de base : validité de la loi $Q \propto u$, et mesures de α effectuées sur une distance supérieure à l'échelle maximale des hétérogénéités correspondant à la distance définie pour l'extrapolation.

Si ces conditions sont satisfaites, **il** suffit d'introduire **les** paramètres mesurés dans un modèle de simulation comportant par ailleurs les caractéristiques hydrodynamiques, **les** conditions aux limites et d'exploitation **de** la nappe que l'on veut étudier.

Ce problème peut être purement numérique : par différences finies ou éléments finis Ccf. par exemple LEISSI /31/), un modèle purement analytique comme **les** schémas en écoulement uniforme qui viennent d'être étudiés, ou un modèle mixte [différences finies pour l'hydrodynamique et solution analytique pour **les** problèmes de transfert : cf. SAUTY /46/]. Cette dernière méthode a l'avantage d'éliminer totalement la dispersion numérique, tout en respectant les hétérogénéités et les formes exactes des limites du domaine d'étude.

Si l'extrapolation est limitée à une zone où l'écoulement, **de** la nappe peut être considéré comme sensiblement uniforme, **les** abaques présentés dans cet ouvrage permettent de prévoir simplement **le** comportement hydrodispersif d'une pollution brève ou continue (**les** cas intermédiaires peuvent s'en déduire par des superpositions).

Le nombre de PÉclet est obtenu par division de la distance d'extrapolation de la mesure par la dispersivité mesurée. L'échelle des temps réels est déterminée par le produit $t = t_R \cdot \left(\frac{X}{L}\right)$. Le coefficient C_{\max} est choisi pour que la masse de traceur en circulation soit respectée.

Si le polluant est soumis à des échanges ou réactions diverses, ces phénomènes devront être pris en compte par modèle, avec des paramètres obtenus par d'autres méthodes de mesure ; cependant, les dispersivité et porosité resteront celles qui ont été déterminées avec un traceur "parfait".