

THÈSE

présentée pour l'obtention du Diplôme

de

Docteur-Ingénieur

à

l'Université Pierre et Marie Curie - Paris VI

et à

l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris

par

Alain DIEULIN



n° 8473

PROPAGATION DE POLLUTION DANS UN AQUIFÈRE ALLUVIAL L'EFFET DE PARCOURS

Soutenue le 30 Juin 1980

devant le jury composé de :

A. JAUZEIN	Président
B. BEAUDOIN	Examineur
L. W. GELHAR	Examineur
C. M. MARLE	Examineur
G. de MARSILY	Examineur
G. MATHERON	Examineur

RESUME

Le but de ce travail est l'étude de la propagation d'éléments en solution dans des milieux sédimentaires structurés. La majeure partie du propos porte sur le milieu alluvial, cible privilégiée des diverses pollutions.

Dans la nappe alluviale de la Marne, l'étude in situ des transferts de saumure, suite à une injection brève et ponctuelle de sel (NaCl), a permis d'identifier au sein du sédiment des guides quasiment indépendants d'épaisseur métrique et de grande extension horizontale. L'analyse séquentielle du sédiment, rendue possible par les logs de rayonnement γ de la formation, montre alors que ces cheminements préférentiels correspondent à la base perméable des séquences métriques du sédiment, qui sont par ailleurs observables sur des affleurements proches du site expérimental.

La quantification des propriétés dispersives de chacun de ces corps, localement plans, peut se faire à l'aide de solutions bidimensionnelles de l'équation classique de la dispersion. On détermine ainsi pour chaque tronçon de guide, un coefficient de dispersion longitudinal équivalent. Les valeurs obtenues pour ce paramètre, dans un même guide, semblent montrer une croissance avec la distance entre le point d'injection et celui d'observation ("effet d'échelle"). Cependant des écarts systématiques entre les solutions analytiques et les mesures suggèrent l'instabilité temporelle de ces coefficients.

Pour réduire ces différences, des solutions analytiques ont été calées sur une portion seulement des courbes expérimentales. Les coefficients de dispersion obtenus sont dits "partiels" et ont été attribués au point moyen de l'intervalle considéré : ce paramètre partiel est donc considéré comme une fonction de la distance et du temps. Les déterminations "partielles" effectuées en divers points, au sein d'un même guide, amènent à imaginer la seule dépendance temporelle du coefficient de dispersion partiel.

Dans le cas d'une injection ponctuelle et instantanée, l'application de l'équation classique de la dispersion, à un milieu homogène en écoulement plan, donne une répartition gaussienne du traceur dont la variance longitudinale est une fonction linéaire du temps, le coefficient de dispersion longitudinal étant égal à la moitié du facteur de proportionnalité. Les observations précédentes suggèrent de considérer la distribution du traceur dans un guide comme suivant une loi de Gauss à 2 dimensions et dont la variance longitudinale est le produit de $2t$ par une fonction du temps, qui est appelée loi temporelle de dispersion. Des abaques sont alors fournies pour la détermination pratique de cette fonction. L'application de cette formulation aux différents guides montre la généralité de cette représentation et permet ainsi de décrire précisément la propagation de traceur dans chacun d'eux.

La dépendance en temps de la fonction de dispersion, qui ne semble pas résulter d'une causalité première (à l'inverse de la diffusion moléculaire), traduit en fait une relation avec la distance parcourue par le point moyen du nuage de traceur : c'est l'"effet de parcours".

La formulation développée rejoint des études théoriques récentes (Gelhar et al, 1979 ; Matheron et al. 1980) qui portent sur des milieux infinis stratifiés. Malgré les milieux différents, de nombreuses analogies peuvent être trouvées entre leurs résultats et les observations effectuées : elles suggèrent l'origine probable des phénomènes observés notamment dans l'existence d'une variabilité interne du champ de vitesse (ou de la perméabilité) au sein des guides.

La prise en considération de résultats expérimentaux, résultant d'essais de traçage sur des milieux hétérogènes, tend à montrer la généralité de ces lois temporelles de dispersion : aussi bien sur le site expérimental de Bonnaud, que sur colonne en laboratoire, des essais ont amené des conclusions identiques ; cette expérimentation en laboratoire permet, de plus, l'étude de la dépendance en vitesse de la loi de dispersion, et aboutit à la détermination d'une forme intrinsèque de dispersion qui constitue l'outil principal de reconnaissance des propriétés dispersives d'un milieu hétérogène.

On est ainsi à même de proposer des méthodes pratiques d'étude d'un transfert d'éléments en solution en milieu poreux et la formulation théorique à employer pour sa quantification. L'extension de cette démarche est alors envisageable pour un domaine plus vaste, correspondant mieux au cadre d'une pollution éventuelle.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

Rappel sur la théorie classique de la dispersion.....	3
Limites de la théorie classique de la dispersion.....	11

PREMIERE PARTIE : TRACAGE EN MILIEU ALLUVIAL

I	Le site et le traçage	17
I.1	Le sédiment	17
I.2	Le site	21
I.3	Le traçage	21
II	Analyse qualitative	25
II.1	Diagraphies électriques	25
II.1.a	L'appareil de diagraphie	25
II.1.b	Le dispositif de mesure retenu	27
II.2	Le nuage de pollution	29
II.3	Structure du nuage de pollution	31
II.3.a	Caractérisation des guides	31
II.3.b	Les différents guides au forage 2	33
II.3.c	Continuité des guides entre les forages 2, 3 et 4	35
II.3.d	Caractéristiques des guides au forage 1.....	39
II.4	Organisation spatiale et caractéristiques temporelles des guides	43
II.5	Les guides sédimentaires	49
II.6	Le cheminement de la pollution	53
II.7	Schéma final de propagation de la pollution	57
III	Analyse quantitative	59
III.1	Premières caractéristiques du milieu	59
III.1.a	Transmissivités des guides.....	59
III.1.b	Conductivité et concentration	61
III.1.c	Données succinctes sur la pollution	62

III.2 Analyse quantitative globale	60
III.2.a Détermination des paramètres équivalents globaux.....	60
III.2.b Propriétés dispersives des guides (à partir des conductivités électriques in situ)	60
III.2.c Les courbes de restitution.....	8
III.2.d Conclusion de l'analyse globale.....	8
III.3 Analyse quantitative "partielle"	8
III.3.a Analyse "partielle" des guides	8
III.3.b Conclusion de l'analyse "partielle"	10
III.4 La loi temporelle de dispersion.....	10
III.4.a L'effet de temps	11
III.4.b Détermination pratique de la fonction de dispersion...	11
III.4.c Analyse des guides	12
IV Conclusion de la première partie.....	13

DEUXIEME PARTIE : L'EFFET DE PARCOURS

I Les approches théoriques	14
II Les formes intrinsèques de dispersion (Torcy).....	14
III Un autre site expérimental : Bonnaud	14
IV Essai sur colonne en laboratoire	15
IV.1 Théorie du milieu monodimensionnel	15
IV.2 Le dispositif expérimental	15
IV.3 Analyse de l'essai Al00-415	15
IV.4 Analyse de l'essai Al00-140	16
IV.5 Conclusion des différents essais sur l'échantillon Al00	17
V Conclusion	17

CONCLUSION	18
------------------	----

Liste des figures	18
-------------------------	----

Bibliographie	18
---------------------	----

Annexes

I Les diagraphies électriques	19
II Détermination de la fonction de dispersion	19
III La convolution en temps	19
IV La rétrodispersion	20

On admet habituellement que la propagation d'un traceur dans le milieu poreux saturé répond à la classique équation de la dispersion. Cette équation traduit notamment le fait que, dans le cas d'une injection brève et ponctuelle, la dispersion du nuage de traceur autour de son point moyen (qui suit sensiblement le mouvement de l'eau) peut être assimilée à un mécanisme de diffusion : les paramètres, qui caractérisent ce phénomène et qui relient les gradients de concentration au flux de traceur, sont les coefficients de dispersion.

Ces paramètres peuvent être mesurés en laboratoire par des essais sur colonne, et sur le terrain par des essais de traçage. On constate alors qu'il y a parfois des différences de plusieurs ordres de grandeur entre ces coefficients. Ceci présente un grave inconvénient pour la prédiction de la migration d'éléments. Une difficulté d'application supplémentaire est apparue sur le terrain, lorsqu'au cours d'un même transfert on s'est aperçu que les coefficients déterminés semblaient croître avec la distance du point d'injection à celui d'observation : c'est l'effet d'échelle. Des considérations théoriques montrent d'ailleurs que si le phénomène peut être décrit à une certaine échelle par une équation de diffusion, la prise en compte d'hétérogénéités d'ordre supérieur peut entraîner une représentation différente de la dispersion. Le changement de l'échelle des hétérogénéités rencontrées a donc été invoqué pour rendre compte de la croissance observée sur le terrain de la dispersivité (longitudinale) en fonction de la distance d'observation, et ceci dans divers milieux (Lallemand-Barrès et al, 1978 (fig. 1) ; Sauty, 1977).

Dans le cas du milieu alluvial, qui est de loin le plus concerné par des pollutions accidentelles, le sédiment ne peut être évidemment décrit comme une simple série d'hétérogénéités dont il conviendrait d'étudier la distribution spatiale ; il présente des structures bien précises dont l'extension peut être importante (paléolits) et dont on peut imaginer qu'elles détermineront largement les propriétés hydrodispersives du milieu. Suivant Lessi (1976), on est conduit à envisager le découpage du milieu en sous ensembles au comportement dispersif propre, dont il convient d'étudier séparément les effets.

C'est ainsi que, sur un site alluvial pris dans d'anciens méandres de la Marne (Torcy), nous avons d'une part reconnu l'organisation du sédiment et procédé d'autre part à un traçage par injection de sel. Les enregistrements effectués in situ ont conduit à des résultats expérimentaux dont l'interprétation ne pouvait se suffire des formulations habituelles.

Nous présenterons donc successivement, après un rappel de la théorie classique de la dispersion en milieu poreux, les modalités expérimentales, puis l'interprétation quantitative des résultats et enfin la mise en évidence et la généralisation de la fonction temporelle de dispersion correspondant à la notion nouvelle d'effet de parcours.

CONCLUSION

La nature et l'agencement des sédiments contrôlent la propagation de la pollution sur le site expérimental de Torcy : l'analyse séquentielle sédimentaire a mis en évidence des corps sédimentaires superposés dont la base perméable constitue un guide pour la propagation du nuage de traceur. Les caractéristiques dispersives de chacun d'eux sont alors représentables par une loi temporelle de dispersion dont nous avons mis l'existence en évidence.

De même l'étude, que nous avons menée sur les résultats expérimentaux d'un essai de traçage en laboratoire (Martin, 1971), a aussi montré l'influence de la structure sédimentaire de l'échantillon sur la migration du traceur. Dans ce cas aussi, une loi temporelle de dispersion correspond à chacun des horizons préférentiels.

Ces lois apparaissent ainsi à diverses échelles (intra-échantillons, séquence métrique alluvionnaire) : nous proposons de définir alors l'ordre d'une dispersion en relation avec l'ordre de la structure correspondante.

La notion de macrodispersion introduite jusqu'ici par certains auteurs (Gelhar, 1979) se conçoit aisément lorsque les différents éléments homogènes considérés dans le milieu ont une extension suffisante : dans les essais traités ici, de tels ensembles ne sont pas apparus. On pourrait restreindre l'usage de ce terme pour désigner un état intermédiaire entre deux ordres de dispersion ; lorsque le milieu est constitué d'un nombre réduit de corps où se produit une dispersion d'un certain ordre, il y a rarement émergence d'une loi temporelle de dispersion : les entités élémentaires sont alors trop peu nombreuses pour donner lieu à une véritable variabilité statistique interne du milieu.

L'étude de la dispersion de traceur, dans un milieu poreux saturé à écoulement plan, peut donc se faire grâce aux fonctions de dispersion, moyennant la reconnaissance de la structure de ce milieu. Cependant la prédiction de la propagation de traceur ne sera généralement possible qu'à l'aide de formes intrinsèques de dispersion (les éventuelles pollutions ne se produisant pas forcément pour une même vitesse d'écoulement) : il sera donc nécessaire d'effectuer des essais de traçage couvrant la gamme des régimes d'écoulement probables.

L'extension de la formalisation introduite devra être tentée pour des écoulements différents : notamment l'écoulement radial convergent ou divergent correspondant respectivement à un pompage ou à une injection d'eau dans un puits central. Ce cas de figure est le plus utilisé car facilement mis en oeuvre. On prendra alors soin de rattacher les lois éventuellement obtenues au cas de l'écoulement plan, qui est probablement plus proche d'un problème réel de pollution.

Le but ultime recherché est évidemment la liaison entre les grandeurs mesurées et la nature du milieu poreux. Les études théoriques récentes (Gelhar et al, 1979 ; Matheron et al, 1980) montrent la relation existant entre les fonctions de dispersion et les moments statistiques de la distribution de la vitesse de l'eau, pour un milieu infini stratifié. Le développement de ces théories dans le cas d'un milieu plan à variabilité bidimensionnelle permettrait de relier avec certitude les lois temporelles de dispersion et les caractéristiques physiques du milieu (notamment avec les premiers moments de la distribution de la vitesse ou encore de la perméabilité en son sein).

Ainsi dans un milieu poreux saturé, des expériences pratiques de traçage nous ont amenés à une remise en cause de l'utilisation de l'équation classique de la dispersion. Dans les milieux hétérogènes considérés, la variabilité interne des propriétés hydrodispersives est telle qu'une description déterministe est impossible : les formulations habituelles s'avèrent inadéquates et une représentation originale leur est substituée en introduisant les lois temporelles de dispersion. Ce nouvel outil d'analyse des propriétés dispersives du milieu poreux a vu sa généralité confirmée dans des cas expérimentaux très différents. On peut alors espérer la mise en évidence de telles grandeurs dans le cadre de domaines d'expérimentation plus larges, semblables à ceux concernés par des cas réels de pollution.

C'est ainsi que dans le cadre actuel de nos connaissances nous pouvons proposer une méthodologie pour la prévision de pollutions dans les aquifères alluviaux qui sont de loin les plus vulnérables. Le problème nous semble devoir être abordé comme suit :

- Reconnaissance des structures sédimentaires et de l'agencement entre eux des différents corps (sismique, diagraphies...)
- Réalisation d'expérience de traçage analogue à celle que nous avons réalisée. La mesure in situ est un point fondamental à conserver : des dispositifs expérimentaux ont été mis au point pour des traceurs physiquement non détectables dans le terrain (Pickens et al, 1978).

On pourrait cependant craindre une durée excessivement longue pour un traçage sur des distances importantes. On sera donc amené à développer une méthodologie pour l'étude de la dispersion dans les grands aquifères. Notamment des séries de traçages sur des distances plus courtes peuvent palier les difficultés : une étude précise de l'extrapolation des lois de dispersion devra donc être menée de pair. On peut aussi envisager de forcer l'écoulement localement : les formes intrinsèques de dispersion nous permettront alors de revenir à l'écoulement naturel.

Une approche expérimentale de la dispersion dans les grands aquifères alluviaux peut donc être raisonnablement envisagée. Les résultats expérimentaux montreront si des lois de dispersion peuvent alors apparaître. L'extension de notre formulation à des milieux très différents suggère cette possibilité. Si tel est le cas, la prévision de la propagation des pollutions, dans des cas réels, aura grandement progressé.