



PROGRAMME HYDROLOGIQUE INTERNATIONAL

Rencontres Hydrologiques Franco-Roumaines

*Contribution au Programme Hydrologique International
organisée par les comités nationaux français et roumain
de l' AISH et du PHI*

sous le patronage de
l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques

avec le soutien
du Ministère Français de l'Environnement,
du Ministère Roumain de l'Environnement
et de
l'Association Naturalia & Biologia

Edité par

J.P. Carbonnel, A. Danchiv, P. Hubert et V. Oancea

Communications

Ecole des Mines de Paris , 2-5 septembre 1991

UNESCO, Paris 1992



Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'UNESCO aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

Comité d'organisation:

Dan CAPRITA, Bucarest
Jean Pierre CARBONNEL, Paris
Alexandru CONSTANTINESCU, Bucarest
Pierre HUBERT, Fontainebleau
Thierry LEVIANDIER, Antony
Victor OANCEA, Bucarest

avec, pour le secrétariat,
l'aimable assistance de Roseline CARBONNEL

Comité scientifique:

Bruno AMBROISE, Strasbourg
Claude BOCQUILLON, Montpellier
Dan CAPRITA, Bucarest
Jean Pierre CARBONNEL, Paris
Alexandru CONSTANTINESCU, Bucarest
Alexandru DANCHIV, Bucarest
Radu DROBOT, Bucarest
Pierre HUBERT, Fontainebleau
Thierry LEVIANDIER, Antony
Emmanuel LEDOUX, Fontainebleau
Shaun LOVEJOY, Montreal
Ghislain de MARSILY, Paris
Victor OANCEA, Bucarest
Radu POPA, Bucarest
Daniel SCHERTZER, Paris
Viorel STANESCU, Bucarest
Georges VACHAUD, Grenoble

Secrétariat des Rencontres:

Jean Pierre CARBONNEL
Laboratoire de Géologie Appliquée
Université Pierre et Marie Curie
Case 123, 4 Place Jussieu
75252 Paris Cedex 05

Téléphone 33 1 44 27 63 26
Télécopie 33 1 44 27 51 25
Telex UPMCSIX 200 145 F

T A B L E D E S M A T I E R E S

S O M M A I R E	page 3
L I S T E des participants	page 7
C O M M U N I C A T I O N S	page 11
A D R E S S E S et I N D E X des auteurs	page 421



S O M M A I R E

Thème I : **TRANSFERT ET DISPERSION DE MATIERE ET D'ENERGIE EN MILIEU SOUTERRAIN.**

G. de MARSILY - Quelques réflexions critiques sur la modélisation du transport de polluants en milieux poreux.....p.13

I-1 : **Problèmes méthodologiques et numériques**

P. ACKERER et M.A BUES - Simulation numérique du transfert de chaleur dans un milieu naturel saturé et non saturé..... p.37

Y. BENDERITTER, B. ROY et A. TABBAGH - Implications des transferts thermiques à l'écoulement en milieu fissuré : première approche.....p.47

A. DANCHIV, D. CAPRITA, H. MITROFAN et M. TUDOR - Quelques problèmes concernant l'analyse numérique d'un bassin géothermique.....p.57

H. ENE - Effets de l'anisotropie sur la convection libre dans une plaque verticale introduite dans un milieu poreux... p.65

P. HUBERT, P. OLIVE et H. MOLICOVA - Modélisation par une loi Gamma de la distribution des temps de séjour de l'eau dans les systèmes hydrologiques en régime permanent.....p.71

L. de LOPE - Couplage éléments finis-éléments frontière : une technique efficace pour la modélisation des écoulements régionaux.....p.79

A. TENU - Contribution des isotopes du milieu dans la modélisation mathématique des eaux souterraines.....p.87

C. THIRRIOT - Image des phénomènes d'hystérésis fondée sur les réseaux capillaires.....p.95

I-2 : **Impacts anthropiques**

C.CONSTANTINESCU et A. DANCHIV - Modèle numérique d'un système aquifère régional.....p.103

M. MANESCU et I. BICA - La percolation des polluants pétroliers vers les nappes aquifères.....p.109

G. TOMESCU - Considérations sur le stade de la pollution des eaux phréatiques sur le territoire de la Roumanie : la vulnérabilité à la pollution des aquifères phréatiques.....p.117

Thème II : **HYDROLOGIE OPERATIONNELLE**

V.A. STANESCU - Hydrologie opérationnelle.....p.125

II-1 : **Mesures, modèles et prévision**

G. COUZY, J.P. DUPOUYET et J.J. VIDAL - La modernisation de l'annonce et de la prévision des crues dans le bassin de la Garonne.....p.143

R. DROBOT - Hydrogramme unitaire variable avec l'intensité de la pluie.....p.153

R. DROBOT et I. IORGULESCU - Modèle pluie-écoulement et identification de ses paramètres hydrologiques.....p.159

S. EVEN et M. POULIN - Un modèle hydraulique de la Seine à l'étiage.....p.167

P. SERBAN et C. CORBUS - Modèle DANUBIUS pour la prévision hydrologique sur le secteur roumain du Danube.....p.177

P. SERBAN, M. SIMOTA et V. PLESA - Modèle VIDRA de prévision des crues.....p.185

P. STANCIU et A. STANCIU - La modélisation mathématique du processus de l'écoulement sur des versants et sur de petits bassins.....p.193

V.A. STANESCU - Un modèle de redistribution de l'eau dans le sol, utilisé pour améliorer le modèle SSARR, appliqué au calcul de la précipitation effective dans le cas de crues successives.....p.201

I. ZLATE-PODANI - Considérations sur la modélisation mathématique des systèmes hydrologiques.....p.209

Posters :

F. ARMAND et J. SCHWARTZ - La banque de données PROPHETE.....p.217

P. LEYMARIE et J. FAIRFIELD - L'estimation rapide des puissances disponibles à partir d'images SPOT, en vue de l'installation de petites centrales hydro-électriques.....p.223

I. SANDOIU et STANCALIE - Evaluation et surveillance par télédétection des réserves d'eau de la couche de neige.....p.231

II-2 : **Impacts anthropiques**

C. COSANDEY et P. BERNARD-ALLEE - Conséquences d'une coupe forestière sur les crues et sur l'érosion des versants.....p.237

T. MUXART, M.C. GUERRINI et M.J. PENVEN - Impacts des changements d'usage du sol sur la qualité et la quantité de l'eau des rivières dans le bassin parisien.....p.249

P. ROMAN, R. POPA, M. MANOLIU et M. MAIORESCU - Modélisation de certains effets sur l'environnement générés par l'exploitation des canaux Danube-Mer Noire.....p.253

H. VIVIAN - Impacts des actions anthropiques sur les hydro-systèmes alpins: exemple l'hydrologie des Alpes françaises du nord (bassin du Rhône).....p.263

II-3 : Pluies et débits extrêmes

B. BOBEE et F. ASHKAR - Représentation des événements hydrologiques extrêmes de crue par les distributions statistiques.....p 271

D. DEVRED, D. BEROD, V. LAGLAINE et B. STANCULESCU - Application des méthodes PMP-PMF à des bassins versants alpins suisses..... p.279

GUILLOT - Structure de la relation stochastique non-linéaire averse-crue . Conséquences pour l'estimation des crues extrêmes.....p.289

T. LEVIANDIER - Distributions de débits déduites d'une version probabiliste de modèles pluie-débit.....p.299

Poster :

M. MARGOUM et G. OBERLIN - AGREGEE : premiers résultats.....p.307

Thème III : VARIABILITE SPATIALE ET NON LINEARITE

C. BOCQUILLON - La complexité de l'hydrologie.....p.319

III-1 : Variabilité spatiale

S. BLIDARU et V. OANCEA - Analyse de sensibilité du modèle Stanford IV. Etude d'échelle spatiale de la modélisation.....p.337

J.P. CARBONNEL, P. HUBERT, S. BAINA et T. BARIAC - Analyse géostatistique à l'échelle kilométrique de champs de précipitations journalières en climat soudano-sahélien.....p.347

J.P. JORDAN et I. IORGULESCU - Problèmes d'échelle dans les relations pluie-débit d'un petit bassin versant.....p.355

III-2 : Variabilité non linéaire

C. BOCQUILLON et R. MOUSSA - Caractérisation fractale d'une série chronologique d'intensité de pluie.....p.363

C. BOCQUILLON, R. MOUSSA, S. CATAFAGO et W. NAJEM - Analyse de l'agglomération des séquences d'occurrence de pluie dans l'hypothèse d'un modèle markovien.....p.371

P. HUBERT - Analyse multifractale de champs temporels d'intensité des précipitations.....p.379

G. LANG et J.M. AZAIS - Irrégularité locale des trajectoires de processus . Etude par simulation de divers estimateurs.....	p.387
T. LEVIANDIER et M. ZIAJA - Filtrage empirique non linéaire sur un modèle conceptuel pluie-débit.....	p.393
Y. TESSIER, S. LOVEJOY et D. SCHERTZER - Analyse objective multifractale du champ de pluie globale.....	p.401
G. VACHAUD, M. VAUCLIN, J.L. THONY, R. LATY, B. GARINO et L. VILAIN - Etude in situ des pertes en eau et en azote sous culture de maïs et sous sol nu.....	p.413

L I S T E D E S P A R T I C I P A N T S

ACKERER P. I.M.F., Strasbourg .

ALBU M. Inspection d'état pour les ressources
minérales, Bucarest .

ANASTASIU L. Institut de Génie civil, Bucarest .

AMBROISE B. C.E.R.E.G., Strasbourg .

BADARANG M. Université de Paris VII, Paris .

BENDERITTER Y. Centre de recherches géophysiques,
Pouilly sur Loire .

BICA I. Faculté d'hydrotechnique, Bucarest .

BOCQUILLON C. L.H.M., Montpellier .

BOUJAMLAOUI Z. U.P.M.C., Paris .

CAPRITA D. I.C.I.M., Bucarest .

CARBONNEL J.P. C.N.R.S., U.P.M.C., Paris .

CHAHIR K. C.E.M.A.G.R.E.F., Antony .

CONSTANTINESCU A. Aquaproiect, Bucarest .

CORBUS C. I.M.H., Bucarest .

COSANDEY C. C.N.R.S., laboratoire de géographie
physique, Meudon .

COUDRAY J. Université de la Réunion, Saint-Denis .

DACHARRY M. Université de Lille, Villeneuve d'Ascq .

DAGAN G. Université de Tel Aviv .

DANCHIV A. I.C.I.M., Bucarest .

DAVIGO J. G.R.E.F., Paris .

DESURONE I. C.E.M.A.G.R.E.F., Lyon .

DEVRED D. E.P.F.L., Lausanne .

DROBOT R. Institut de Génie civil, Bucarest .
DUPOUYET J.P. Service de la navigation, Toulouse .
ENACHESCU D. Université de Bucarest .
ENACO A. Bucarest .
ENE H. Institut de mécanique, Bucarest .
EVEN S. C.I.G., Ecole des mines de Paris,
Fontainebleau .
GHEORGHIESCU P. Ministère de l'environnement, Bucarest .
GHERGUT I. I.M.H., Bucarest .
GUILLOT P. Ingénieur-conseil, Grenoble .
GURBAN I. C.I.G., Ecole des mines de Paris,
Fontainebleau .
HUBERT P. C.I.G., Ecole des mines de Paris,
Fontainebleau .
JACQUET G. R.H.E.A., Versailles .
IORGULESCU I. E.P.F.L., Lausanne .
JORDAN J.P. E.P.F.L., Lausanne .
JOUVE D. C.N.R., Lyon .
KAPFER A. R.H.E.A., Versailles .
KHAMMARI B. Institut National Agronomique, Alger .
LADOY P. Météo-Erance, Paris .
LANG G. E.N.G.R.E.F., Paris .
LEDOUX E. C.I.G., Ecole des mines de Paris,
Fontainebleau .
LEVASSEUR L. Compagnie Générale du Rhone, Lyon .
LEVIANDIER T. C.E.M.A.G.R.E.F., Antony .
LOPE L. de C.I.G., Ecole des mines de Paris,
Fontainebleau .
LOVEJOY S. Mc Gill University, Montreal .
MAKHOLOUF Z. C.E.M.A.G.R.E.F., Antony .
MANESCU A. Bucarest .

MANESCU C. Institut de génie civil, Bucarest .
MARGOUM M. C.E.M.A.G.R.E.F., Lyon .
MARSILY G. de U.P.M.C., Paris .
MOUSSA R. L.H.M., Montpellier .
MUSY A. E.P.F.L., Lausanne .
MUXART T. C.N.R.S., laboratoire de géographie physique, Meudon .
NACHTNEBEL M. Université de Vienne .
NORMAND M. C.E.M.A.G.R.E.F., Antony .
OANCEA V. I.M.H., Bucarest .
OPPENEAU J.C. S.R.E.T.I.E., Ministère de l'environnement, Paris .
OTTULESCU D. Bucarest .
PETITJEAN M. Université de Paris VII, Paris .
POPA R. Institut polytechnique, Bucarest .
POULIN M. C.I.G., Ecole des mines de Paris, Fontainebleau .
ROBIN P. I.N.R.A., Thivernal-Grignon .
SCHMITT F. Météo-France, Paris .
SERBAN P. Ministère de l'environnement, Bucarest .
SERVAIN S. Ecole des mines de Paris, Fontainebleau, C.N.R.S., Meudon .
SIMOTA M. I.M.H., Bucarest .
SIRCOULON J. O.R.S.T.O.M., Paris .
SOKONA M. E.N.D.A.T.M., Dakar .
STADIU F. Eaux Roumaines, Bucarest .
STANCALIE G. I.M.H., Bucarest .
STANCIU A. I.M.H., Bucarest .
STANCIU P. I.M.H., Bucarest .
STANCULESCU B. E.P.F.L., Lausanne .

STANESCU V.A. I.M.H., Bucarest .
STROET C. te U.P.M.C., Paris .
TABBAGH A. Université de Paris VI, Paris .
THIBODEAUX M. Université de Louisiane, Baton Rouge .
THIRRIOT C. E.N.S.E.E.I.H., Toulouse .
TOMA A. C.I.G., Ecole des mines de Paris,
Fontainebleau .
TOMESCU G. I.M.H., Bucarest .
TRIBOULET J.P. C.I.E.H., Ouagadougou .
VAUCLIN M. Institut de mécanique, Grenoble .
VIDAL J.J. Service de la navigation, Toulouse .
VIOLETTE S. U.P.M.C., Paris .
ZLATE-PODANI I. I.M.H., Bucarest .

THEME I

TRANSFERT ET DISPERSION DE MATIERE
ET D'ENERGIE EN MILIEU SOUTERRAIN

QUELQUES REFLEXIONS CRITIQUES SUR LA MODELISATION DU TRANSPORT DE POLLUANTS EN MILIEUX POREUX

MARSILY G. de, Laboratoire de Géologie Appliquée
Professeur à l'Université Paris VI
URA CNRS 1367

INTRODUCTION ET RESUME

Le problème de la compréhension et de la prévision du déplacement des éléments en solution dans les milieux poreux est devenu depuis quelques années un sujet important du fait de la contamination croissante des eaux souterraines peu ou moyennement profondes par les activités humaines.

L'effort de recherche a initialement porté sur l'étude des phénomènes de dispersion des éléments conservatifs, c'est à dire ne subissant pas d'interactions avec le milieu solide traversé; ce type de problème est caractéristique d'une pollution ponctuelle dont on cherche à prévoir la propagation dans l'espace, et la façon dont la dispersion en réduit la concentration au cours du temps. Alors qu'en laboratoire, la caractérisation de la dispersion est possible par un coefficient qui n'est fonction que du milieu, de la vitesse du fluide et du coefficient de diffusion moléculaire, il s'avère que sur le terrain, la complexité du champ des vitesses réelles engendre un effet dispersif complexe qui est fonction de la distance parcourue par l'élément transporté, au moins initialement, et qui est très difficilement prévisible.

Les efforts de recherche ont ensuite porté sur l'étude de la rétention éventuelle des éléments par le milieu traversé; il s'agit de prendre en compte le rôle de "filtre" que peut jouer le sol pour réduire la concentration et la vitesse de propagation des polluants. Les métaux ont fait l'objet des premiers travaux, suivis par les polluants organiques hydrophobes, et plus récemment par les éléments à l'état colloïdal. Un cortège de connaissance est aujourd'hui disponible, pouvant aller jusqu'à rendre possible la modélisation de l'ensemble de la spéciation géochimique de la solution; les constantes thermodynamiques, les cinétiques de réaction, les paramètres caractérisant les propriétés géochimiques du milieu sont en principe accessibles en laboratoire, mais en fait généralement assez mal connues; cependant le problème de la variabilité spatiale de ces propriétés et de son estimation reste posé. L'accessibilité des fractions chimiquement actives par les éléments transportés par l'écoulement oblige à se pencher sur les concepts de double porosité des milieux, à toutes échelles.

La généralisation récente des problèmes de pollution diffuse, le plus souvent d'origine agricole (engrais, fumures par les déjections d'élevages intensifs, produits phytosanitaires...), a conduit à poser avec acuité les problèmes de la dégradation et de la transformation bactérienne des éléments organiques dans leur transport dans le sous-sol; une part importante de ces processus a lieu dans la tranche superficielle des sols, qui est soumise aux aléas climatiques, aux changements dans les pratiques agricoles (assolements, états hivernaux, profondeurs du travail du sol, enfouissement des chaumes, compaction par les engins...) et aux états hydriques et d'oxydo-réduction; la complexité des phénomènes mis en jeu rend toute prévision dans ce domaine hasardeuse, alors que ces pollutions diffuses sont probablement celles qui menacent de la façon la plus préoccupante la qualité des eaux souterraines sur l'ensemble du territoire.

Le comportement des éléments polluants non miscibles a fait l'objet de nombreux travaux, concernant surtout les hydrocarbures, ou encore les produits organo-chlorés denses. Ce type de pollution est généralement assez localisé, son étude vise à développer des moyens de lutte et de réhabilitation des sites pollués, les techniques à l'étude portent sur la biodégradation in situ, l'extraction par ventilation dans un courant d'air, l'extraction par solvants ou par tensio-actifs dans l'eau, la combustion ou la pyrolyse in situ; le devenir de la fraction soluble des composés initiaux, de leurs métabolites ou produits de dégradation thermique ou chimique, ou encore des adjuvants utilisés, est souvent l'un des problèmes les plus préoccupants de ce type de travaux.

On passera brièvement en revue, dans le texte ci-après, quelques uns des problèmes évoqués tout au long de cette introduction.

LA DISPERSION HYDRODYNAMIQUE

Formalisme Eulérien.

Il est classique, en hydraulique, de définir deux types de vitesses, les vitesses Eulériennes et les vitesses Lagrangiennes; nous commencerons par nous placer dans une définition Eulérienne des vitesses, qui sont les plus usuelles. Ce sont celles que l'on définit, observe ou mesure en des points FIXES de l'espace; ce sont les seules vitesses qu'il est possible de déterminer expérimentalement en milieu poreux, soit par essais directs (par exemple la dilution ponctuelle en forage), soit par mesures indirectes (par exemple valeur du gradient hydraulique et de la perméabilité). Il est classique de dire que la dispersion hydrodynamique est la conséquence de l'hétérogénéité du champ des vitesses Eulériennes par rapport à la moyenne d'espace de ce champ de vitesses, qui est celle que l'on utilise dans le terme convectif de l'équation classique du transport en repère Eulérien (par exemple BEAR, 1972, 1979; MARSILY, 1981, 1986), qui s'écrit à une dimension d'espace :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(d \frac{\partial c}{\partial x} - uc \right) = \omega \frac{\partial c}{\partial t} \quad (1)$$

où : c est la concentration volumique,
d est le Coefficient de dispersion hydrodynamique,
u est la vitesse Eulérienne de DARCY de l'écoulement,
ω est la porosité cinématique du milieu.

La difficulté pour définir en pratique le coefficient de dispersion provient simplement de la nécessité de changer d'échelle quand on passe de l'échelle du laboratoire à celle du terrain. Supposons en effet que l'on sache, par mesure en laboratoire sur échantillon, déterminer expérimentalement le coefficient de dispersion qui caractérise le transport à l'échelle décimétrique, par exemple; pour passer à une échelle supérieure, on devra moyenner (dans l'espace géométrique ou dans l'espace des réalisations, si on raisonne en milieux aléatoires) les grandeurs définies localement et les équations du transport. Montrons par exemple comment s'établissent les équations moyennes à l'échelle supérieure en utilisant la méthode de perturbation (GELHAR, AXNESS, 1983).

Soit le développement des fonctions c et u autour de leurs valeurs moyennes, à l'échelle supérieure :

$$c = C + c' \quad \text{avec } c' \text{ de moyenne nulle} \quad (2)$$

$$u = U + u' \quad \text{avec } u' \text{ de moyenne nulle} \quad (3)$$

On suppose que d est un coefficient de dispersion local connu, on substitue c et u dans l'équation (1) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[d \frac{\partial}{\partial x} (C + c') - (U + u')(C + c') \right] = \omega \frac{\partial}{\partial t} (C + c') \quad (4)$$

Soit E() l'opérateur prise de moyenne; on peut le définir comme une moyenne spatiale : E(A) est alors une intégrale d'espace de la fonction A sur un volume fini, ou même sur un volume infini si on pondère, dans l'intégrale, la fonction A par une fonction d'espace dont l'intégrale est l'unité; on peut aussi, et c'est plus usuel, définir E(A) comme la moyenne d'ensemble de la fonction aléatoire A dans l'espace des réalisations (voir MARLE 1967, MARSILY 1986); on a:

$$E(c) = E(C + c') = E(C) + E(c') = C$$

$$E(u) = E(U + u') = E(U) + E(u') = U$$

car par définition E(c') = E(u') = 0 et E(C) = C, E(U) = U. De plus, E(A) est un opérateur linéaire qui va commuter avec les opérateurs différentiels en espace ou en temps, que sa définition soit spatiale ou aléatoire :

$$E \left[\frac{\partial A}{\partial \alpha} \right] = \frac{\partial}{\partial \alpha} [E(A)]$$

On applique l'opérateur E() à l'équation (4), il vient:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[d \frac{\partial C}{\partial x} - UC - E(u'c') \right] = \omega \frac{\partial C}{\partial t} \quad (5)$$

On retranche cette équation de l'équation (4) il reste:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[d \frac{\partial c'}{\partial x} - U c' - u' C + E(u' c') \right] = \omega \frac{\partial c}{\partial t} \quad (6)$$

Tout est dit ! Il y a, dans l'équation (5), un terme nouveau, $E(u'c')$, qui est a priori inconnu et provient seulement du changement d'échelle; c'est la moyenne du produit des fluctuations de u et de c dans l'espace, on l'appelle une covariance croisée. Pour l'évaluer, il va falloir résoudre (6), car même si on sait caractériser les variations u' de la vitesse autour de sa moyenne U , on ne peut prédire les variations c' de la concentration c autour de sa moyenne C , car la concentration est l'inconnue du problème. Mais, nouveau problème, pour résoudre (6) nous avons besoin de connaître C et $E(u'c')$, ou tout au moins leurs gradients, donc d'avoir résolu (5) ! Ce problème, a priori sans solution, est dit "problème de fermeture"; pour résoudre quand même l'équation supplémentaire nécessaire pour changer d'échelle, il faut faire des hypothèses simplificatrices pour calculer une solution approchée de (6) qui donnera le terme $E(u'c')$ nécessaire à la résolution de (5). GELHAR et AXNESS (1983) on fait l'hypothèse que $(\text{grad } C)$ n'était une fonction ni de l'espace ni du temps, grâce à quoi ils ont obtenu pour $E(u'c')$ un terme de la forme $(-D' \text{grad } C)$, après des pages et des pages de calcul et d'hypothèses. Ce terme s'ajoute donc au terme de dispersion locale de (5) $(+d \text{ grad } C)$, donnant un coefficient de dispersion à l'échelle supérieure égal à $(d+D')$. Ces auteurs sont même capables de donner un expression de ce coefficient D' , qui est fonction du temps et des propriétés statistiques du champ de vitesse u , en particulier la covariance de u' et son anisotropie.

DAGAN et NEUMAN (1992) ont cependant montré que l'hypothèse de base de la fermeture n'était pas justifiée, et que l'expression de GELHAR et AXNESS (1983) n'était valable que pour les temps grands. GRAHAM et McLAUGHLIN (1989) proposent, dans le même esprit, d'estimer les moments de u' , selon certaines hypothèses de fermeture, afin de pouvoir estimer non seulement la concentration moyenne, C , mais aussi son incertitude par les moments de la variation c' , par exemple la variance ou la covariance de c' ; ils proposent aussi de conditionner les solutions des équations (5) et (6) par les mesures locales Eulériennes de u dans l'espace. McLAUGHLIN (1992) étudie aussi des solutions numériques itératives de (5) et (6) où on approche peu à peu les termes inconnus. NEUMAN (1990) suggère une approche auto-similaire de la croissance de la dispersivité avec la distance. NEUMAN et ORR (1992) proposent, pour l'équation de l'écoulement, un formalisme basé sur l'utilisation des fonctions de Green.

On peut conclure de cette brève revue que :

-(i) Le coefficient de dispersion à l'échelle supérieure est une fonction du temps, et dépend beaucoup plus de la fluctuation dans l'espace du champ de vitesse, sur des dimensions décimétriques à kilométriques, que de la dispersion locale, que l'on saurait, quant à elle, mesurer en laboratoire ou sur le terrain à petite échelle (expériences de traçage sur courtes distances par exemple); ce coefficient

de dispersion devrait tendre vers une valeur constante pour des temps grands. Nous verrons plus précisément au paragraphe suivant quelle est la signification de ces valeurs élevées du coefficient de dispersion à grande échelle, qu'il ne faudrait pas confondre avec un pouvoir de dilution très élevé du milieu.

-(ii) L'estimation a priori de ce coefficient demande d'estimer les fluctuations du champ de vitesses à grande échelle, chose pour le moins difficile; quelques cas (2 à 3) dans le monde entier ont été suffisamment instrumentés pour mesurer le champ Eulérien dans de nombreux forages (par estimation de la perméabilité locale, par exemple au moyen d'essais d'injection d'eau en forage avec mesures au micro-moulinet); ces cas ont semblé montrer que les formules approchées utilisées pour résoudre le problème de fermeture seraient acceptables (SUDICKY, 1986; REHFELDT 1988); il n'y a cependant pas assez d'exemples pour dire si cela est fortuit ou réel. De très nombreux travaux théoriques sont actuellement publiés (et probablement encore à venir), qui obtiennent (ou obtiendront peut-être) des résultats différents en faisant de subtiles hypothèses différentes pour la résolution du problème de fermeture.

-(iii) La difficulté est énorme, dans la pratique, pour choisir quelle est la meilleure hypothèse pour traiter un cas réel donné, et surtout pour mesurer les paramètres qui représentent le milieu (covariance du champ de vitesses Eulérien). Ce qui est sûr, c'est qu'une expérience de traçage unique sur de faibles distances ne sert à rien, à moins qu'elle ne soit faite à l'échelle du transport que l'on voudrait prévoir, ce qui est inopérant dans la pratique; on peut dans certains cas mettre quelque espoir dans l'utilisation de traceurs environnementaux anthropiques ou naturels qui auraient été répandus dans l'environnement à une date reculée, et permettraient de caler un coefficient de dispersion empirique sur un historique à l'échelle du transport à prévoir.

-(iv) En l'absence de mieux, les praticiens en sont hélas réduits à utiliser une règle empirique, à savoir que pour une distance de transport à prévoir de x , la dispersivité à utiliser est $x/10$, tout en sachant que cette règle est fautive, n'est fondée sur aucune théorie, mais semble ressortir des traçages disponibles, quel que soit le type de milieu (voir par exemple LALLEMAND-BARRES et PEAUDECERF, 1978, GELHAR, 1986, HOEHN et SANTOSCHI, 1987). Nous examinons plus loin le sens à donner à ce coefficient.

Approche Lagrangienne.

Le champ de vitesse Lagrangienne est celui que l'on définit, que l'on observerait ou mesurerait le long d'une trajectoire de l'écoulement; pour un point de départ donné, la vitesse est donc une fonction du temps seulement. Il est évident que cette vitesse n'est pas mesurable en milieux poreux, puisque, ces milieux étant opaques, on ne peut observer quelle est la trajectoire dans l'espace, et donc encore

moins quelle est la vitesse le long de cette trajectoire. Tout au plus peut-on observer, sur un traçage, la vitesse moyenne entre les points de départ et d'arrivée, sans connaître les fluctuations de la vitesse le long de cette trajectoire. Il est évident qu'en milieu poreux, la diffusion transversale (ou dispersion hydrodynamique transversale locale) va faire qu'un élément en solution, même injecté de façon ponctuelle, ne va pas suivre une seule trajectoire, mais traverser le milieu en "bavant" sur un ensemble de trajectoires contiguës. La dispersion à grande échelle va donc être fonction de la variabilité spatiale de la vitesse Lagrangienne, c'est à dire de trajectoires partant de points de plus en plus éloignés au fur et à mesure que la distance parcourue est élevée.

Le modèle de transport Lagrangien est particulièrement simple; il s'écrit (par exemple MATHERON et MARSILY, 1980) :

$$X(t) = X_0 + \xi_t + \int_0^t V(X(\tau)) d\tau \quad (7)$$

où : $X(t)$ représente les coordonnées d'une "particule" de traceur ou de polluant lâchée en X_0 à $t=0$;
 $V(X(t))$ est la vitesse Lagrangienne de la particule au temps t , à l'emplacement $X(t)$ où elle se trouve;
 ξ_t est un terme de dispersion ou diffusion locale, isotrope ou non, représenté généralement par un mouvement Brownien.

On peut montrer que ce modèle Lagrangien de transport est équivalent au modèle Eulérien présenté plus haut, si les paramètres des deux modèles se correspondent, en champ de vitesse régulier; la variance σ_t^2 de la position X de la particule est liée au coefficient de dispersion d par :

$$d = \frac{1}{2} \frac{\partial \sigma_t^2}{\partial t} \quad (8)$$

Le changement d'échelle s'effectue par calcul des premiers moments de la position X de la particule; sous certaines hypothèses, en particulier que le champ de vitesse Eulérien soit à divergence nulle (DIEULIN et al, 1981), on trouve alors que le tenseur de dispersion équivalent donné par (8) est de la forme :

$$d = \int_0^t \text{Cov } V(\tau) d\tau \quad (9)$$

où $\text{Cov } V$ est la matrice de covariance du champ de vitesse Lagrangien du milieu.

On retrouve ici la dépendance du tenseur de dispersion du temps et des fluctuations du vecteur vitesse; cette formulation, soumise à des hypothèses beaucoup plus légères car ne nécessitant pas d'hypothèses de "fermeture", est cependant inopérante en pratique car le champ de vitesse Lagrangien ne sera jamais accessible à la mesure, sans parler de sa covariance ! Cette expression, plus rigoureuse que celles obtenues par les méthodes Eulériennes, montre de façon ex-

plicité que ces dernières ne peuvent être qu'approchées, puisqu'il n'y a jamais identité entre les deux champs de vitesse, et donc que la covariance de l'un ne peut être estimée par la covariance de l'autre : les méthodes Eulériennes ne sont jamais que des succédanés. Cette approche Lagrangienne montre de plus que toute modification du champ de vitesse va modifier le coefficient de dispersion : il est donc irréaliste de proposer un traçage expérimental avec un dispositif d'écoulement radial (pompage dans un puits, pour accélérer les vitesses par exemple), puis d'utiliser la dispersivité obtenue pour un autre champ de vitesse, uniforme en écoulement naturel par exemple, puisque les covariances seront par définition entièrement différentes. La dispersion n'est pas une caractéristique du milieu poreux seul, mais une caractéristique du champ de vitesse imposé à un milieu donné.

Il y a lieu de revenir un instant sur la signification des coefficients de dispersion équivalents obtenus par les méthodes Eulériennes ou Lagrangiennes sur des distances de déplacement importantes. A l'échelle d'une colonne de laboratoire, la dispersion traduit le mélange du traceur à travers le "front" de propagation, par rapport à un écoulement piston, sur le diamètre de la colonne, quand on analyse le flux sortant de cette colonne. A plus grande échelle, il traduirait de même le mélange du "front" de propagation, si la surface d'observation du passage du traceur augmentait dans la même proportion que la distance à la source. Ainsi par exemple, si le déplacement d'un polluant injecté ponctuellement dans un aquifère se fait sur 1 km, un coefficient de dispersion équivalent permettra de prédire l'évolution de la concentration MOYENNE si l'on prélevait le flux sortant sur une largeur par exemple de 100 m; il ne permettra en revanche pas de prévoir la concentration "ponctuelle" que l'on pourrait rencontrer sur une "veine" de polluant empruntant un cheminement particulier le long d'une hétérogénéité de perméabilité du milieu. Ceci se comprend facilement à partir de la formulation Lagrangienne (7) du transport : si $X(t)$ représente les coordonnées d'une "particule" de traceur, la variance σ_t^2 de la position X représente l'incertitude sur la position de cette particule au long de son déplacement, calculée par moyenne d'ensemble sur les réalisations possibles du milieu. Pour un milieu unique donné, la "particule" n'occupe bien sûr qu'une seule position, c'est l'incertitude de cette position par manque d'information que traduit la variance; le coefficient de dispersion équivalent que l'on obtient par (8) ou (9) a donc la même signification. Il n'y a équivalence entre cette dispersion et le "mélange" que l'on observe sur une colonne de laboratoire que si, par ergodicité, moyennes d'espace et moyennes d'ensemble deviennent équivalentes. Ceci n'est obtenu que si l'injection du polluant est réalisée non pas en un point, mais sur une ligne de grande extension perpendiculaire à la direction d'écoulement, avec collecte du flux sur une ligne d'extension équivalente ou supérieure. SALANDIN et al. (1992) ont montré que des distances très importantes sont nécessaires pour obtenir cette ergodicité.

Pour une injection ponctuelle, le coefficient de dispersion équivalent ne permet donc pas de prévoir la concen-

tration du polluant in situ. C'est très regrettable, car pour des problèmes de protection de l'environnement, c'est justement la connaissance de la concentration d'un polluant in situ qui permettra de dire si une norme est dépassée ou non après une certaine longueur de migration.

L'approche Booléenne.

La divergence entre approches Eulérienne et Lagrangienne peut être illustrée simplement par la notion de "court-circuit". Supposons que le transport dans un aquifère donné soit susceptible de se produire de façon très rapide au sein d'un petit nombre de "courts-circuits", représentés par exemple par des chenaux plus perméables, ou des fractures, ou des strates particulières. Rechercher ces "courts-circuits" par un examen des vitesses Eulériennes est a priori voué à l'échec, puisque, si ces "courts-circuits" sont peu nombreux, une recherche même systématique de leur emplacement n'a que peu de chance d'aboutir, même si ici ou là une zone à forte vitesse peut être détectée : il sera toujours impossible de dire, en champ Eulérien, si deux zones à fortes vitesses sont connectées et forment un "court-circuit" continu; il suffit, pour s'en convaincre, de se rappeler la difficulté de la prospection d'eau en milieu karstique, il est quasiment impossible de retrouver des conduits karstiques dans l'espace, sauf si des conditions par exemple structurales permettent de les localiser a priori; et une fissure même localement élargie n'est pas nécessairement connectée au réseau karstique principal conducteur. Au contraire, dans une approche Lagrangienne, le long d'une trajectoire rapide, les "courts-circuits" vont être, en quelques sortes, en série, les zones à forte vitesse jouant le rôle de "drains" pour attirer vers elles les trajectoires venant des zones amont déjà plus conductrices. Si le champ de vitesse Lagrangien était accessible, le problème des "courts-circuits" ne se poserait pas.

Une approche qui permet d'engendrer des champs de vitesse Lagrangien prenant en compte la connectivité des zones conductrices est la simulation (au sens de Monte Carlo) de répartition Booléenne "d'objets" dans l'espace, sensés représenter des zones particulières du milieu (voir par exemple HALDORSEN et DAMSLETH, 1990). On peut par exemple décrire un sédiment comme une répartition aléatoire de corps sédimentaires aux formes prédéterminées (parallélépipède, ellipsoïde, croissant...) dans une "matrice" continue moins perméable; ou encore un milieu fissuré peut-il être simulé par une répartition aléatoire de disques dans l'espace (voir par exemple CACAS et al, 1990).

On remplace alors la difficulté de prédire la covariance d'un champ de vitesse Eulérien ou Lagrangien par celle de savoir décrire la géométrie des corps sédimentaires ou des fractures (ou de tout autre hétérogénéité), de façon stochastique. On suppose connaître les propriétés dispersives locales, et le changement d'échelle est résolu numériquement par la simulation de Monte Carlo, en utilisant généralement une représentation Lagrangienne du transport (déplacement

convectif de particules associé à une dispersion locale par marche au hasard). On obtient évidemment autant de réponses au problème que l'on a simulé de champs, mais ceci permet de calculer les moments statistiques des grandeurs caractérisant le transport, par exemple la moyenne et la variance du champ de concentration dans l'espace et dans le temps, ou la distribution cumulée des temps d'arrivée du polluant. La difficulté est de savoir caractériser la forme et les dimensions des objets booléens dans l'espace, de façon statistique, à partir d'observations aux affleurements ou en sondage.

Certaines recherches vont même jusqu'à simuler non pas les corps sédimentaires eux-mêmes, mais les processus de transport fluvial et de sédimentation/érosion des dépôts (KOLTERMAN et GORELICK, 1990, 1992). Cependant ces méthodes booléennes ou génétiques ne permettent pas le conditionnement par les stratigraphies (ou fracturations) reconnues en sondage ou à l'affleurement, c'est à dire que les milieux simulés ne reproduisent pas fidèlement les fractures ou les faciès observés aux sondages de reconnaissance.

GALLI et al. (1987), MATHERON et al. (1988), GUERILLOT et al. (1990) ont proposé, pour permettre le conditionnement des structures sédimentaires simulées par les observations aux puits, une méthode nouvelle basée sur des simulations de faciès de roches par la méthode des Gaussiennes seuillées. Cette méthode a pour l'instant été utilisée dans l'industrie pétrolière mais pas pour prévoir le transport des polluants. Il semble que ce type d'approche, qui permettrait de prendre en compte d'autres types de données, par exemple les données de géophysique telles que la tomographie sismique ou les cartes de résistivité apparente, soit plus prometteur à terme que la recherche à tout prix de coefficients de dispersion à partir d'estimations sujettes à caution, du point de vue théorique comme du point de vue pratique, des fonctions de covariance du champ de vitesses. Une approche voisine a cependant été utilisée pour représenter les alluvions quaternaires de la rivière Limmat près de Zürich et y calculer l'écoulement et le transport de traceurs (FURGER, 1990).

TRANSPORT D'ELEMENTS REACTIFS

Rétention ou retard des métaux.

La première approche utilisée, encore d'actualité, est de définir l'interaction entre un métal en solution et la matrice solide par un coefficient de partage entre la quantité du métal présente en solution et celle fixée par le solide. Ce coefficient peut être supposé indépendant de la concentration (isotherme dite linéaire), ou dépendant d'elle (isothermes de Freundlich, de Langmuir). La fixation peut être réversible ou non, instantanée ou non. Les modèles de transport savent inclure sans difficulté ce type d'interaction, qui est considéré comme acceptable dans le cas d'un métal unique en concentration très diluée, c'est à dire inférieure d'un ordre de grandeur au moins à celle des autres

cations de la solution (voir par exemple MARSILY, 1981, 1986, SARDIN et al., 1986, BORKOVEC et al., 1991, SIGG, STUMM, BEHRA, 1992). La mesure du coefficient de partage (ou de distribution) K_d est, en général, faite en laboratoire en "batch" sur échantillon remanié, bien qu'une mesure in situ ou à défaut en colonne non remaniée en laboratoire soit de loin préférable; en effet, le remaniement (ou pire, le broyage) peut rendre accessible à la solution (et donc à l'adsorption) des surfaces minérales qui sans cela ne le seraient pas. Ce type d'interaction conduit à un retard dans la migration de l'élément adsorbable, par rapport à la vitesse d'un élément conservatif; on constate que les minéraux argileux ou les oxydes métalliques jouent un rôle majeur dans ce type de rétention. Dans le cas de l'adsorption linéaire, réversible et instantanée, on montre que ce partage entre phases solide et liquide conduit simplement à introduire un "coefficient de retard" R par lequel on divise la vitesse de l'écoulement : tout se passe comme si la vitesse de transport convectif par le fluide se trouvait réduite par un facteur R dans l'équation de transport, tous les autres termes gardant la valeur qu'ils avaient pour un élément "conservatif". On pourrait donc déterminer le transport d'éléments non conservatifs en évaluant d'abord celui d'un élément conservatif, par exemple un bon traceur, puis en déterminant en laboratoire le facteur de retard, et enfin en appliquant le "coefficient de retard" au terme convectif de l'équation de transport.

Trois difficultés viennent restreindre l'applicabilité de cette approche. (i) Chaque élément en solution est supposé se déplacer indépendamment du reste des éléments transportés, et interagir seul avec le milieu; en réalité, l'ensemble des éléments présents dans le milieu vont interagir. (ii) Il est nécessaire de connaître dans l'espace la valeur des coefficients empiriques K_d à utiliser, donc de multiplier les points de mesure, ce qui est lourd. (iii) L'hypothèse de simple réduction de la vitesse convective par le facteur de retard, tous les autres paramètres restant inchangés, est contredite par des phénomènes observés tels que l'exclusion anionique ou la différence de nature des phénomènes d'adsorption entre métaux.

Sur le premier point, la réponse a été d'utiliser d'abord des coefficients de sélectivité de plusieurs éléments migrant ensemble dans le milieu, auxquels on associe une capacité d'échange maximum du milieu, la Capacité d'Echange Cationique (CEC) : on résout ainsi de façon couplée autant d'équations de transport qu'il y a d'éléments cationiques transportés, une fixation par autant d'équations de sélectivité qu'il y a d'éléments moins un, et l'équation d'équilibre des charges traduisant la capacité d'échange du milieu (voir par exemple VALOCCHI et al, 1981). La deuxième réponse est d'utiliser un modèle de spéciation géochimique couplé au modèle de transport, supposant soit l'existence d'un équilibre thermodynamique au sein du milieu, soit postulant une cinétique de réaction du premier ordre dont les coefficients seraient connus (voir par exemple COUDRAIN-RIBSTEIN, 1988, JAUZEIN et al., 1989, YEH et TRIPATHI, 1989, CHUPEAU, 1991). Non seulement les réactions entre les différents éléments contenus dans le fluide sont prises en compte, mais aussi