



HAL
open science

Modélisation des écoulements et du transport dans les milieux fortement hétérogènes et fracturés

Jean-Raynald de Dreuzy

► **To cite this version:**

Jean-Raynald de Dreuzy. Modélisation des écoulements et du transport dans les milieux fortement hétérogènes et fracturés. Hydrologie. Université Rennes 1, 2008. tel-00339504

HAL Id: tel-00339504

<https://theses.hal.science/tel-00339504>

Submitted on 18 Nov 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

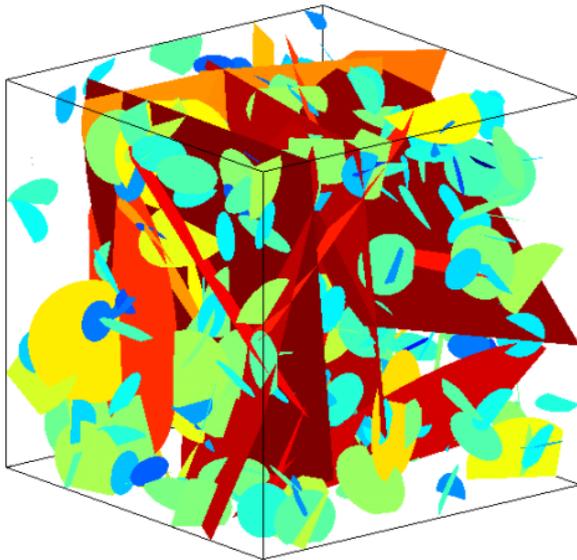
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation des écoulements et du transport dans les milieux fortement hétérogènes et fracturés

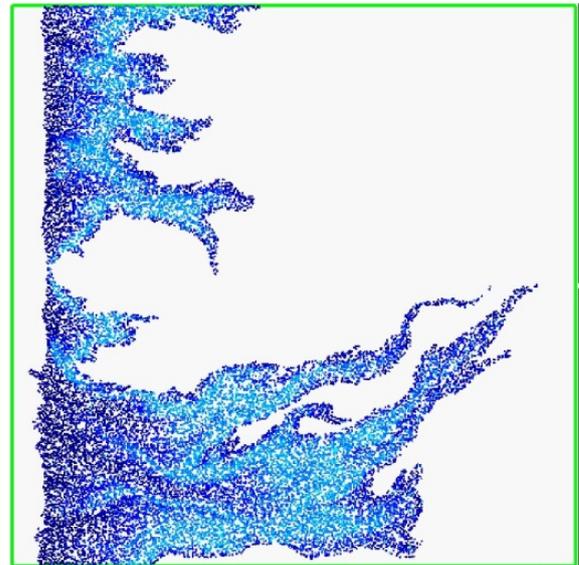
Jean-Raynald de Dreuzy

Habilitation à Diriger des Recherches
Université de Rennes 1

13/10/2008



Réseau de fractures synthétique



Transport physico chimique

Table des matières

1	<i>Preface</i>	1
1.1	Modeling approaches of fractured media.....	1
1.2	Inverse problem for highly channeled flow structures.....	3
1.3	Discrete dual-porosity models.....	3
1.4	Solute transport.....	4
1.5	Efficient numerical methods	4
1.6	Mid- to long-term perspectives: Modeling laboratory experiments and field-scale flow and transport	5
2	<i>Introduction</i>	6
2.1	Approche classique	6
2.2	Approche alternative	7
2.3	Organisation des travaux de recherche	9
3	<i>Synthèse des travaux réalisés</i>	12
3.1	Ecoulement dans les milieux fracturés	12
3.1.1	Contexte	12
3.1.2	Influence des longueurs et corrélations de fracture sur les écoulements.....	12
3.1.3	Simulateur 3D d'écoulement	15
3.2	Transport inerte dans les milieux hétérogènes	17
3.2.1	Organisation du champ de vitesse	17
3.2.2	Simulations sur de grands domaines	18
3.2.3	Conséquences sur les lois de transport macroscopiques.....	18
3.3	Transport réactif dans les milieux hétérogènes	20
3.3.1	Simulation du transport chimique de solutés	20
3.3.2	Effet de la sorption non linéaire hors d'équilibre sur le transport en milieu homogène.....	21
3.4	Interprétation des essais de puits	22
3.4.1	Identification des modèles de milieux induisant des rabattements non classiques.....	22
3.4.2	Application au site de Ploemeur	23
3.5	Autres travaux de recherche	23
3.5.1	Caractérisation de la fracturation sur site.....	24
3.5.2	Base de données de l'ORE H+	24
3.5.3	Perméabilité des sols induite par l'activité lombricienne	24
4	<i>Programme de recherche</i>	25
4.1	Modèles de réseaux de fractures 3D (matrice imperméable)	25

4.1.1	Simulateur d'écoulements 3D.....	25
4.1.2	Etude des règles de changement d'échelle.....	26
4.1.3	Caractérisation de la chenalisation	27
4.1.4	Détermination a priori du type d'écoulement sur le terrain.....	29
4.2	Modèles de milieux fracturés 2D et 3D (matrice perméable).....	29
4.3	Transport inerte dans les milieux naturels.....	32
4.3.1	Détermination numérique des lois de transport	32
4.3.2	Influence de la structuration du champ de vitesse sur le transport	33
4.4	Transport réactif	34
4.4.1	Lois de transport dans les milieux très hétérogènes en présence d'adsorption non linéaire hors d'équilibre	34
4.4.2	Influence de la dispersion sur le mélange.....	35
4.5	Essais transitoires dans les milieux fracturés	35
4.5.1	Essais de puits	35
4.5.2	Flowmétrie	36
4.5.3	Essais de traceurs	36
4.6	Intégration de la morphologie des milieux dans le problème inverse	36
4.7	Développement de méthodes numériques	38
4.7.1	Transport réactif dans un maillage quelconque.....	39
4.7.2	Parallélisation du calcul des écoulements dans les milieux fracturés.....	39
4.7.3	Exécutions Monté-Carlo sur une grille de calcul	39
4.7.4	Mise en place d'une base de données des résultats synthétiques	39
4.8	Développement d'une plateforme logicielle pour l'hydrogéologie	40
5	Conclusion.....	41
6	Références.....	43
7	Activités annexes	47
7.1	Enseignements.....	47
7.2	Diffusion de la culture scientifique	48
	<i>Modèle analogique montrant le fonctionnement des aquifères</i>	<i>48</i>
8	Production scientifique.....	49
8.1	Liste des articles publiés dans des revues à comité de lecture	49
8.2	Conférences invitées.....	50
8.3	Conférences avec proceedings	50
8.4	Autres conférences	51
8.5	Indices bibliographiques	53
9	Articles.....	54
9.1	Fractured media.....	54

9.2	Non-classical transient tests interpretation.....	54
9.3	Transport and dispersion	54
9.4	Numerical methods.....	54
9.5	Others (groundwater database and earthworm studies)	54

1 Preface

I would have liked that this preface could give the Ariadne's thread out of natural fracture networks. By default, I hope that it will be strong enough to lead you into the approach underlying this "synthesis". It will be followed by a more organized presentation of my past and projected research activities and by the articles to which I contributed. This summary is a personal un-reviewed explanation of the research activities to which I contribute. However it is also the result of constant works and discussions with the colleagues and students of Rennes beginning with the stimulating and contradictory exchanges with *Philippe Davy*.

My research activities have been focused first on fractured media and more recently on highly heterogeneous media with the guideline of finding the relationship between geometrical small-scale structures and hydraulic large-scale properties. I have been more focused so far on the complexity of the geological and geometrical structures than on the physical-based complexity induced by non-linear phenomena like multiphase flows or reactive transports.

1.1 Modeling approaches of fractured media

In fractured media, observations disclose both geometrical and hydraulic complexities. The geometrical complexity stems first from the broad-range fracture length distribution. The hydraulic complexity can be related to the high flow channeling, the dependence of permeability with scale and some anomalous behavior of transport. If the first intuition is to relate them, the understanding of their relationship requires a theoretical framework conditioning their eventual usefulness for field modeling. Homogenization techniques as well as percolation theory have been classically proposed as reference frameworks. I argue in the next paragraph that none of them is well suited for fractured media.

Homogenization techniques including classical geostatistical approaches, volume averaging and effective media for example are a-priori precluded because of the absence of an obvious characteristic scale, fractures occurring potentially at all scales of interest. It is furthermore in contradiction with extremely channeled flows within a fraction of fractures. Not all fractures are effectively conductive, only a very few carry most of the flow. The flow structure may remain highly channeled in a few fractures on a large range of scales. Consequences on the bulk hydraulic properties are pervasive. Permeability and dispersivity increase genuinely with scale and not only because of sampling effects [*Hunt*, 2003]. The scale dependence of permeability results from the increasing probability of finding connected paths going around larger low permeability zones [*de Dreuzy et al.*, 2001c; 2002]. The principle is similar to that of the volatile fractals like the percolation backbone at threshold where the flow structure evolves continuously with scale [*de Dreuzy et al.*, 2001a; *Hermann and Stanley*, 1984]. If percolation theory seems to be consistent with their outcome of channeling and scaling effects, its fundamental assumptions are not met in fractured media. Percolation theory is a statistical theory assuming that all elements or fractures here are equal whereas longer fractures are intuitively more important than smaller ones [*Stauffer and Aharony*, 1992]. If some elements emerge in percolation theory as key structures like red links, it is only due to their position within the flow structure and not because of their own properties. Breaking the statistical equivalence of the basic elements induce fundamental inconsistencies on all the percolation predictions on system properties [*Bour and Davy*, 1997; 1998; *Darcel et al.*, 2003b; *de Dreuzy et al.*, 2000].

Even if homogenization-like and percolation theories are opposite theories, they are both appealing because based on very simple principles. The core of homogenization is to derive

physical properties by integrating the contribution of the system elements. The integration weights the importance of the elements according to their own property as permeability or velocity and to their position in the correlation structure. On the opposite, key objects arise in percolation theory and determine by themselves the physical phenomena. For example, flow is solely determined by the backbone and when introducing a permeability distribution on the links, flow is determined by the even more sparse red links as shown by the critical path analysis [Charlaix *et al.*, 1987]. It seems that fracture networks are in between these two endmost theories. On the one hand, homogenization-like theories are too much integrative and dilute to much the contribution to flow on all elements. On the other hand percolation theory localized to much the information on infinitely sparse structures.

Both of these approaches have been extended for fractured media and have led to the continuous and discrete approaches. The continuous approach is an extension of homogenization-like theories in which more complex correlation structures like nested correlations have been introduced [Neuman, 2005]. The approach of percolation theory has been overtaken in some ways by the Discrete Fracture Network approach. It introduces fractures of different shapes and lengths and could mimic natural fractured networks in a loose stochastic sense. Both “extensions” have advantages and drawbacks. The continuous approach is effective in the sense that it can be implemented on field cases. However the permeable structures as well as the flow channels are not as focused as what observations disclose. The discrete DFN approach is statistically similar to the observed field structures but is conditioned by a too large number of parameters to be implemented in field conditions. Oversimplifying the dilemma, choosing between the continuous and the discrete approaches consists in choosing between an effective unrealistic approach and an ineffective realistic approach.

We have already worked on looking for intermediary approaches through the use of equivalent hydraulic methods different from the homogenized model. Well tests on the fractured aquifer of Ploemeur show non-classical drawdown responses that can be modeled by non-integral hydraulic models [Le Borgne *et al.*, 2004] (*PhD of Tanguy Le Borgne, 2002-2004*). If parameters like the flow dimension or the anomalous diffusion exponent can be extracted, they cannot be used in site-scale models as their relation to the medium heterogeneity has not been established [de Dreuzy *et al.*, 2004b; de Dreuzy and Davy, 2007]. However they could be a blueprint of the flow patterns that would be used as parameterization for the inverse problem. A major advantage of the DFN approach is its ability to get closer to the characterization of the network organization both in statistical and mechanical terms. This advantage is at the onset of the approach developed by *Philippe Davy and Olivier Bour*. Key features of the mechanical genesis of the fractures may have a critical influence on their hydraulic properties like in the connection rules between fractures. These studies are still ongoing with *Caroline Darcel at ITASCA* and give strong indications of the fundamental typical geometrical and flow patterns we intend to use further in the inverse problem.

Part of my actual and near-future research activities aim at implementing the two intermediary approaches described in the two next chapters. The first approach consists in introducing in the classical inverse problem information on channeling structures through parameterization. The second approach consists in building “discrete dual-porous media” by homogenizing part of the fractured media in an equivalent matrix medium and retaining the most determinant fractures as a discrete fracture network.

1.2 Inverse problem for highly channeled flow structures

The inverse problem presented in this section corresponds first to large-scale site-scale studies and secondly to small-scale hydraulic test interpretations.

The effectiveness of the continuous approach depends much on the practice of the inverse problem. Even if the inverse problem is ill-posed because of the too few knowledge for a too heterogeneous system, it leads to results regardless of the real field heterogeneity. Its success and relevance increase however when introducing additional “hard” and “soft” information like localized permeability values and geological settings, which can be used in initial guesses, regularization terms and parameterization strategies. Starting from the observation of high flow channeling in fractured media, we set up a new parameterization based on hierarchical channels (*PhD of Romain Le Goc, 2007-2009*). Channels are inserted into a homogeneous medium by decreasing order of importance to fit steady or transient head values. Each channel characteristics are determined by solving an inverse problem. We use a stochastic inverse method, simulated annealing, because of the irregularity of the objective function coming from the different nature of the channel characteristics (position, orientation, extension and transmissivity). We are currently testing the method on synthetic 2D fracture networks. One of the main objectives is to determine what kind of information can be extracted from heads at scales smaller than the typical distance between wells. We are thus working on the sensitivity of heads on the channel structure.

More generally, we aim at determining the relation between the settings of acquisition of the data (hydraulic test configuration for example) and the sensitivity of the flow-bearing structure. Promising data are first the responses to doublet tests. The idea is to use doublet tests rather than well tests for characterizing the inter-well transmissivity structure (outcome of the *master thesis of Alexandre Boisson, 2007*). In principle, because of the linearity of the flow equation, the information contained in a doublet test is identical to that contained in the well tests. However the way the information is extracted from the hydraulic test data is non linear. As doublet tests increase the sensitivity on the interwell heterogeneity, they could yield interesting information at scales smaller than the typical well distance. This will be tested on the “MACH-1” benchmark set up by *Jacques Bodin* on a karstic carbonate site of Poitiers equipped with a large number of wells and adapted to a detailed inverse problem. Another promising source of data is flowmetry as it also localizes the information. We will especially focus on the abilities of flowmetry to give a blueprint of typical flow patterns that could be used for the parameterization of the inverse problem (*Collaboration with Olivier Bour and Tanguy Le Borgne*).

1.3 Discrete dual-porosity models

The objective is to set up a new modeling framework accounting equally and consistently for both the fracture characteristic complexity and the fracture/matrix duality. We call it the discrete dual-porosity fracture network. “Discrete dual-porosity” models are the superposition of a discrete fracture medium and of a continuous heterogeneous porous medium made up of the porous matrix and of the smaller fractures (*PhD of Delphine Roubinet, 2008-2010*). Beyond the development of this model, we aim at understanding the influence of the fracture network structure on the exchange between fracture and matrix at block scale. The critical flow localization recurrently observed in fractured media is likely to be of major importance for the quantity of flow exchanged between fracture and matrix and for the transport of solutes potentially diffusing in the matrix.

Practically, the discrete dual porosity model consists of a superposition of two overlapping media. The “fracture” medium consists of the major fractures represented as discrete features like in the classical Discrete Fracture Network approach. The “matrix” medium includes all other fractures of less influence to the main flow structure and the non-fractured surrounding porous medium. This method leads to a substantial simplification of the fracture network while retaining the observed flow channeling in some fractures. However, it requires some kind of inclusion of the less important fractures in the “matrix” medium. To this end, we develop a new operational homogenization method, the “Equivalent Hydraulic Matrix” (EHM), based on the linear relation between head and flow and designed to keep the salient structure of the less important fractures.

This model is meant both as an intermediary approach for fractured media as a way to understand the fracture-matrix exchanges at the network scale.

1.4 Solute transport

Another consequence of the intermediary position of fractured media between homogenization-like models and percolation-like models is that transport is neither completely classical nor completely anomalous. Transport in these heterogeneous media cannot be directly derived from a theoretical approach but must be first simulated with numerical means. Because of the complexity of transport, I began first with inert transport in percolation clusters [*de Dreuzy et al.*, 2001a] and in highly heterogeneous media with *Anthony Beaudoin* (post-doc at INRIA, 2005 and now at the University of Le Havre) [*de Dreuzy et al.*, 2007]. These studies are aimed at finding the large-scale asymptotic dispersion behaviors and at relating them to some properties of the correlation structure. In parallel to these large-scale studies, the idea is to develop smaller-scale fine analyses of the velocity correlation structure and to relate them to the large-scale transport behaviors (*Collaboration with Tanguy Le Borgne*).

My second direction of work on solute transport concerns reactive transport first by setting up numerically efficient simulation tools for large-scale porous and fractured media. This work began with the *PhD of Katia Besnard (2001-2004)* and is still ongoing. The ultimate goal is to define the interactions between heterogeneity and reactivity and their consequences on upscaled chemical properties. One of the parameters of reactivity is the mixing that we intend to study more precisely with Tanguy Le Borgne with the help of the previous numerical method which interest is to separate spreading from mixing.

1.5 Efficient numerical methods

All these studies require numerical tools both flexible to be used in different contexts and efficient to cope with large domains finely discretized. The numerical developments are the outcome of the collaboration with *Jocelyne Erhel* (INRIA) initiated in my PhD. We have focused for the next coming years on the development of 3D simulation tools both for fractured and porous media requiring large-scale and parallel computations. For fractured media, the first step consists in solving the flow equation on fracture networks at the scale of the fractures with non-matching grids at fracture intersections (*Post-Doc of Géraldine Pichot, 2008-2009*). The continuity of flow and head on intersection is ensured by using Mortar-like methods. The second step is the parallelization of the simulations requiring the choice of effective linear system solvers (*PhD of Baptiste Poirriez advised by J. Erhel*). The challenge is to maintain scalability by optimizing the repartition of the fractures on the processors of the cluster and by minimizing communications between processors. This could be improved by

using domain decomposition methods like Aïtken-Schwarz (*Collaboration with Damien Tromeur-Dervout, University of Lyon*).

Our second direction concerns the development of a numerical platform for simulation of hydraulic phenomena in heterogeneous media. Our objective is to set up an open and flexible platform that can be used efficiently in the different projected cited above but also possibly in other context by different people. This is a small revolution of shifting from “quick and dirty” codes to stable and documented software. The type of property rights and development strategy are not fixed yet, but will probably be oriented towards GPL-like licenses.

1.6 Mid- to long-term perspectives: Modeling laboratory experiments and field-scale flow and transport

A significant part of my research activities will remain the identification of the relations between geometrical and hydraulic pattern in fractured and highly heterogeneous porous media and their use for helping to solve the inverse problem. Among others, a key aspect remains the simulations in 3D, which requires on the top of theoretical guidelines the development of efficient numerical methods.

The three principal outcomes of my past and present activities are the determination of upscaling rules, the definition of inverse problem methodologies and the development of numerical simulation means. Upscaling and inverse problem are complementary as upscaling filters out heterogeneities while the inverse problem identifies local geological or hydraulic structures. In ever shorter terms, inverse problem is a downscaling method. My two main perspectives are to integrate experimental results for upscaling and field results for the inverse problem (downscaling).

Laboratory experiments indicate the relevant physical phenomena to account for in numerical modeling. They give both the assumptions of numerical upscaling models and a way of validation. The fracture-matrix exchange experiments conducted by *Yves Méheust and Jean de Brémond d’Ars* give an example of the adopted methodology. The experiments show the importance of buoyancy in the fracture-matrix exchanges (*PhD of Laure Michel 2004-2008 and Jérémy Bouquain 2008-2010*). They will be complemented by pore-scale numerical simulations using lattice-boltzman methods to derive local-scale exchange laws that can be used in larger-scale models (collaboration with *Laurent Talon, FAST Orsay*).

Following up the research on the inverse problem, I intend to integrate the modeling of field experiments in my research activities. It is strongly linked to the development of new observation methodologies and devices conducted by *Olivier Bour*. Development of interpretation means are a common project with *Tanguy Le Borgne*.

These perspectives are more or less logical continuations of my actual activities. They are consistent with the approach of integrating more geological information and new sources of observations in the modeling of flow and transport at the field scale. Its drawback is to put the ultimate objective of field-scale modeling at the end of the approach rather at its onset. In caricatured terms, it is aimed at improving modeling but for what? The modeling requirements are different for nuclear waste storage, groundwater management or CO₂ sequestration both in terms of physical and chemical phenomena and precision. We are going slightly to this direction with the analysis of vulnerability in crystalline aquifers (*PhD of Etienne Bresciani 2008-2010 and ANR MOHINI*). I intend to go further in getting more insight into field-scale modeling and into the applications of hydrogeology in order to increase the relevance of our way of developing models.

2 Introduction

2.1 Approche classique

Classiquement, la modélisation des phénomènes d'écoulement et de transport dans les milieux souterrains se déroule en trois étapes :

- La première étape est la mesure des propriétés hydrauliques telles que la perméabilité ou la dispersivité en quelques points du milieu où ont été forés des puits.
- Comme les mesures ne donnent des valeurs qu'en quelques points éparpillés dans le domaine, la deuxième étape consiste à inférer les valeurs des propriétés hydrauliques dans tout le domaine. L'inférence du modèle de milieu, i.e. de la valeur des paramètres hydrauliques en tout point, s'appuie sur une hypothèse forte concernant la structure du milieu. Par exemple, le modèle de structure de milieu le plus simple est le modèle homogène dont les propriétés caractéristiques sont des moyennes pondérées des valeurs mesurées sur le terrain. Pour les milieux hétérogènes, l'outil d'inférence le plus utilisé est la géostatistique qui donne en effet un modèle de milieu à partir des valeurs des paramètres en quelques points et d'une hypothèse sur la structure du champ de paramètre.
- La troisième étape est la simulation des écoulements et du transport soit analytiquement dans les cas simples, soit numériquement dans les cas plus complexes et la validation du modèle sur des expériences de terrain complémentaires.

La qualité du modèle augmente d'une part avec le nombre de puits forés sur le terrain où peuvent être mesurées directement les propriétés hydrauliques et d'autre part avec la pertinence de l'hypothèse retenue sur la structure du milieu généralement dictée par la connaissance de la géologie du site. L'approche géostatistique est efficace car elle donne un modèle dans tous les cas en revanche elle a les désavantages suivant :

- La géostatistique suppose la stationnarité, ce qui n'est pas systématiquement le cas des milieux naturels. En particulier, les milieux fracturés ne sont généralement pas stationnaires à cause (i) de la différence de perméabilité entre les fractures et la matrice, (ii) de la présence de fractures de toutes tailles allant des fractures microscopiques de la taille du grain aux failles kilométriques traversant de part en part le domaine étudié et (iii) de la structure de corrélation fractale de la répartition des fractures.
- La géostatistique nécessite une grande quantité de mesures des propriétés hydrauliques, donc un grand nombre de puits sur le terrain (au minimum une quarantaine). Cette méthode est donc onéreuse étant donné le coût de forage des puits, c'est pourquoi elle est essentiellement utilisée pour la modélisation des champs pétrolifères, du stockage des déchets nucléaires et de quelques aquifères de première importance.
- La qualité du modèle repose en grande partie sur le choix de la structure du milieu (homogène, hétérogène avec une échelle d'homogénéisation, ...). Ce choix est d'autant plus déterminant que la quantité de mesures directes est faible. Il conditionne *a priori* de façon inconnue la précision du modèle et ne peut pas être validée *a posteriori*, d'où son importance dans la modélisation. Pour déterminer l'erreur consécutive au choix de l'hypothèse de structure, il faudrait soit connaître le milieu complètement, soit disposer de l'ensemble des modèles de structures cohérents avec les données de terrain.

2.2 Approche alternative

Il existe une approche alternative pour les milieux fracturés auxquels l'équipe d'hydrogéologie de Géosciences Rennes s'intéresse depuis une quinzaine d'années. Nous étudions également depuis quatre ans les milieux poreux hétérogènes et les phénomènes physico-chimiques complexes dans les milieux hétérogènes suivant la même approche.

Objectifs. L'objectif de l'approche alternative proposée est de modéliser les écoulements et le transport de solutés à partir des spécificités géométriques des milieux géologiques. Pour les milieux fracturés, il s'agit d'intégrer la grande variété de fractures de différentes tailles et perméabilités. L'hétérogénéité du milieu additionnée à la non-exhaustivité des données conduit à des modèles ayant une grande incertitude qu'il est indispensable de quantifier pour estimer la qualité des modèles.

Principe. Nous proposons des modèles de structure de milieu simples dérivés des observations géologiques des milieux naturels. Il s'agit de quantifier les informations géologiques pour en faire la base du modèle hydrogéologique. L'information géologique était accessoire dans l'approche géostatistique classique, elle est au centre de notre approche.

Mise en œuvre. Cette approche se divise en quatre temps illustrés sur la Figure 1 et décrits ci-après pour les milieux fracturés :

1. Elle débute par la recherche de la structure géométrique des réseaux de fractures : comment les fractures se répartissent-elles dans le milieu ? Quelles sont leurs caractéristiques fondamentales (distributions de taille, d'ouverture, d'orientation) ? La structure est obtenue à la fois par l'analyse des milieux naturels (sujet de recherche de O. Bour et P. Davy) et par l'étude des mécanismes de la fracturation (recherche de P. Davy et thèse de S. Schueller). A partir des propriétés générales ainsi mises en évidence, un modèle géométrique synthétique de structure de réseau fracturé est mis au point [Darcel et al., 2003a; Darcel et al., 2003b; Darcel et al., 2004a; Davy et al., 2006]. Ce modèle synthétique a les mêmes propriétés géométriques que le milieu naturel.
2. Le deuxième temps est la modélisation des écoulements et du transport dans les modèles synthétiques. Etant donnée la complexité et les tailles caractéristiques des modèles synthétiques, la simulation est surtout numérique et nécessite la mise au point d'algorithmes pouvant résoudre les équations de diffusion et d'advection dans de très grands domaines. Cette recherche est effectuée en collaboration avec deux laboratoires spécialisés dans le calcul numérique de l'INRIA (équipe SAGE de l'IRISA, Rennes) : (thèse de H. Mustapha (2002-2005) et Post-doctorat d'A. Beaudoin (2004-2005)).
3. Le troisième temps est la détermination des lois d'écoulement et de transport grâce à l'utilisation des simulations numériques précédentes. Le but est de quantifier simplement l'effet de l'hétérogénéité géométrique sur les propriétés hydrauliques du milieu et d'en déduire des lois simples spécifiables à partir d'une quantité limitée de mesures de terrain.
4. Le quatrième temps est l'application et la validation des lois hydrauliques simplifiées sur des milieux naturels. Cette phase correspond à la résolution du problème inverse sur le milieu.

Un avantage de cette méthode est de pouvoir estimer l'erreur liée au choix du type de modèle utilisé. En effet, les modèles synthétiques de structure initiaux donnent une large gamme de milieux fracturés, permettant de connaître la gamme de modèles acceptables pour un ensemble de données fixé.

Cette approche séparant la modélisation du milieu de la modélisation du phénomène physique est nécessairement itérative pour retrouver les éventuels couplages entre l'hétérogénéité du

milieu et le phénomène physique. En fonction du phénomène physique, les caractéristiques importantes du milieu sont différentes. L'écoulement moyen de fluide (perméabilité) est très dépendant des goulots d'étranglement du milieu alors que la dispersion des solutés (dispersivité) sera plus dépendant de l'existence de chemins de vitesses différentes ou de bras morts dans lequel les solutés ne se déplacent que par diffusion. Notre but est ainsi de savoir quelles propriétés géométriques mesurer sur le terrain pour modéliser un phénomène hydraulique donné.

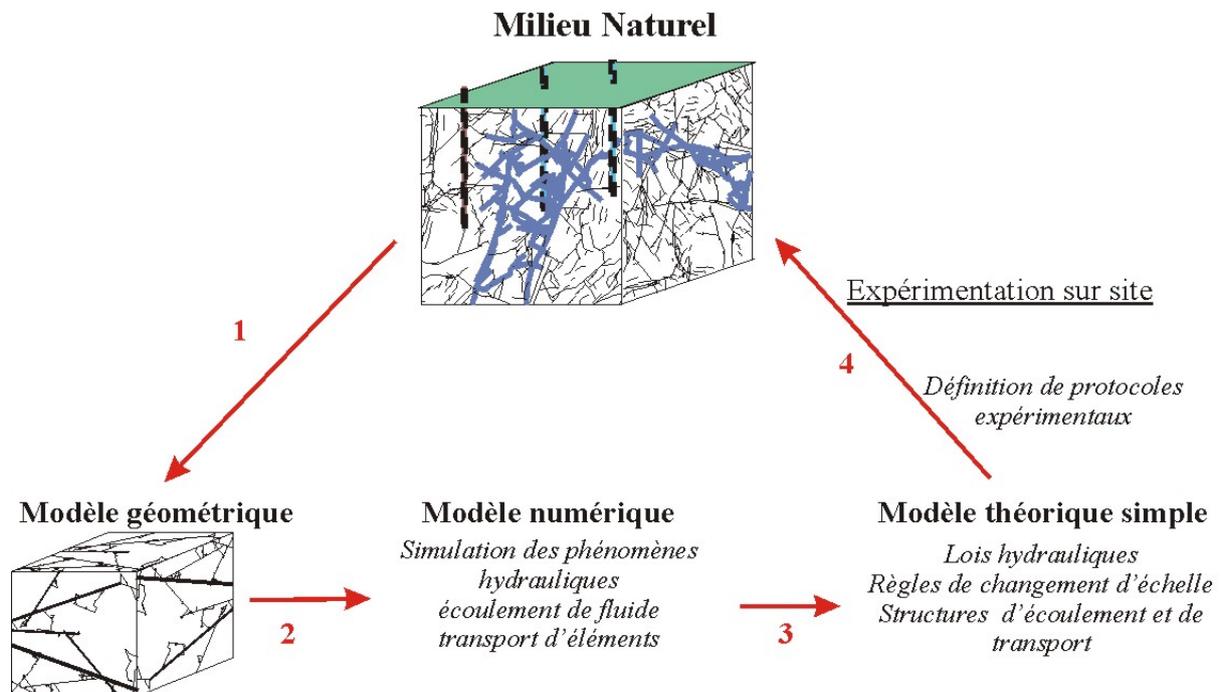


Figure 1: Méthode de modélisation des transferts hydrologiques dans les milieux fracturés

Un modèle pour une échelle. La modélisation des transferts dans les milieux souterrains soulève des problèmes de recherche d'échelle caractéristiques et de changements d'échelle : existe-t-il une échelle d'homogénéisation ? à quelle échelle connaît-on le milieu ? à quelle échelle doit on construire le modèle de milieu ? comment extrapoler des mesures de paramètres hydrauliques de l'échelle de mesure à l'échelle du domaine étudié ? En plus de ces questions de modélisation s'ajoutent des questions physiques : quelle est l'expression du phénomène physique à une échelle donnée ? Par exemple pour les écoulements, à l'échelle du pore, les équations pertinentes sont celles de Navier-Stokes, à l'échelle de l'échantillon de milieu, il s'agit de la loi de Darcy. A une échelle encore supérieure, l'échelle du site, quelles sont les équations pertinentes ? Le modèle est donc fondamentalement dépendant de l'échelle, ce que nous traduisons par l'expression "Un modèle pour une échelle". Rechercher les modèles hydrauliques consiste notamment à identifier les échelles caractéristiques et à déterminer la dépendance d'échelle des lois hydrauliques et de leurs paramètres.

Les études engagées par l'équipe d'hydrogéologie de Géosciences Rennes couvrent les différentes étapes de cette approche. Ma contribution se situe particulièrement d'une part au niveau des étapes de modélisation numérique et physique des phénomènes hydrauliques (étapes 2 et 3) et d'autre part au niveau de l'application à des sites naturels (étape 3) réalisées en collaboration avec O. Bour, P. Davy et L. Aquilina.

2.3 Organisation des travaux de recherche

Mes travaux de recherche s'organisent autour des trois pôles principaux suivants :

- Milieux fracturés
- Essais de puits
- Transport de solutés
- Problème inverse.

La question centrale est celle de la relation entre l'hétérogénéité géologique et les propriétés hydrauliques et spécialement dans des milieux géologiques très complexes comme les milieux fracturés (Figure 2). Les propriétés hydrauliques recouvrent des propriétés d'écoulement comme la perméabilité, la localisation des principaux chenaux d'écoulement et la distribution de vitesse et des propriétés de transport de solutés comme les dispersions longitudinale et transversale et les courbes de restitution.

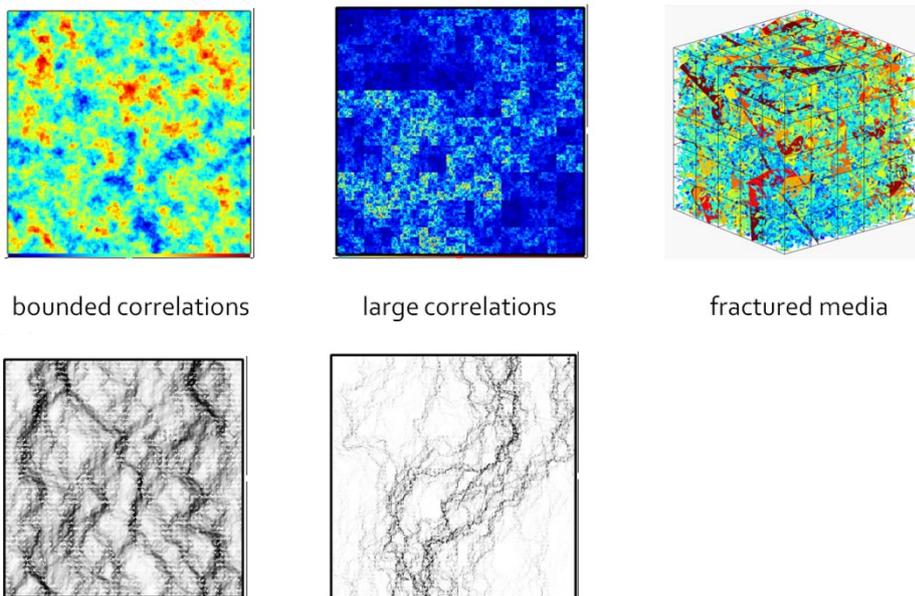


Figure 2 : Milieux de complexité croissante de gauche à droite. A gauche : milieu poreux de corrélation finie avec une distribution de perméabilités lognormale. Au centre : milieu poreux multifractal de corrélations non limitées. A droite : milieu fracturé. En dessous : flux dans les milieux poreux.

La relation entre structure géologique et propriétés hydrauliques m'intéresse dans les deux sens :

- Dans le sens direct, l'intérêt est de déterminer comment les hétérogénéités géologiques influencent les propriétés hydrauliques. Par exemple, les recherches sur les modèles d'interprétation des essais de puits visent à déterminer des modèles de structure simplifiés qui permettent d'expliquer des observations de rabattement non standards.
- Dans le sens inverse, il s'agit de déterminer à partir de données de charge et de données de perméabilité des structures d'écoulement et éventuellement même de localiser certaines fractures majeures.

Le Tableau 1 synthétise mes travaux de recherche et les articles correspondants.

n°	Titre en français	Titre en anglais	Publications reliées
3.1	Ecoulement dans les milieux fracturés	Flow in fractured media	Davy, P., O. Bour, J. R. De Dreuzy, and C. Darcel (2006), <i>Flow in multiscale fractal fracture networks</i> , edited, pp. 31-45.
3.1.2	Influence des longueurs et corrélations de fracture sur les écoulements	Influence of fracture correlation scales on flows	de Dreuzy, J.-R., C. Darcel, P. Davy, and O. Bour (2004), <i>Influence of spatial correlation of fracture centers on the permeability of two-dimensional fracture networks following a power law length distribution</i> , WRR, 40(1).
3.1.3	Simulateur 3D d'écoulement	3D flow simulator	J. Erhel, J.-R. de Dreuzy, B. Poirriez, <i>Flow simulation in three-dimensional discrete fracture networks</i> , submitted to SIAM journal of scientific computing
3.2	Transport inerte dans les milieux hétérogènes	Inert transport in heterogeneous media	
3.2.1	Organisation du champ de vitesse	Velocity field organization	Le Borgne, T., J.-R. de Dreuzy, P. Davy, and O. Bour (2007), <i>Characterization of the velocity field organization in heterogeneous media by conditional correlations</i> , WRR, 43.
3.2.2	Simulations sur de grands domaines	Large-scale simulations	Beaudoin, A., J. R. de Dreuzy, and J. Erhel (2006), <i>A comparison between a direct and a multigrid sparse linear solvers for highly heterogeneous flux computations</i> , European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECCOMAS CFD 2006.
3.2.3	Conséquences sur les lois de transport macroscopiques	Consequences on macroscopic transport	de Dreuzy, J.-R., A. Beaudoin, and J. Erhel (2007), <i>Asymptotic dispersion in 2D heterogeneous porous media determined by parallel numerical simulations</i> , WRR, W10439.
3.3	Transport réactif dans les milieux hétérogènes	Reactive transport in heterogeneous media	
3.3.1	Simulation du transport chimique de solutés	Simulation of chemical solute transport	Besnard, K., J.-R. de Dreuzy, P. Davy, and L. Aquilina (2008), <i>A modified active-walkers method to simulate nonlinearly and kinetically sorbing solute transport in heterogeneous porous media</i> , in preparation.

3.3.2	Effet de la sorption non linéaire hors d'équilibre sur le transport en milieu homogène	Effect of out of equilibrium non-linear sorption on transport in homogeneous media	Besnard, K., J.-R. de Dreuzy, P. Davy, and L. Aquilina (2008), <i>Double-peak occurrence and consequences for nonlinearly and kinetically sorbing solutes</i> , in preparation.
3.4	Interprétation des essais de puits	Well-test interpretation	
3.4.1	Identification des modèles de milieux induisant des rabattements non classiques	Identification of medium heterogeneities inducing non-classical drawdowns	de Dreuzy, J.-R., P. Davy, J. Erhel, and J. de Brémond d'Ars (2004), <i>Anomalous diffusion exponents in continuous 2D multifractal media</i> , PRE, 70. de Dreuzy, J.-R., and P. Davy (2007), Relation between fractional flow and fractal or long-range permeability field in 2D, WRR, 43.
3.4.2	Application au site de Ploemeur	Application to the site of Ploemeur	Le Borgne, T., O. Bour, J.-R. de Dreuzy, P. Davy, and F. Touchard (2004), <i>Equivalent mean flow models for fractured aquifers: Insights from a pumping tests scaling interpretation</i> , WRR.
3.5.1	Caractérisation de la fracturation sur site	In-situ characterization of fractures	Davy, P., C. Darcel, O. Bour, R. Munier, and J. R. de Dreuzy (2006), <i>A note on the angular correction applied to fracture intensity profiles along drill core</i> , Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 111(B11).
3.5.2	Base de données de l'ORE H+	Database of the H+ ERO	de Dreuzy, J.-R., J. Bodin, and H. L. Grand (2006), <i>Groundwater database for site and processes studies: Point-like structure based on well, meteorological and hydrological platforms</i> , Groundwater.
3.5.3	Perméabilité des sols induite par l'activité lombricienne	Soil permeability induced by lombrician activity	Bastardie, F., M. Cannavacciuolo, Y. Capowiez, J. R. de Dreuzy, and D. A. Cluzeau (2002), <i>A new simulation for modelling the topology of earthworm burrow systems and their effects on macropore flow in experimental soils</i> , Biology and Fertility of Soils, 36(2), 161-169. Bastardie, F., Y. Capowiez, J.-R. de Dreuzy, and D. Cluzeau (2003), <i>X-ray tomographic and hydraulic characterization of burrowing by three earthworm species in repacked soil cores</i> , Applied Soil Ecology, 24(1), 3-16.

Tableau 1 : Articles reliés aux activités de recherche. Le numéro de la colonne de gauche réfère au numéro de paragraphe. Tous les articles sont fournis sur le CD joint au document ou accessible sur les sites des revues.

3 Synthèse des travaux réalisés

3.1 Écoulement dans les milieux fracturés

3.1.1 Contexte

Les propriétés hydrauliques dans les milieux fracturés naturels résistent à nombre de modèles et requièrent une grande quantité de données pour être approchées avec précision comme dans le cas du stockage de déchets nucléaires [Andersson *et al.*, 2004]. Les difficultés proviennent de la chenalisation des écoulements dans une petite partie de la fracturation invalidant les approches d'homogénéisation ou de milieux effectifs. L'alternative consiste à relier la complexité hydraulique à l'hétérogénéité géométrique induite par la fracturation. La complexité hydraulique provient de plusieurs causes : de la fracture en elle-même rugueuse [Schmittbuhl *et al.*, 1993] qui provoque une première chenalisation des écoulements [Tsang and Neretnieks, 1998], de la large gamme de fractures de différentes tailles, orientations et formes et de la structure du réseau, c'est-à-dire de l'arrangement des fractures les unes par rapport aux autres.

Cette hétérogénéité multi-échelle et multi-origine pose à la fois des questions théoriques sur les règles de changement d'échelle, l'existence d'échelles caractéristiques et des questions pratiques sur la possibilité de négliger les hétérogénéités les plus petites, les caractéristiques prépondérantes à mesurer sur le terrain et la variabilité des modèles. Pour aborder ces questions, nous avons commencé par étudier en 2D l'influence des caractéristiques de la fracturation sans échelle caractéristique, i.e. la distribution des longueurs de fracture (loi de puissance) et les corrélations entre fractures (corrélations fractales). Pour un investissement numérique limité, ces modèles 2D donnent de premières conclusions importantes sur les effets d'échelle, l'importance relative des fractures de différentes tailles et la répartition du flux dans le milieu (résultats synthétisés dans la section 2). L'établissement d'un modèle 3D permettant de traiter une large gamme de réseaux sur plusieurs échelles a nécessité un investissement plus important réalisé en partenariat avec l'INRIA et détaillé dans la suite de la synthèse et dans les perspectives de recherche.

3.1.2 Influence des longueurs et corrélations de fracture sur les écoulements

Nous nous sommes d'abord intéressés à l'effet cumulatif sur les propriétés hydrauliques macroscopiques de larges distributions de longueurs (i.e. couvrant une large gamme d'échelle), de perméabilités et de corrélation de positions. La large distribution de perméabilité inhérente à tout réseau de fractures provient de la distribution des ouvertures de la fracture, de l'état des contraintes mécaniques et de la réactivité chimique du milieu. La distribution des longueurs de fractures est modélisée par une loi puissance $n(l) \sim l^{-a}$, où $n(l)$ est le nombre de fractures dont la longueur est comprise entre l et $l+dl$. Les mesures sur réseaux naturels montrent que l'exposant a de la distribution des longueurs de fractures est compris entre 1 et 3.5 [Bonnet *et al.*, 2001].

Nous avons étudié des réseaux de fractures ayant ces propriétés en 2D. Nous avons montré que les larges distributions de longueur et de perméabilité induisent une chenalisation des écoulements dans des sous-réseaux de fractures particulièrement perméables et une augmentation de la perméabilité avec l'échelle [de Dreuzy *et al.*, 2001b; c; 2002]. Ces comportements non standards sont liés à l'évolution de la connectivité avec l'échelle de fractures plus perméables que la moyenne (Figure 3). Le changement d'échelle peut être

déduit des caractéristiques locales de la fracturation (distributions de longueur, de perméabilité de fracture et d'orientation).

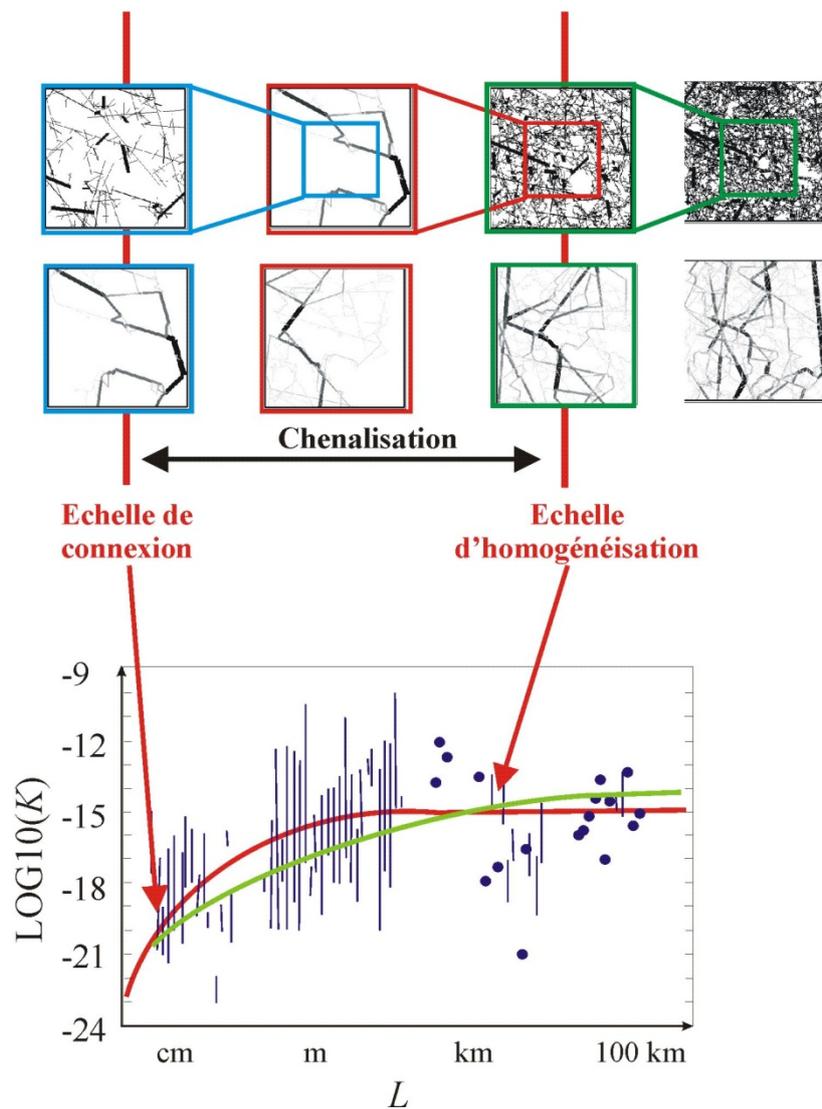


Figure 3 : Illustration de l'augmentation de la connectivité (première ligne de figures) et de la perméabilité (deuxième ligne de figures) avec l'échelle sur un réseau donné. Le flux très extrêmement chenalisé à l'échelle locale devient de plus en plus réparti à mesure que l'échelle augmente. Les deux échelles de caractéristiques de connexion et d'homogénéisation sont indiquées. La figure du bas montre l'augmentation d'échelle de la perméabilité caractéristique des réseaux étudiés superposés à la synthèse des données de Clauser [1992].

La structure du réseau de fractures (corrélations des positions des fractures) est fractale de dimension D ($1 \leq D \leq 2$). Les corrélations sont construites par un outil de simulation développé par C. Darcel (Thèse soutenue en 2001). Nous avons recherché quelle est l'influence de cette fracture sur les écoulements [de Dreuzy et al., 2004a]. Dans un premier temps, les fractures sont considérées comme ayant toutes la même ouverture. Les flux et la perméabilité ne sont alors influencées que par la distribution des longueurs et la corrélation de position des fractures qui sont caractérisées par les deux paramètres suivants :

- a l'exposant de la distribution des longueurs de fracture dans $p(l) \sim l^{-a}$ avec $1 < a < \infty$. Plus a diminue, plus la probabilité d'observer de grandes fractures augmente.
- D , la dimension fractale de l'ensemble des fractures $1 < D < 2$. Les petites valeurs de D entraînent de fortes corrélations alors que lorsque D est égale 2, les corrélations disparaissent.

Ces deux caractéristiques géométriques ont des influences opposées sur les propriétés de flux et de connectivité. D'un côté, un accroissement de la taille moyenne des fractures correspondant à une diminution de a entraîne une augmentation de la connectivité et de la perméabilité. De l'autre côté, une augmentation de corrélation a tendance à déconnecter le réseau à cause de la création de zones de très faible probabilité de présence de fractures. Les études de connectivité ont montré que les effets des deux paramètres se compensent exactement lorsque $a=D+1$. Quand $a>D+1$, l'effet déconnectant des corrélations entre fractures domine l'effet connectant des grandes fractures. Au contraire, lorsque $a<D+1$, les grandes fractures connectent malgré tout les réseaux [Darcel et al., 2003b]. Lorsque $a \leq D+1$, i.e. quand les réseaux sont connectés, la perméabilité des réseaux peut être définie et nous avons déterminé quel est l'effet dominant entre les corrélations et la distribution des longueurs.

Une étude numérique systématique a permis de calculer la perméabilité des réseaux corrélés $K(\text{correlated})$ à partir de celle des réseaux non corrélés $K(\text{non correlated})$:

$$K(\text{corrated}) = K(\text{non corrated}) \cdot \left(\frac{L}{l_{\min}} \right)^{-x(p)}$$

où (L/l_{\min}) est le ratio adimensionnel entre l'échelle d'observation L et l'échelle de résolution l_{\min} et x est un exposant variant avec la densité mesurée par le paramètre de percolation p . L'exposant x est une mesure de l'influence de la corrélation sur la perméabilité. Au seuil de connexion, x est nul montrant que les corrélations n'ont pas d'influence sur la perméabilité équivalente. En effet, au seuil, les flux sont dominés par des liens rouges (appelés rouges car s'ils sont supprimés, le réseau est déconnecté) dont la longueur et la structure ne sont que peu influencés par les corrélations. Très au-dessus du seuil de percolation, pour des fortes valeurs de densité, l'exposant x tend vers une constante comprise dans l'intervalle $[0, 0.25[$ quand $a=D+1$. x reste plus petit que 0.25 quelque soit la valeur de a . Quand $a<D+1$, les corrélations sont comparativement encore moins importantes et x est plus faible [de Dreuzy et al., 2004a].

Quelle que soient les distributions de longueur et d'orientations, l'influence de la corrélation reste très faible sur la perméabilité équivalente, en revanche, l'effet sur la répartition des flux devient non négligeable (Figure 4). Le transport de solutés étant très sensible à la distribution des flux, les corrélations de fractures devraient y jouer un rôle très important, à confirmer dans une étude ultérieure.

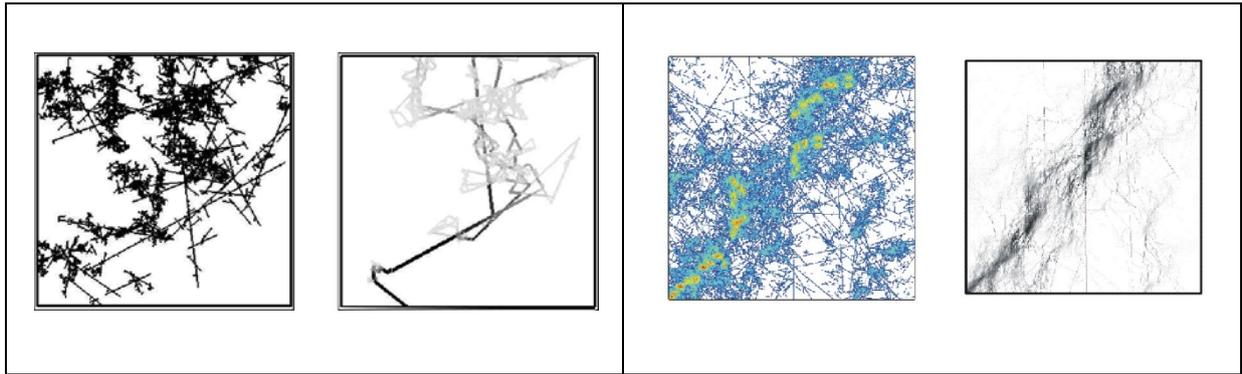


Figure 4 : Rémanence de la chenalisation des écoulements dans un réseau ($D=1.75$, $\alpha=2.75$) au seuil de percolation (gauche) et dans un réseau très au dessus du seuil (droite). Les couleurs dans la figure de droite sont fonction de la densité de fracturation.

3.1.3 Simulateur 3D d'écoulement

Puisque aucun modèle numérique actuellement disponible n'est satisfaisant pour l'étude des effets d'échelle, nous avons choisi de développer un modèle 3D d'ellipses (figure 5). L'étude de la connectivité a permis de généraliser les résultats acquis en 2D [Bour and Davy, 1997; de Dreuzy et al., 2000]. Pour la simulation des écoulements, j'ai travaillé en collaboration avec l'INRIA (Jocelyne Erhel de l'équipe SAGE de l'IRISA, Rennes) notamment à travers la thèse de Baptiste Poirriez (2007-2010) et l'ACI Hydrogrid (Couplage de codes pour le transfert de fluides et de solutés dans les milieux géologiques : une approche par composants logiciels).

La première difficulté provient de l'existence d'intersections très proches les unes des autres et formant des angles petits entre elles (Figure 5). Ces configurations sont très pénalisantes pour le maillage et in fine pour les méthodes numériques d'éléments finis.

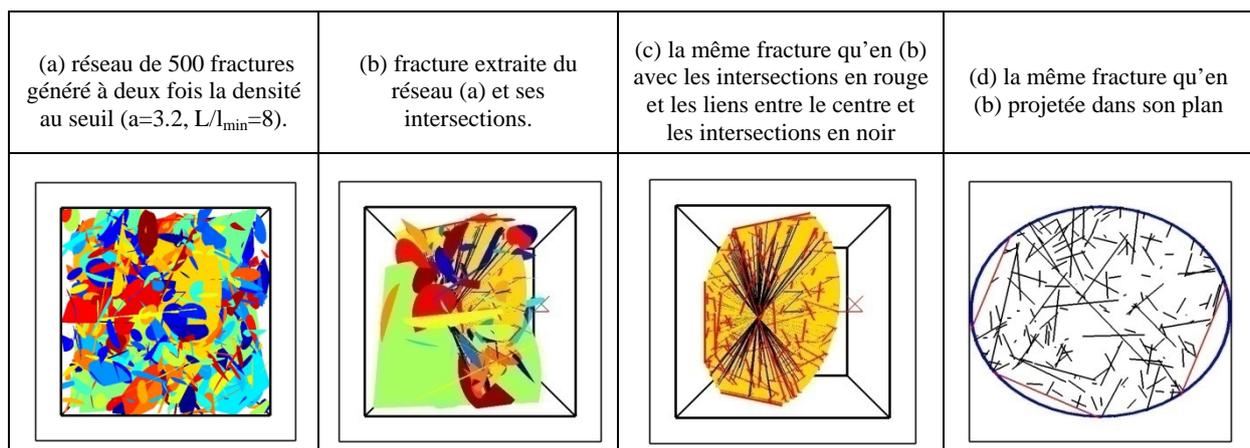


Figure 5 : La figure à l'extrême droite montre la complexité des configurations de fractures à mailler

Nous avons mis en œuvre une méthode de corrections locale des configurations destinées à éliminer ces configurations tout en conservant la géométrie globale des intersections. Cette

méthode s'appuie sur la discrétisation sur une grille 3D régulière qui permet de fusionner les éléments voisins (Figure 6). Elle permet de résoudre les équations de l'écoulement dans tous les réseaux. Nous avons évalué sa précision dans des réseaux pour lesquels une solution directe par éléments finis était possible. L'imprécision induite par la méthode est limitée à quelques pourcents (<5%) pour des gains en temps calcul de un à deux ordres de grandeur.

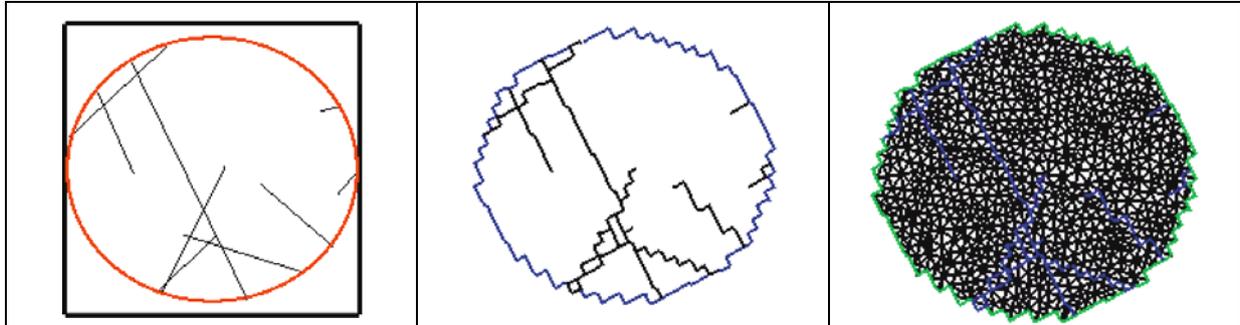


Figure 6 : De droite à gauche, fracture et ses intersections, discrétisation et maillage

La deuxième difficulté vient de la taille des réseaux à étudier particulièrement pour la caractérisation des règles de changement d'échelle. C'est pourquoi, nous projetons de paralléliser le code.

La description détaillée de cette méthode conforme de résolution des écoulements dans les réseaux de fractures est donnée par l'article suivant : Flow simulation in three-dimensional discrete fracture networks de J. Erhel, J.-R. de Dreuzy et B. Poirriez soumis à SIAM journal of scientific computing.

3.2 Transport inerte dans les milieux hétérogènes

Les expériences de terrain sur le transport de solutés non réactifs (particules éléments chimiques inertes en solution) montrent une très large dispersion des temps de transit des particules avec en particulier une probabilité non négligeable de temps de transit très élevés. L'interprétation de ces temps de transit élevés est cruciale pour la prédiction des temps de rémanence de contamination des aquifères pollués. Des expériences récentes [Becker and Shapiro, 2000] montrent que la large gamme des temps de transit est due non seulement à un phénomène d'adsorption et de diffusion dans la matrice comme il a été classiquement proposé [Jardine et al., 1999; Neretnieks, 1980] mais aussi à un phénomène d'advection des particules par un champ de vitesses de fluide très hétérogène.

Comprendre le transport macroscopique, c'est savoir comment le soluté échantillonne le champ de vitesse et quelles sont les corrélations induites par cet échantillonnage. En d'autres termes, il s'agit de déduire du champ de vitesse Eulérien le champ de vitesse Lagrangien, ce dernier donnant directement le transport advectif. Dans un premier temps, nous étudions la corrélation des vitesses le long de la trajectoire des particules. Dans un deuxième temps, nous avons mis au point des algorithmes parallèles pour la simulation des écoulements et du transport dans de très grands domaines. Dans un troisième temps, nous étudions l'effet de ces corrélations sur le transport macroscopique.

3.2.1 Organisation du champ de vitesse

Du point de vue théorique, le problème consiste dans un premier temps à comprendre comment l'hétérogénéité du milieu conditionne la structure du champ de vitesse. Dans un deuxième temps, la dispersion macroscopique des particules dans le réseau doit être déterminée en fonction du champ de vitesse. L'étude du champ de vitesse montre que la corrélation des vitesses dépend de la valeur de la vitesse, résultat établi dans la thèse de Tanguy Le Borgne (2001-2004). Plus précisément le soluté partant dans des zones de vitesses élevées parcourt un chemin plus long que celui partant dans des zones de vitesses relativement plus faibles. Cette variabilité de corrélation provient de la chenalisation des écoulements dans les zones de plus forte perméabilité. Les écoulements ont tendance à contourner les zones de perméabilité plus faible organisant ainsi la structure d'écoulements en chenaux perméables isolant des îlots relativement moins perméables (Figure 7) [Le Borgne et al., 2007].

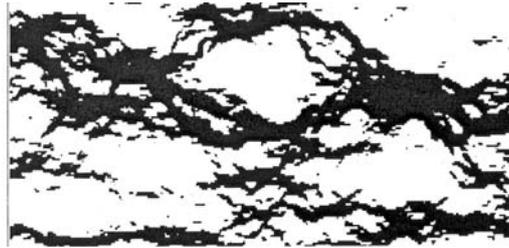


Figure 7 : Grille hétérogène parcourue par un flux horizontal. Les zones en noir sont celles dans lesquelles la vitesse est supérieure à la moyenne logarithmique des vitesses. On distingue des îlots blancs découpés par les chenaux noirs à la base de la corrélation différentielle en fonction de la vitesse (thèse de T. Le Borgne).

3.2.2 Simulations sur de grands domaines

De très larges domaines sont nécessaires puisque le régime asymptotique ne s'établit que pour des distances de transit de 100 à 1.000 fois la longueur de corrélation nécessitant de traiter des grilles de l'ordre de 10^7 à 10^8 mailles [Dentz et al., 2002]. Les simulations répertoriées dans la bibliographie vont jusqu'à 10^6 mailles [Trefry et al., 2003].

Pour passer à des grilles de 10^7 à 10^8 mailles nous collaborons avec l'INRIA (collaboration avec J. Erhel, Post-doctorat d'Anthony Beaudouin 2005-2006) et depuis 2007 avec l'Université du Havre où A. Beaudoin a été recruté comme maître de conférences. Le principe est d'utiliser une méthode parallèle de résolution des équations de flux sur une grappe de PCs. Un travail numérique est nécessaire pour déterminer quelles sont les méthodes de résolution du système linéaire les plus efficaces. Parmi les différentes méthodes numériques testées, les méthodes multigrilles s'avèrent plus efficaces que les méthodes directes multifrontales et les méthodes de gradient conjugué préconditionnées. Et parmi les méthodes multigrilles, les méthodes multigrilles algébriques donnent des performances indépendantes de la variabilité de la perméabilité alors que les temps de calcul des méthodes multigrilles géométriques augmentent fortement avec la variabilité de la perméabilité [Beaudoin et al., 2006].

3.2.3 Conséquences sur les lois de transport macroscopiques

La troisième étape consiste à dériver à partir de ce champ de vitesse les propriétés macroscopiques du transport, dont le coefficient de dispersion. Les moyens de simulation mis en place ont été utilisés pour déterminer le comportement asymptotique des lois de transport par advection et diffusion dans des champs de perméabilité bi-dimensionnels avec une distribution de perméabilité corrélée lognormale. Les principaux résultats sont illustrés par la Figure 8 [de Dreuzy et al., 2007].

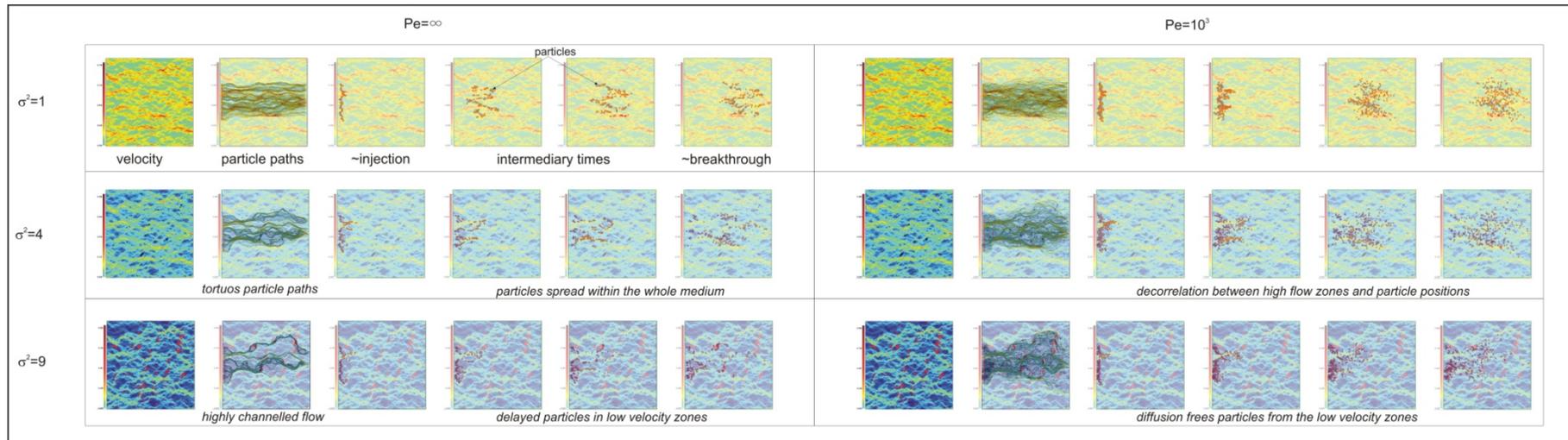


Figure 8 : Illustration du transport de particules dans des champs de vitesse d'hétérogénéité croissante dans des conditions d'advection pure (partie gauche du tableau) et dans des conditions d'advection et de diffusion (partie droite du tableau). La dispersion augmente avec l'hétérogénéité et pour des fortes hétérogénéités a tendance à décroître par addition de diffusion. Les résultats numériques montrent effectivement une réduction de la dispersion par addition de diffusion. Les principaux résultats quantitatifs restent cependant la mise en évidence de la dépendance quadratique de la dispersion longitudinale en fonction de la variance du champ de perméabilité et la valeur nulle de la dispersion transversale.

3.3 Transport réactif dans les milieux hétérogènes

Le transport de solutés est non seulement déterminé par les processus de dispersion physique précédemment décrits mais également par la réactivité chimique avec le milieu. La prise en compte de la chimie est essentielle notamment pour interpréter les essais de traceurs. Le transport physico-chimique est un problème particulièrement complexe en ce qu'il établit un couplage fort entre la structure géométrique du milieu et sa réactivité chimique conduisant à des problèmes non linéaires difficiles à résoudre.

3.3.1 Simulation du transport chimique de solutés

La thèse de K. Besnard (2000-2004) que j'ai co-encadrée avec L. Aquilina et P. Davy a permis de mettre au point un simulateur numérique pour le transport physico-chimique de solutés en interaction avec le milieu solide. Les réactions chimiques considérées sont les réactions d'adsorption cinétiques non linéaires observées dans la nature. Le principe du simulateur repose sur des volumes actifs de fluide en interaction avec le milieu solide. Sa spécificité est d'effectuer un découplage de la physique du transport et de la réactivité chimique à l'échelle irréductible des mailles. De cette façon, n'importe quelle réaction d'adsorption peut être étudiée [Besnard *et al.*, 2008b]. Analogue aux méthodes de marcheurs aléatoires, cet algorithme est de plus performant en temps car il ne nécessite pas la résolution de systèmes linéaires.

Une des limitations de la méthode de simulation développée dans la thèse de Katia Besnard était l'absence de mélange entre volumes et donc l'impossibilité de simuler des réactions en solution. Une nouvelle version du simulateur a été développée sur les mêmes principes avec la possibilité d'échange de solutés entre volumes. Parmi la grande variété de méthodes de mélanges possibles, une des plus simples a été retenue. Suivant le principe fondamental de séparer l'opérateur de transport et l'opérateur de réactivité chimique, le mélange intervient après que le transport et la réactivité entre solide et solution aient eu lieu à l'échelle de la maille. Un volume Lagrangien élémentaire échange alors du soluté avec son prédécesseur suivant la loi de diffusion classique (Figure 9). Cette méthode est très similaire aux méthodes de couplage explicites d'opérateurs. Elle a été validée pour la simulation de l'advection-diffusion monodimensionnelle (Figure 10). L'évolution de la variance longitudinale en fonction du temps est correcte du moment que la taille du volume élémentaire n'est pas trop petite par rapport à la taille de la maille :

$$\frac{2 \cdot D \cdot d_{\text{mesh}}}{u} < \Delta x^2$$

où D est le coefficient de diffusion, d_{mesh} est la taille de la maille, u est la vitesse de la particule et Δx est la taille du volume élémentaire. En fait la taille du volume élémentaire doit être suffisamment grande pour que le soluté n'ait pas la possibilité de diffuser vers plus qu'un volume avant lui. Nous travaillons actuellement sur d'autres méthodes d'implémentation de la diffusion dans des cas plus complexes.

La méthode proposée ci-dessus a pour avantage de séparer la dispersion du mélange. Ce point est important car seul le mélange induit une réactivité en solution.

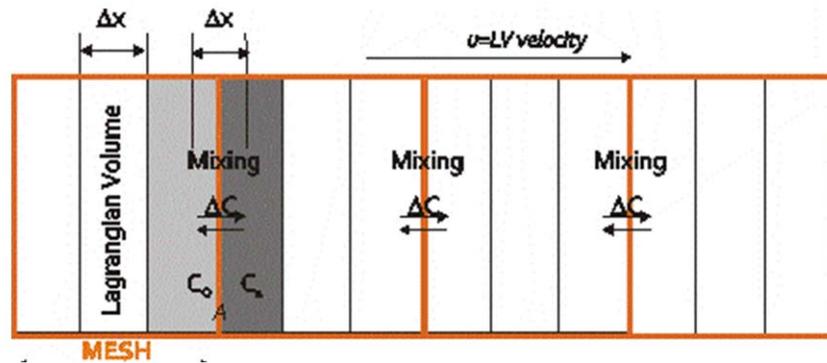


Figure 9 : Principe de l'implémentation du mélange entre volumes Lagrangiens élémentaires

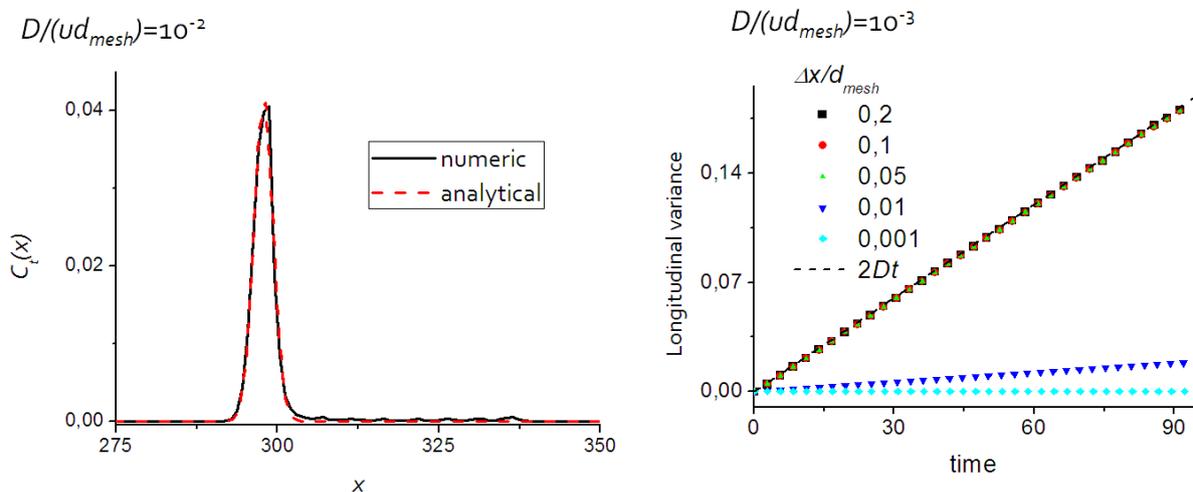


Figure 10 : Validation de l'implémentation du mélange entre particules dans le cas de l'advection diffusion monodimensionnelle. La figure de gauche montre une courbe de restitution et la figure de droite montre l'évolution de la variance longitudinale en fonction du temps.

3.3.2 Effet de la sorption non linéaire hors d'équilibre sur le transport en milieu homogène

Nous avons caractérisé l'effet des réactions d'adsorption cinétiques non linéaires dans les milieux homogènes. En plus du temps retard classiquement observé apparaît un phénomène transitoire de séparation du panache de soluté en deux parties. Une partie rapide n'ayant pas encore interagi avec le milieu et une partie retardée ayant été en interaction avec le milieu. Ce phénomène est d'autant plus important que la cinétique de réaction est lente et que la non linéarité est importante [Besnard *et al.*, 2008a].

3.4 Interprétation des essais de puits

3.4.1 Identification des modèles de milieux induisant des rabattements non classiques

Plusieurs cadres ont été proposés pour l'interprétation des essais de puits. Le modèle de Théis originellement mis au point pour des milieux homogènes bidimensionnels [Theis, 1935] a été utilisé pour les milieux hétérogènes et pour des milieux de dimension n , n étant un nombre compris entre 1 et 3 [Barker, 1988]. Connue sous le nom de modèle d'écoulement radial généralisé, ce modèle mis au point par Barker ne repose que sur la généralisation du modèle de Théis pour des dimensions non entières. Acuna et Yortsos [Acuna and Yortsos, 1995] ont généralisé ce modèle pour des milieux dans lesquelles la diffusion est anormalement lente et caractérisée par l'exposant de transport anormal d_w [Halvin and Ben-Avraham, 1987]. Ces cadres d'interprétation reposent sur la généralisation de l'expression de l'équation de diffusion à des dimensions non entières et ne sont pas fondamentalement connectés à un modèle de milieu particulier. De plus des courbes de rabattement obtenues dans nombre de milieux sont particulièrement bien représentées par ce type de modèle (voir le chapitre suivant sur des essais réalisés en milieu naturel). C'est pourquoi nous nous sommes intéressés aux types d'hétérogénéité pour lesquelles les équations de diffusion généralisées sont applicables.

Les dimensions non entières indiquant des variations d'échelle, nous avons cherché des milieux ayant des propriétés d'échelle et nous nous sommes intéressés aux milieux multifractals pour lesquels la dimension d'ordre zéro D_0 est égale à 2, c'est-à-dire des milieux continus différents des milieux lacunaires pour lesquels D_0 est inférieure à 2. Les milieux multifractals étudiés sont caractérisés par une fonction de corrélation puissance d'exposant D_2-d où D_2 est la dimension d'ordre 2 du spectre multifractal du milieu et d est la dimension euclidienne ($D_2 < d$). Nous avons simulé numériquement des essais de puits dans de tels milieux (Figure 11) et observé que les dimensions d'écoulement n et de diffusion anormale d_w sont en moyenne sur un grand nombre de simulations indépendantes de la dimension de corrélation D_2 . Leurs valeurs moyennes sont égales aux valeurs qu'elles prennent dans le cas du milieu homogène.

Cependant la dispersion autour de ces valeurs moyennes est très grande montrant que pour un milieu 2D donné n et d_w sont compris entre 1 et 3. En effet ces exposants sont liés à l'évolution de la perméabilité avec l'échelle à partir du puits de pompage. Ainsi, la valeur de la perméabilité au niveau du puits de pompage est déterminante. Nous avons pu relier l'exposant à la valeur de la perméabilité au puits de pompage qui conditionne l'évolution d'échelle de la perméabilité à cause de la structure multifractale du milieu [de Dreuzy et al., 2004b].



Figure 11 : à droite : grille multifractale. A gauche : flux permanent dans la grille avec un pompage au centre.

Nous travaillons maintenant sur la recherche de modèles de milieu pour lesquels les valeurs des dimensions n et d_w sont en moyenne différents des valeurs des milieux homogènes de façon à trouver un type de milieu en fonction de paramètres mesurables sur le terrain. La question du modèle d'hétérogénéité est clef car elle conditionne notre capacité à extraire de n et d_w des informations utilisables avec des conditions aux limites différentes de celles du pompage.

3.4.2 Application au site de Ploemeur

Le site de Ploemeur (Morbihan) est étudié depuis une dizaine d'années car il possède un aquifère d'eau de très bonne qualité dans une zone de granite avec une teneur de nitrates proche de zéro. L'aquifère est situé dans une zone intensément fracturée au contact entre du granite et des micaschistes à une centaine de mètres de profondeurs. L'équipement du site présente la particularité d'avoir des piézomètres à des distances couvrant deux ordres de grandeur et permettant ainsi l'évaluation des modèles d'interprétation d'essais de puits dépendant de l'échelle mentionnés dans le paragraphe précédent [Acuna and Yortsos, 1995; Barker, 1988].

Des essais de puits ont été réalisés et leur interprétation montre que la dimension d'écoulement n et la dimension de transport anormal d_w sont significativement différentes de 2, c'est-à-dire de la valeur qu'elles prennent dans un milieu homogène de dimension euclidienne 2. La dimension d'écoulement n est comprise entre 1.4 et 1.7. La faible dispersion des valeurs montre la cohérence du modèle d'interprétation. La dimension de transport anormal d_w est supérieure à 2 dans la direction de la faille principale du milieu indiquant une diffusion anormalement lente. Perpendiculairement à la faille, la dimension n n'a pu être mesurée à cause du manque de puits ([Le Borgne et al., 2004] et thèse de Tanguy Le Borgne). Cette étude renforce l'importance des modèles d'écoulement non-homogènes et la nécessité de comprendre le type d'hétérogénéité auxquels ils correspondent.

3.5 Autres travaux de recherche

Dans les parties précédentes, j'ai résumé mes principaux travaux de recherche en partie effectués en collaboration mais dans lesquels je me suis fortement impliqué. Les travaux suivants concernent soit des collaborations soit des axes secondaires.

3.5.1 Caractérisation de la fracturation sur site

La caractérisation in situ de la fracturation est un axe de recherche majeur dans l'équipe d'hydrogéologie de Géosciences Rennes. C'est sur cet axe que repose la détermination des propriétés hydrauliques et de leur spécificité par rapport au milieu poreux. Ce thème a fait l'objet de plus de vingt ans d'étude de Philippe Davy et Olivier Bour et reste toujours très actif. Les principaux travaux sont menés en collaboration avec Romain Le Goc et Caroline Darcel (ITASCA) sur les sites suédois envisagés pour le stockage des déchets nucléaires de haute activité. L'intérêt des sites suédois est leur très forte caractérisation autant en termes de géologique que d'observations de puits. Durant les trois dernières années plusieurs sites ont été étudiés tels que Simpevarp et Forsmark [Darcel *et al.*, 2004b; Darcel *et al.*, 2006].

Le principal objectif est de déterminer les caractéristiques du DFN¹ sur les différents sites. Les difficultés d'établissement du DFN viennent à la fois du manque de données et de la mise en cohérence des données. Le manque de données est patent. Pour la forte hétérogénéité de fracturation, les seules données disponibles sont les quelques affleurements observables et les logs des puits. Même si ces données sont parmi les plus exhaustives parmi tous les sites étudiés jusqu'à maintenant, elles n'en restent pas moins très insuffisantes à elles seules. La détermination à partir de ces données très fragmentaires d'un DFN pose des problèmes de compatibilité des différentes sources de données. La question est de savoir comment mettre en cohérence des données d'origine différentes telles que des données d'affleurement et des données de log de puits [Davy *et al.*, 2006].

3.5.2 Base de données de l'ORE H+

H+ est un réseau national de sites hydrogéologiques destiné à observer l'évolution d'aquifères sur de longues périodes (<http://hplus.ore.fr/>). La base de données sert à la fois d'archivage sûr et de qualité des données et d'interface entre le terrain et les modèles. J'ai coordonné avec Jacques Bodin de l'université de Poitiers une partie du développement de cette base de données [de Dreuzy *et al.*, 2006].

3.5.3 Perméabilité des sols induite par l'activité lombricienne

L'idée de ces travaux de thèse de François Bastardie [Bastardie *et al.*, 2002; Bastardie *et al.*, 2003] était de déterminer l'influence de l'activité lombricienne sur la perméabilité des sols. Le réseau de galeries peut en effet offrir des chemins préférentiels à l'écoulement. La conclusion principale est que les galeries sont tellement perméables que leur perméabilité est pratiquement infinie. C'est-à-dire que l'écoulement dans le réseau de galeries est quasi instantané. La perméabilité des galeries n'est pas un facteur limitant à l'écoulement. Ce qui est limitant, c'est l'accès des galeries à la surface et l'infiltration de l'eau à partir des galeries.

Les galeries peuvent avoir une influence sur la réserve utile des sols spécialement aux saisons sèches où elles peuvent évacuer plus rapidement l'eau de la surface et la stocker temporairement. Si la perméabilité n'est pas un paramètre déterminant, d'autres caractéristiques seraient intéressantes comme la densité d'affleurement des galeries, le volume des galeries et le rapport surface sur volume des galeries (pour l'infiltration à partir des galeries). Malgré tout, l'influence des lombriques sur l'écoulement semble limitée. En revanche les lombriques pourraient avoir un supérieur dans la redistribution d'éléments dans le sol et notamment la redistribution de matière organique.

¹ Discrete Fracture Network

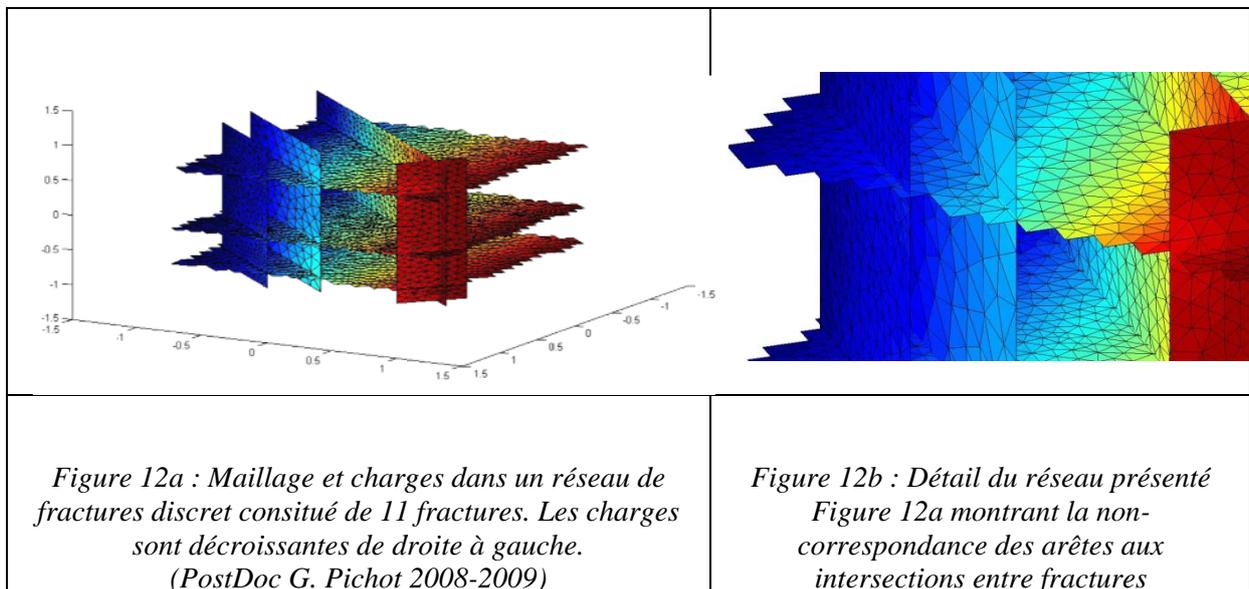
4 Programme de recherche

4.1 Modèles de réseaux de fractures 3D (matrice imperméable)

Les travaux effectués ces dernières années sur des modèles 2D et sur le simulateur 3D permettent d'envisager l'étude du comportement des milieux fracturés 3D autant du point de vue théorique qu'appliqué.

4.1.1 Simulateur d'écoulements 3D

Les méthodes développées précédemment pour la simulation des écoulements dans les réseaux de fractures 3D s'appuyaient sur un maillage conforme des fractures, c'est-à-dire que les arêtes séparent exactement les triangles. Ces méthodes s'avèrent trop contraignantes notamment pour mailler des fractures avec différents pas de maillage. Le but est de développer une autre catégorie de méthodes non-conforme géométriquement dans laquelle les arêtes ne se raccordent pas nécessairement d'une fracture à l'autre sur l'intersection. La discrétisation des équations des écoulements est réalisée par une méthode d'éléments finis mixtes hybrides dans la fracture et par une méthode de type Mortar sur les intersections de fractures [Arbogast *et al.*, 2000]. Le développement de cette méthode permettra de raffiner ou déraffiner le maillage fracture par fracture en fonctions de l'importance de chacune des fractures pour l'écoulement ou le transport. Une possibilité est par exemple de commencer par une réalisation grossière puis en fonction de l'importance des flux dans les différentes fractures d'adapter le pas de maillage localement.



Les projets dans ce domaine s'organisent pour l'instant en quatre étapes :

1. Adaptation de la méthode de Mortar aux réseaux de fractures discrets. Utilisée conjointement avec les éléments finis mixtes hybrides, la méthode de Mortar aboutit à une expression matricielle du calcul des charges. La Figure 12 illustre le résultat en charge sur une grille non-conforme (Sujet de postdoc de Géraldine Pichot). Les méthodes de Mortar ne peuvent être directement appliquées et doivent être adaptées pour tenir compte intersections non jointives entre plus de deux fractures et pour fonctionner dans le contexte d'un grand nombre de sous-domaines. En effet les

méthodes de Mortar ont été jusqu'à maintenant appliquées exclusivement à un très petit nombre de sous domaines (une dizaine au maximum) et systématiquement avec des interfaces

2. Une fois le système linéaire obtenu, le défi suivant de le résoudre avec des solveurs creux parallèles adaptés. Plusieurs solveurs seront considérés comme le gradient conjugué préconditionné et les méthodes multigrilles. L'objectif est également d'optimiser la répartition des fractures sur les processeurs pour des exécutions parallèles de façon à minimiser le temps calcul.
3. La troisième étape est consacrée à la parallélisation des autres parties du code et plus particulièrement du maillage des fractures et de la numérotation des éléments. Les résultats de la méthode non conformes seront comparés à ceux de la méthode conforme.
4. Une fois mis au point, le code sera testé et optimisé pour permettre de modéliser une large gamme de réseaux de fractures pouvant aller jusqu'à quelques 10.000 fractures avec 100 à 1000 mailles par fracture en moyenne.

Cette partie est effectuée en étroite collaboration avec l'IRISA (J. Erhel, équipe SAGE) notamment à travers du PostDoc de Géraldine Pichot (2008-2009) et de la thèse de Baptiste Poirriez (2008-2010).

4.1.2 Etude des règles de changement d'échelle

Il s'agit essentiellement de généraliser les résultats obtenus en 2D. Certaines conclusions obtenues en 2D resteront probablement valides comme celle sur la prépondérance des fractures de grande taille pour des distributions de longueur en faveur de ces fractures (distribution des longueurs telles que la surface cumulée des fractures de grande taille est supérieure à celle des autres). A l'opposé, la théorie de la percolation montre que les réseaux de petites fractures (petite par rapport à la taille du système) ont des exposants hydrauliques μ caractéristiques très différents. En effet, en 2D, $\mu=1.3$ et en 3D, $\mu=2$ [Stauffer and Aharony, 1992]. La topologie des chemins d'écoulement en 3D est notoirement différente de son homologue 2D. Elle est plus tortueuse et comporte moins de boucles. Pour les réseaux intermédiaires composés d'une proportion équivalente de petites et grandes fractures, les échelles caractéristiques et l'amplitude des effets d'échelle seront probablement différentes.

Cette étude des propriétés d'échelle et de la répartition des flux dans les milieux 3D doit conduire à l'établissement de lois moyennes mais également à la caractérisation de la variabilité de la perméabilité en fonction de l'échelle, qui peut être encore plus déterminante comme le montre la figure ci-dessus.

L'objectif reste, comme en 2D, de proposer des types de milieux équivalents plus pertinents que le milieu homogène et moins complexe que le modèle de réseaux de fractures discrets. En 2D, les modèles équivalents proposés sont le modèle de percolation classique, le modèle de superposition de fractures majeures et un modèle dépendant de l'échelle [de Dreuzy et al., 2001c]. En 3D, on cherchera également des modèles généralisés double-perméabilité, double-porosité consistant en un réseau discret de fractures majeures et en un milieu dense de plus petites fractures superposées à la matrice. L'échelle critique est déterminée par la précision recherchée sur les prédictions du modèle.

L'étude 3D présente un avantage important sur l'étude 2D en ce qu'elle permet une comparaison plus directe avec le milieu naturel. Un certain nombre de sites et de synthèses sont suffisamment bien documentés pour servir de base de validation. C'est le cas du site de

Mirror Lake où la perméabilité et ses variations sont décrites à plusieurs échelles comme le montre la Figure 13 [Barton and Hsieh, 1989].

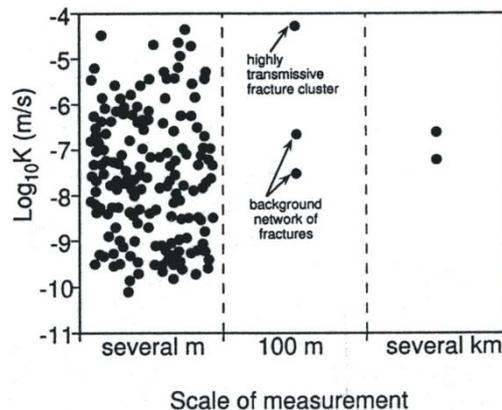


Figure 13 : Evolution de la perméabilité avec l'échelle sur le site de Mirror Lake.

4.1.3 Caractérisation de la chenalisation

L'extrême chenalisation des écoulements est une des spécificités des milieux fracturés naturels. Des observations réalisées dans des tunnels creusés dans des massifs granitiques montrent des arrivées d'eau extrêmement localisées. La plupart des fractures intersectées par le tunnel restent sèches tandis que les arrivées d'eau tendent à s'organiser autour d'une poignée de fractures. Deux causes ont été classiquement avancées pour expliquer une telle localisation : la chenalisation dans la fracture et la chenalisation dans le réseau de fractures. La chenalisation à l'échelle de la fracture provient de la géométrie rugueuse des épontes de la fracture créant une distribution des ouvertures hétérogène et spatialement corrélée. A l'échelle du réseau de fractures, la chenalisation provient à la fois de la connectivité du réseau et de la variabilité des transmissivités des fractures individuelles.

L'une comme l'autre de ces causes ont été proposées exclusivement comme l'origine de la chenalisation. Cependant, indépendamment, ces deux causes ne pourraient donner lieu qu'à une chenalisation limitée. En effet :

- A l'échelle de la fracture, la chenalisation résulte des hétérogénéités dans la distribution des ouvertures le long du plan de fracture [Auradou et al., 2006; Méheust and Schmittbuhl, 2001], et peut être associée à une anisotropie de perméabilité de la fracture [Auradou et al., 2005; Méheust and Schmittbuhl, 2000]. Mais cette chenalisation à l'échelle de la fracture unique ne permet pas d'expliquer la très large distribution de transmissivités de fractures observée à l'échelle d'un aquifer, et ce pour deux raisons. D'une part parce que cela impliquerait des ouvertures de fractures peu réalistes. D'autre part parce que l'échelle des hétérogénéités d'ouvertures d'une fracture est souvent beaucoup plus petite que sa longueur, auquel cas ces hétérogénéités ont au final peu d'influence sur la transmissivité globale de la fracture [Méheust and Schmittbuhl, 2003].
- A l'échelle du réseau, la chenalisation extrême n'intervient que sur une gamme d'échelles allant de l'échelle de connectivité à l'échelle d'homogénéisation des écoulements [de Dreuzy et al., 2001b; c]. Pratiquement cette gamme d'échelle peut

être très restreinte si la population de fractures n'a pas une large distribution de transmissivités.

Considérées indépendamment, ces deux causes de chenalisation pourraient ne pas être suffisantes pour rendre compte des observations de chenalisation extrême. Considérées simultanément, peuvent-elles fournir des modèles d'écoulement plus pertinents ? Le premier objectif de ce projet est de comprendre l'organisation de la chenalisation produite à la fois par les fractures et par le réseau. L'organisation des écoulements dans le réseau de fractures peut-il accentuer la chenalisation dans la fracture et inversement ? On s'attend a priori à ce que l'interaction des deux types de variabilités puisse conduire à une variabilité encore plus grande du système global. Une question clef est de savoir si cette interaction peut induire un changement spectaculaire dans le comportement hydraulique de l'aquifère. Dans ce contexte, les zones de contact internes aux fractures jouent probablement un rôle clef : la structure et la position de ces zones pourraient avoir un impact d'autant plus grand sur l'organisation des écoulements que leur localisation par rapport aux intersections avec les fractures peut changer notablement la direction des écoulements dans le réseau. La Figure 14 montre à droite les intersections d'une fracture avec les autres (segments verts). Superposer une zone de contact telle que l'ellipse rouge peut conduire au plus à une déconnexion partielle ou totale de la fracture et au moins à une réorientation des écoulements.

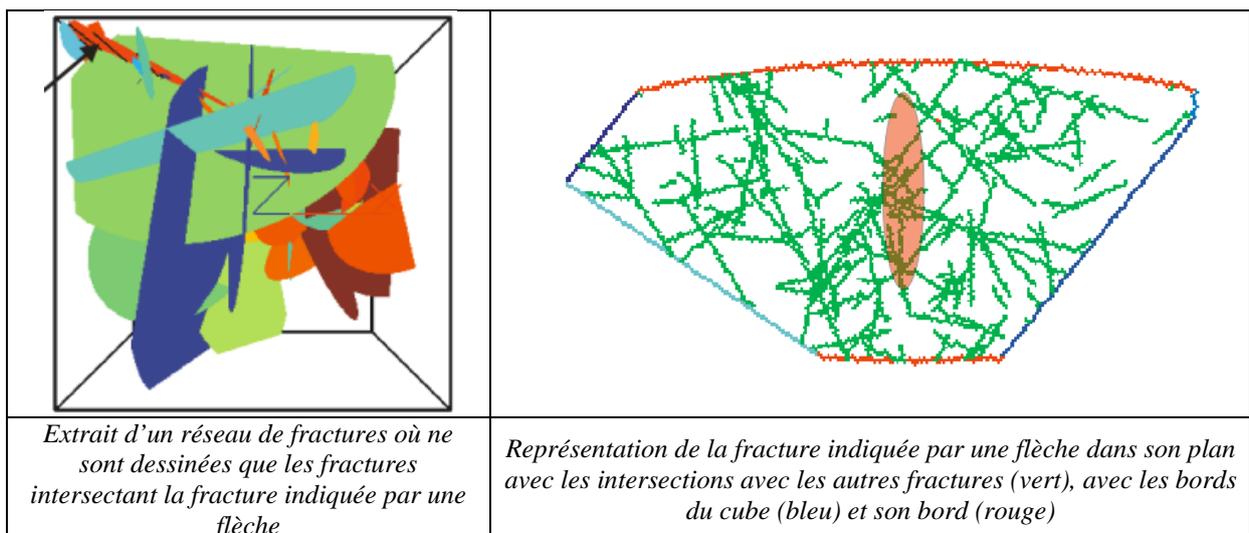


Figure 14 : Chenalisation potentielle à l'échelle du réseau (à gauche) et de la fracture (à droite)

Les études seront menées conjointement à l'échelle de la fracture et à l'échelle du réseau. A l'échelle de la fracture, la modélisation de la rugosité auto-affine des épontes des fractures individuelles permettra de générer la distribution des ouvertures de fracture en prenant en compte leur ouverture moyenne, les corrélations entre les topographies des parois en regard, et les caractéristiques des zones de contact (zones de perméabilité nulle). A l'échelle du réseau, les écoulements seront simulés en 3D par une méthode d'éléments finis conformes. Deux types de paramètres de modèles seront étudiés.

- Dans un premier temps, une étude systématique sera menée sur les distributions de longueurs et d'ouvertures de fractures qui sont les paramètres variant le plus dans le

réseau. Le but de cette partie est de déterminer dans quelles situations les deux types de chenalisation sont simultanément importants. Une méthode envisagée est de comparer systématiquement les résultats obtenus sur des réseaux sans et avec distribution d'ouvertures locales des fractures.

- Dans un deuxième temps sera abordé le cas des sites stockages de déchets nucléaires suédois suffisamment bien documentés pour fournir un modèle de fracturation naturel plus complet. Le but de cette partie est de déterminer l'influence des paramètres de structuration géométrique du réseau de fractures telles que les distributions d'ouvertures et les corrélations entre les positions des fractures.

In fine, l'objectif est de pouvoir relier simplement les caractéristiques de la chenalisation aux causes qui la génèrent, i.e. les propriétés géométries et hydrauliques de la fracturation. Cette étude nécessitera la mise au point d'une définition adéquate de la chenalisation et s'appuiera sur l'expérience acquise à l'échelle de la fracture et du réseau par le FAST et Géosciences Rennes. La réunion de ces deux équipes permettra en outre de réexaminer éventuellement les caractéristiques de la distribution d'ouverture des fractures ou/et de la structure du réseau de fractures en fonction des résultats obtenus.

L'étude de la chenalisation est intéressante en soi pour la caractérisation des écoulements et également comme préliminaire à l'étude du transport de solutés et à la compréhension des phénomènes dispersifs dans les réseaux de fractures. Si l'étude du transport n'est pas envisagée dans ce projet, elle en reste une perspective probable.

Ce travail se réalise en collaboration avec Yves Méheust, maître de conférences à Géosciences Rennes, et avec Harold Auradou et Laurent Talon, chercheurs au FAST (Orsay).

4.1.4 Détermination a priori du type d'écoulement sur le terrain

L'objectif est de comparer l'effet des différentes caractéristiques de la fracturation les unes par rapport autres pour mettre au point une stratégie optimale d'étude de terrain. Il s'agit en fonction des informations présentes sur un site de prédire a priori quel type d'information permet le gain optimal de précision du modèle. S'il s'agit de la position des quelques fractures les plus grandes, le type de test à conduire est très différent de s'il s'agit de la valeur moyenne de la perméabilité du milieu.

4.2 Modèles de milieux fracturés 2D et 3D (matrice perméable)

Les interactions entre les fractures et la matrice (roche environnante non fracturée) sont capitales pour nombre d'applications environnementales et énergétiques telles que le stockage de déchets nucléaires [Birgersson and Neretnieks, 1990; Jardine et al., 1999; Neretnieks, 1980], la rémanence d'une pollution dans un aquifère et l'exploitation des champs pétrolifères fracturés. L'objectif est d'aborder la question de l'influence de la structure des réseaux de fractures sur les échanges fracture matrice dans un premier temps sur les écoulements et dans un deuxième temps sur le transport de solutés. Il s'agira de définir des modèles équivalents simplifiés qui prennent en compte à la fois l'hétérogénéité du milieu et la physique des échanges fracture-matrice à l'échelle locale.

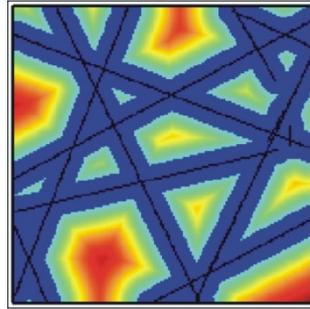


Figure 15: Blocs délimités par les fractures (traits noirs). Les couleurs sont une fonction croissante du bleu au rouge de la distance aux fractures les plus proches.

Le projet est réalisé dans le cadre de la thèse de Delphine Roubinet (2008-2010) consacrée à la mise au point de méthodes numériques simulant les échanges entre fracture et matrice dans des réseaux de fractures complexes 2D et 3D en régimes permanent et transitoire. On recherchera particulièrement des méthodes ne nécessitant pas le maillage de la matrice. En effet la partition de l'espace en blocs de matrices délimités par les fractures (Figure 15) est particulièrement complexe quand le milieu comprend des fractures de tailles très différentes. Et en l'absence de blocs bien définis, le maillage est impossible à réaliser. Parmi ces méthodes, on étudiera :

- Méthodes double porosités et double perméabilités [Barenblatt *et al.*, 1960; Warren *et al.*, 1963] et les méthodes d'homogénéisation locale consistant à remplacer localement les fractures et la matrice par un simple ou un double continuum [Kfoury, 2004; Kfoury *et al.*, 2004].
- Méthode d'agrégation consistant à affecter à chaque fracture une partie de la matrice environnante et à utiliser des équations de flux et de transport agrégées [Dershowitz and Miller, 1995; Neretnieks, 2002; Noetinger *et al.*, 2001; Wallach and Parlange, 2000].
- Modélisation homogène de la matrice et hétérogène des fractures. Le principe est de conserver la structure du réseau dans la modélisation de la phase fracturée et de superposer une grille plus régulière pour la simulation de la matrice (Figure 16).

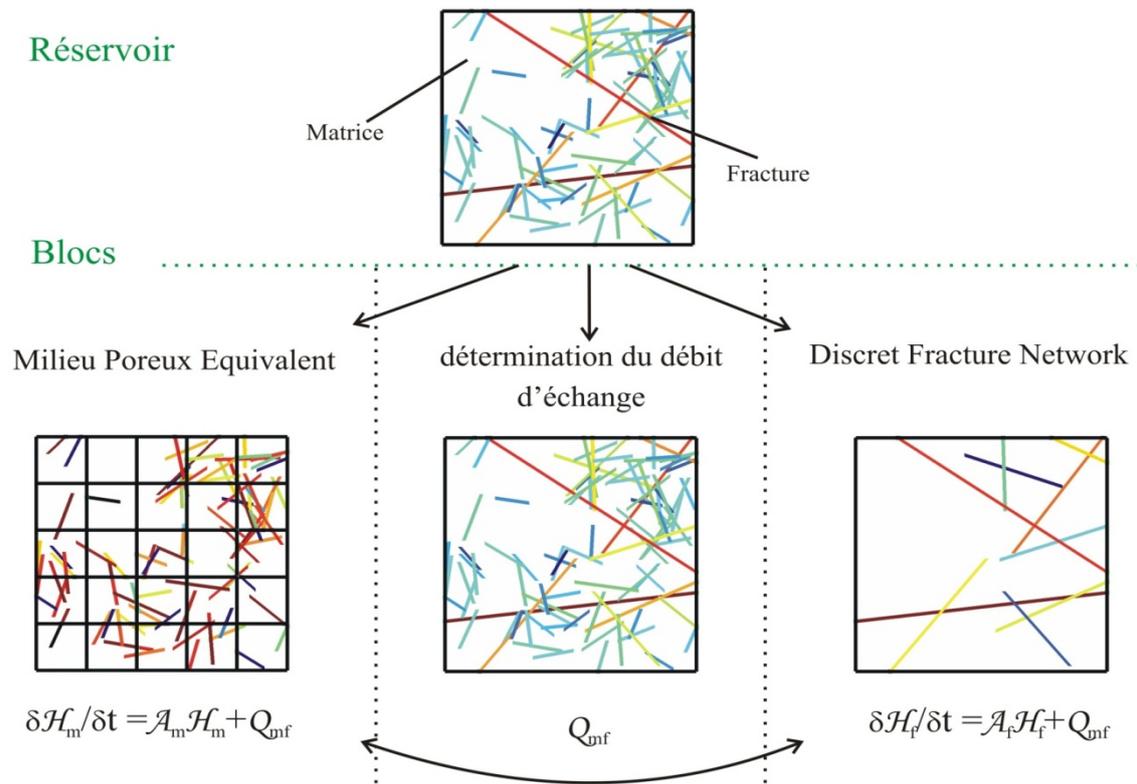


Figure 16 : Illustration de la démarche de modélisation par modèle double-porosité discret

La première étape de construction du modèle double-porosité discret consiste à trouver la distribution de perméabilités pour le milieu poreux équivalent. Le milieu poreux équivalent contient une partie des fractures, par exemple les fractures non connectées et les fractures secondaires pour l'écoulement. La difficulté vient de ce que les fractures à prendre en compte dans la matrice ne forment pas un réseau dense mais un réseau proche du seuil de percolation. Les méthodes classiques d'homogénéisation ne sont pas applicables. On recherche plutôt une relation non simplement tensorielle entre les flux et les gradients de charge qui permette de tenir compte de la connexion d'uniquement certains bords du système (Figure 17). Cette méthode est en cours de validation pour les réseaux de fractures et pour les milieux poreux très hétérogènes.

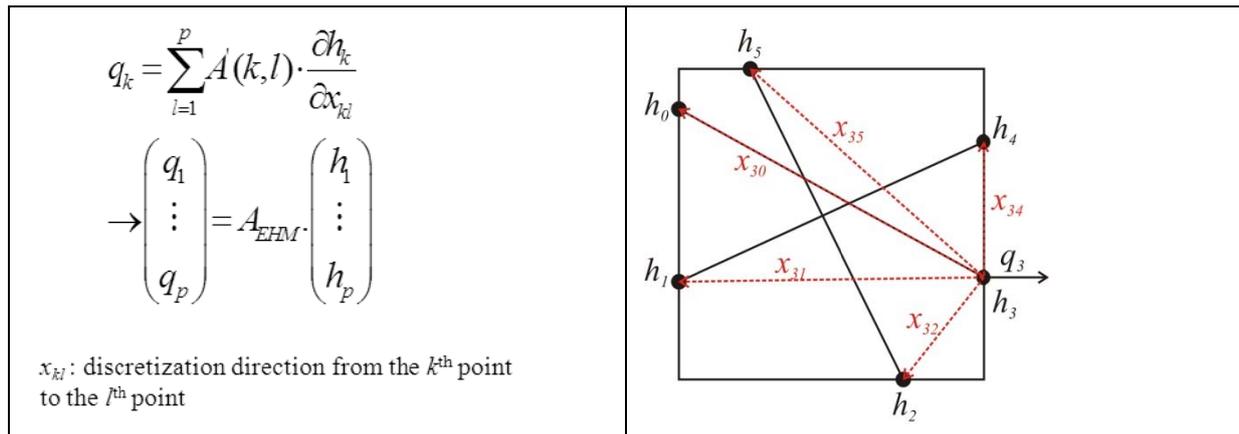


Figure 17 : Relation entre flux et gradient de charge utilisée dans les modèles double-porosité discret. (thèse D. Roubinet 2008-2010)

Les résultats des modèles seront comparés à des expériences fracture-matrice actuellement réalisées au laboratoire (Thèses de Laure Michel et Jérémy Bouquain encadrées par Jean de Brémond d’Ars et Yves Méheust) et aux expériences publiées par ailleurs [Mattisson *et al.*, 1997; Sonnenborg *et al.*, 1999; Tidwell *et al.*, 1995].

4.3 Transport inerte dans les milieux naturels

4.3.1 Détermination numérique des lois de transport

Suivant un schéma similaire aux études menées dans des milieux 2D corrélés avec une distribution de perméabilité lognormale, nous nous intéresserons aux milieux 3D, à l’influence de l’anisotropie, de la dispersion cinématique et de la nature de la corrélation des champs de perméabilité. L’objectif est à la fois de déterminer les comportements asymptotiques et pré-asymptotiques des dispersions longitudinale et transversale. Ces résultats pourront servir de référence pour mettre au point les théories pertinentes reliant le champ de vitesse Eulérien au champ de vitesse Lagrangien (point abordé dans la section 4.3.2).

La principale difficulté de l’établissement des lois de transport macroscopique est la nécessité de simuler le transport de solutés dans de très larges domaines. La mise au point des simulations sera réalisée en quatre étapes :

1. Dans le cas des milieux 3D hétérogènes, la taille des domaines à atteindre est de l’ordre de 4000.4000.1000 soit environ 10 milliards de cellules et autant d’inconnues. Cela induit des problèmes de taille mémoire et de temps calcul. La mémoire requise est de l’ordre de plusieurs téraoctets et la puissance calcul requise de l’ordre de plusieurs teraflops. Pour les domaines 2D, des domaines de 0,3 milliards d’inconnues ont pu être simulés sur des clusters SUN (2.2 GHz AMD Opteron avec 2 Go RAM chacun). Le défi est de gagner deux ordres de grandeur en utilisant des méthodes multigrilles associées à des méthodes de décomposition de domaine.
2. La simulation du transport de solutés est réalisée par une méthode Lagrangienne de suivi de particules. Cette méthode est bien adaptée aux problèmes dominés par l’advection, car elle n’introduit pas de diffusion numérique qui peut modifier dramatiquement les résultats . Nous prévoyons d’introduire la dispersion cinématique

et d'améliorer les performances parallèles de l'algorithme. La difficulté vient du traitement des discontinuités de la dérivée du champ de vitesse induisant une dispersion numérique [Delay et al., 2005; LaBolle et al., 1998; Semra et al., 1993].

3. La méthode de simulation sera validée en 3D par comparaison avec les approximations des méthodes de l'hydrogéologie stochastique pour des faibles hétérogénéités. Des mesures de performance des algorithmes parallèle seront réalisés pour étudier la scalabilité des méthodes développées.
4. Un large nombre de simulations seront réalisées pour aborder les questions de variabilité et d'incertitude.

4.3.2 Influence de la structuration du champ de vitesse sur le transport

Comme l'ont montré les premières études de T. Le Borgne, la corrélation spatiale de la trajectoire des particules est d'autant plus forte que la vitesse est élevée. Les particules ayant une vitesse forte parcourent une distance plus forte dans ces fortes vitesses que dans les vitesses faibles. A l'inverse, ce sont les vitesses les plus faibles dans lesquelles rentrent très occasionnellement les particules qui rendent le transport anormalement lent [Berkowitz and Scher, 1997]. L'intégralité du champ de vitesse échantillonné par les particules est déterminant pour les propriétés globales du transport (Figure 18).

Actuellement les seuls moyens théoriques d'obtention de la dispersion sont l'approximation du champ de vitesse par un champ gaussien corrélé de façon homogène et les champs de vitesse Lagrangien et Eulérien reliés par l'hypothèse de Corrsin [Lundgren and Pointin, 1976]. Ces deux hypothèses ne sont valables que pour de faibles hétérogénéités [Dentz et al., 2003; Hsu et al., 1996]. Les résultats de ces hypothèses ont été testés sur le coefficient dispersion pour des champs peu hétérogènes.

Notre objectif est de tester la conjecture de Corrsin directement sur la relation entre les champs de vitesse Lagrangien et Eulérien. La conjecture de Corrsin repose sur l'absence de corrélation statistique entre les fluctuations du champ de concentration et du champ de vitesse [Neuman and Zhang, 1990]. La dissymétrie entre les fortes et les faibles vitesses illustrée par la figure 17 est un premier obstacle à cette hypothèse symétrique. Plus généralement, nous testerons cette hypothèse systématiquement et chercherons les causes des déviations dans la corrélation entre le champ de vitesse et champ de corrélation.

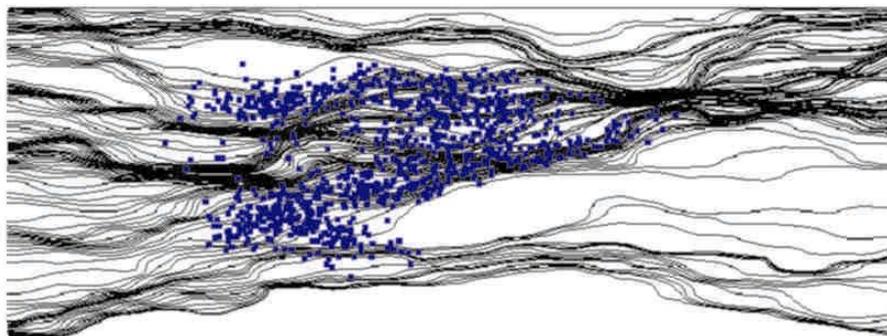


Figure 18 : Localisation du soluté (points bleus) en superposition sur les lignes de flux (noir)
(Thèse T. Le Borgne 2002-2004)

4.4 Transport réactif

4.4.1 Lois de transport dans les milieux très hétérogènes en présence d'adsorption non linéaire hors d'équilibre

La méthode de simulation numérique du transport de solutés présentée au chapitre 3.3.1 sera optimisée et utilisée pour déterminer les lois de transport macroscopiques pour des solutés adsorbables et dans des milieux très hétérogènes (Figure 19). Ce problème ne peut être traité par les méthodes perturbatives classiques existantes qui supposent à la fois la linéarité et de faibles hétérogénéités. Alternativement, nous chercherons les caractéristiques du champ de vitesse et les zones les plus déterminantes pour le transport réactif : s'agit-il des vitesses les plus fortes où est transportée la majeure partie du soluté ou les vitesses faibles où peu de soluté rentre mais où il transite plus lentement ?

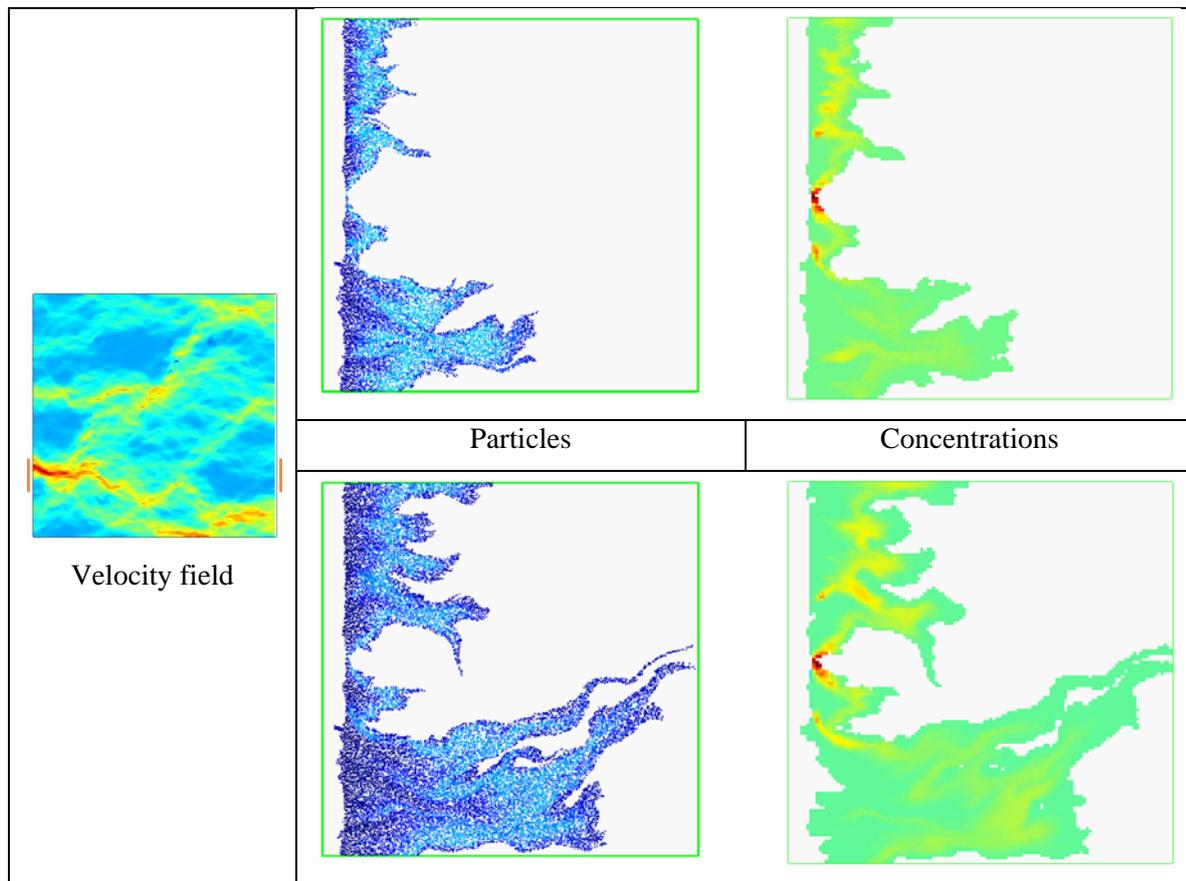


Figure 19 : La figure de gauche correspond à la distribution de vitesse calculée dans un champ de perméabilité lognormal corrélé avec des conditions aux limites de type perméamètre (fortes vitesses en rouge, faibles vitesses en bleu). Les figures de droite montrent la distribution de particules et de concentrations à deux temps différents avec une injection effectuée sur l'intégralité de la section d'entrée. Pour les particules, chaque point représente une particule. Les fortes valeurs de concentrations sont en bleu clair et les faibles valeurs en bleu foncé. Pour les concentrations, les fortes valeurs sont en rouge et les faibles valeurs sont en vert.

4.4.2 Influence de la dispersion sur le mélange

Ce projet constitue la trame d'une thèse co-encadrée avec Tanguy Le Borgne et financée par un réseau européen de formation initiale (ITN).

L'objectif est de comprendre et de modéliser les relations entre le transport physique et la réactivité chimique en solution [De Simoni et al., 2005; De Simoni et al., 2007]. L'observation classique est la différence forte entre la réactivité observée dans des batchs et la réactivité mesurée sur le terrain. La réactivité décroît fortement du batch au terrain. La raison classiquement avancée est la différence des processus de mélange et le défi est d'identifier les mécanismes du mélange dans les milieux naturels. Le mécanisme classique de mélange local est la diffusion [Werth et al., 2006]. Comme la diffusion est extrêmement faible, la question est de savoir comment elle peut induire une réactivité non négligeable. Les effets de la diffusion peuvent être très largement augmentés par l'hétérogénéité du champ de vitesse et ses conséquences sur les gradients de concentration. C'est cette hypothèse que nous étudierons à la lumière de la structuration du champ de vitesse mise en évidence dans l'étude du transport inerte et de simulations numériques.

4.5 Essais transitoires dans les milieux fracturés

Les tests transitoires sont une source très importante d'informations dans les milieux naturels. Leur interprétation nécessite systématiquement un modèle de milieu. Par exemple la perméabilité dérivée d'un essai de puits est en général déterminée en utilisant le modèle homogène à symétrie cylindrique de Théis. L'hypothèse d'un modèle de milieu homogène 2D n'est a priori pas adaptée aux milieux fracturés. C'est pourquoi, nous proposons la mise en place de cadres d'interprétation alternatifs adaptés à l'hétérogénéité des milieux fracturés.

4.5.1 Essais de puits

Nous avons montré pour les milieux poreux ayant des propriétés multifractales que le rabattement et le rayon de diffusion ont des comportements d'échelle non standards. La croissance ou la décroissance de la perméabilité moyenne avec l'échelle conditionne une diffusion respectivement anormalement lente ou anormalement rapide.

Dans le cas des milieux fracturés, le but est de savoir si ce cadre d'interprétation est toujours valide et auquel cas quelles informations il peut donner sur les effets d'échelle. Un autre cadre d'interprétation est d'office envisageable : celui de la transition de dimension. En effet, les milieux fracturés changent de dimension entre le moment où les écoulements sont localisés exclusivement dans une fracture et lorsqu'ils se répartissent dans un réseau (Figure 20).

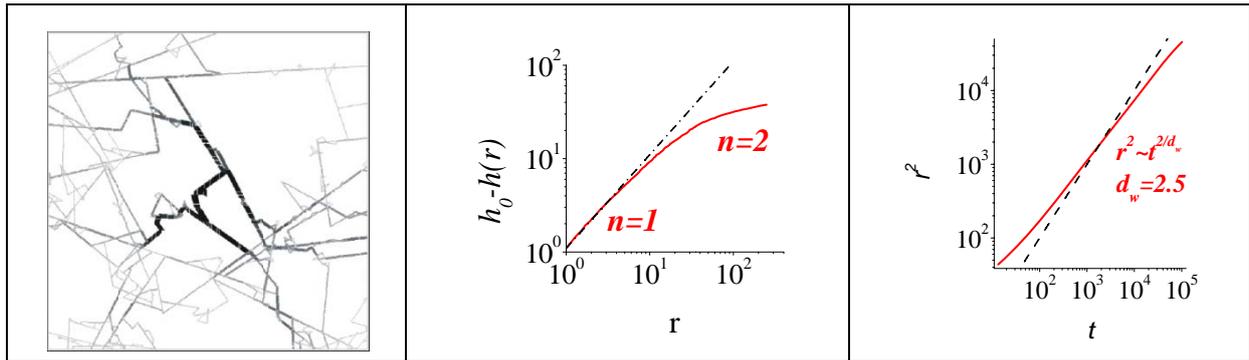
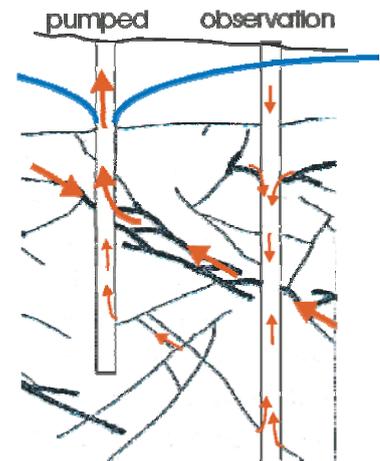


Figure 20 : De droite à gauche, modèle de réseau de fractures 2D dans lequel est effectué un essai de puits, profil de charge en permanent et évolution temporelle du rayon de diffusion. Les droites en pointillées montrent les résultats du modèle 1D le plus proche et les courbes rouges montrent les résultats obtenus sur le réseau.

4.5.2 Flowmétrie

Des méthodes de caractérisation in situ de la fracturation sont développées à Rennes par Olivier Bour et testées sur les sites de l'ORE H+. Leur interprétation repose actuellement sur une généralisation des modèles de Théis [Paillet, 1998]. Les résultats de ces essais deviennent rapidement complexes y compris pour des configurations simples comme celle présentée ci-contre (extrait de la thèse de T. Le Borgne). L'idée est de réaliser des tests similaires dans des modèles synthétiques 3D et de déterminer une typologie des réponses possibles en fonction de la connectivité inter-puits et de la perméabilité des chemins de connexion.



4.5.3 Essais de traceurs

La même démarche pourra être reprise pour les essais de traceurs. Cependant les structures testées sont notablement différentes. Les paramètres tels que le volume mis en jeu par le test et la dispersion des vitesses seront à prendre en compte.

4.6 Intégration de la morphologie des milieux dans le problème inverse

Les types de modèles géométriques et hydrauliques décrits dans les parties précédentes pour les milieux fracturés et les milieux poreux très hétérogènes reposent sur des propriétés géologiques et une modélisation hydraulique en partie théorique, en partie numérique. L'étape suivante est leur confrontation avec les données naturelles et donc la résolution du problème inverse. Deux questions fondamentales sont alors posées au sujet de la paramétrisation de ces modèles : les modèles sont-ils suffisamment flexibles pour contenir le milieu naturel étudié ? les modèles sont-ils suffisamment restrictifs pour permettre une caractérisation simple de la solution du problème inverse en terme de moyenne et de variabilité de la solution ? Une paramétrisation adaptée au milieu est un pré-requis de la résolution du problème inverse.

Pour les milieux fracturés, le problème inverse consiste à évaluer non seulement des propriétés hydrauliques telles que la transmissivité des fractures mais aussi des propriétés

morphologiques telles que la position des plus grandes fractures et les éventuelles corrélations entre fractures. L'estimation de paramètres à la fois hydrauliques nécessite de pouvoir comparer sur une même base les modifications hydrauliques induites par une variation des longueurs de fracture, de leur position et de leur transmissivité.

Pour les milieux poreux très hétérogènes, les paramètres à estimer sont plus la localisation des chemins d'écoulement préférentiels et leur transmissivité que la distribution spatiale complète de la perméabilité. En effet, les zones de perméabilité faibles seront de toutes façons difficiles à estimer et de peu d'intérêt pour une étude sur les écoulements. En outre la recherche ciblée des zones d'écoulement préférentielles permettra la détermination d'une stratégie optimale d'échantillonnage ciblée sur les écoulements majeurs (inversion 2 de la Figure 21).

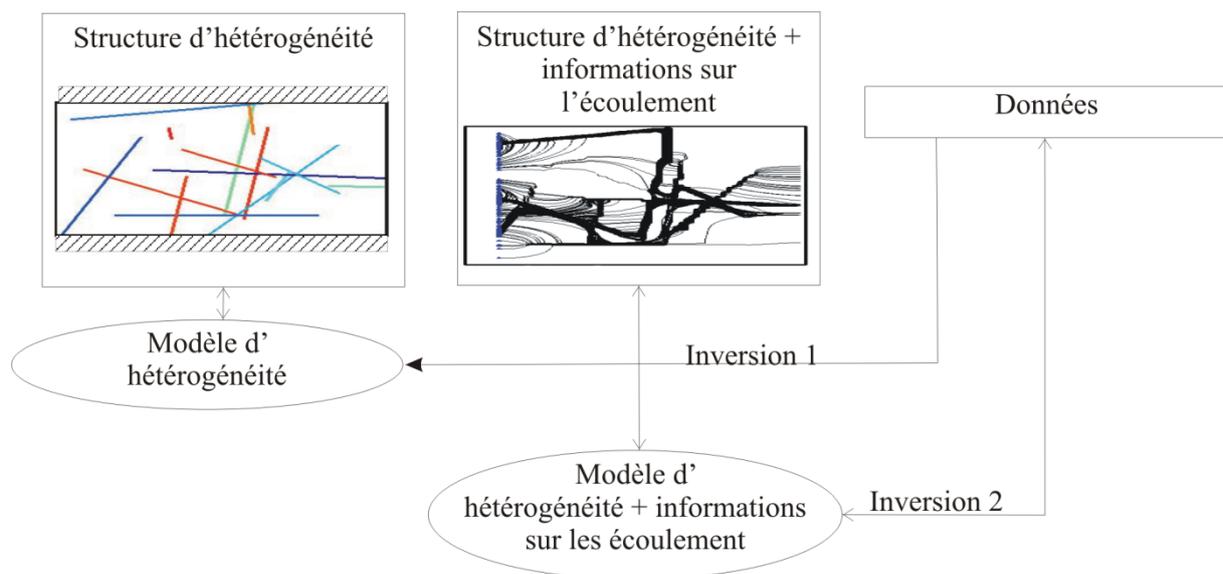


Figure 21 : Avantages respectifs de plusieurs types de problème inverse. L'inversion 1 a l'avantage d'être conditionnée par un modèle d'hétérogénéité plus facile à caractériser. L'inversion 2 travaille sur un modèle intégrant à la fois l'hétérogénéité et des informations sur les écoulements. Cette double caractérisation est plus complexe mais présente l'avantage d'être plus proche des données à inverser. Le but de la paramétrisation est de trouver l'optimum entre la complexité de la caractérisation et le conditionnement du problème inverse (Thèse R. Le Goc 2007-2009)

Pour estimer simultanément ces paramètres hydraulique et morphologique, plusieurs solutions algorithmiques sont envisageables. La première de type Monté-Carlo consiste à réaliser plusieurs grands nombres de simulations. D'une itération à l'autre les exécutions dans les zones de l'espace des paramètres où la fonction objectif est la plus faible sont multipliées. À l'inverse, les simulations de forte valeur de la fonction objectif sont remplacées par d'autres milieux générés aléatoirement dans l'espace des paramètres [Sambridge, 1999]. La seconde de type gradient consiste à partir d'un modèle initial à rechercher le modèle optimal en utilisant des méthodes de descente de gradient associé à du recuit simulé pour sortir des minima locaux [Tarentola, 1987].

Une première application du problème inverse consiste à savoir comment la qualité des modèles évolue avec la quantité des données et ainsi quelle paramétrisation est a priori

pertinente. Par exemple, il s'agit de savoir en fonction de la densité d'échantillonnage quelles sont les fractures que l'on peut identifier. Intégré à la démarche de modélisation de site, la résolution de ce problème doit permettre de savoir quel gain il est a priori possible d'obtenir à partir de données supplémentaires. Une deuxième application consiste à optimiser la quantité de données en fonction de l'objectif et de la précision recherchés (Figure 22).

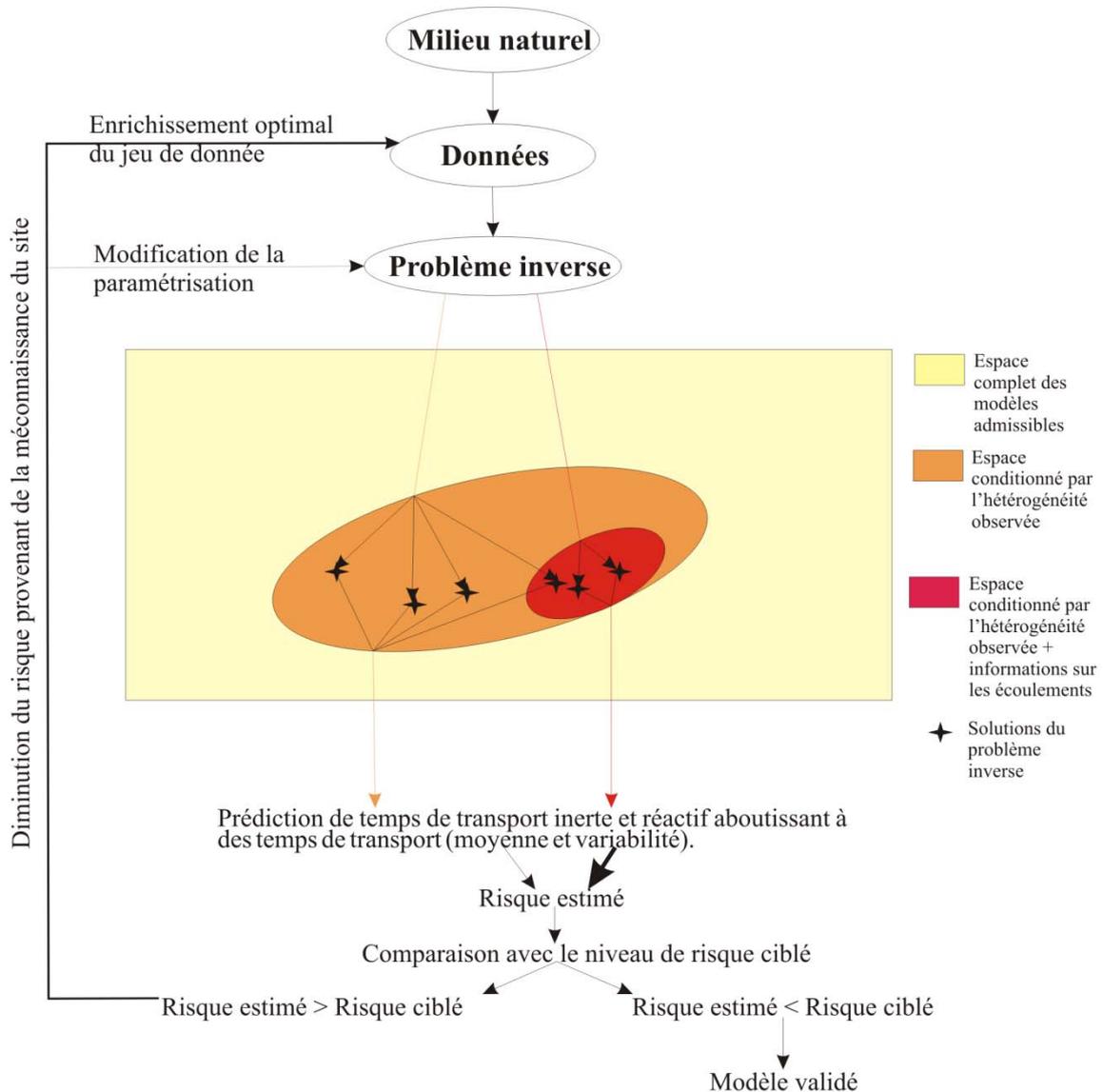


Figure 22 : Le problème inverse reconstitue des modèles à partir des données issues du milieu. Paramétrer l'hétérogénéité responsable des écoulements permet de réduire l'espace des solutions. En fonction des résultats obtenus et des objectifs fixés il est possible d'enrichir efficacement le jeu de données et d'améliorer la paramétrisation.

4.7 Développement de méthodes numériques

Le développement de méthodes numériques n'est pas un objectif en soi mais une nécessité pour l'étude de milieux suffisamment grands et hétérogènes. Le développement des méthodes

numériques continuera en grande partie avec l'INRIA (J. Erhel) dans quatre directions principales.

4.7.1 Transport réactif dans un maillage quelconque

Pour simuler le transport, nous mettons au point un “particle tracker” parallèle générique utilisable quelque soit le type de la grille et quelque soit la dimensionalité. L'algorithme sera valable indistinctement pour des maillages carrés, cubiques, triangulaires ou tétraédriques. La généralité de l'algorithme est assurée par la définition d'une interface avec le maillage. L'interfaçage est classique des programmes objets tels que le C++. Ainsi, le code sera utilisable à la fois pour les milieux poreux et pour les réseaux de fractures. L'algorithme mis au point pour le transport réactif pourra également être mis en place sur cette structure générique.

4.7.2 Parallélisation du calcul des écoulements dans les milieux fracturés

Les réseaux de fractures 3D conduisent rapidement à un nombre de fractures impossible à stocker sur un unique processeur, c'est pourquoi nous parallélisons le code de maillage et de recherche des écoulements. La parallélisation nécessite la résolution de plusieurs problèmes tels. Il s'agit dans un premier temps de chercher une répartition optimale des fractures sur les processeurs. Par la suite, l'algorithme de discrétisation sur une grille 3D nécessite une discrétisation globale du réseau, ce qui n'est plus envisageable pour le calcul parallèle. Il sera nécessaire d'envisager une discrétisation séparée des fractures dans leur plan et la mise au point d'une méthode de raccordement des éléments aux intersections des fractures aboutissant à un système d'éléments finis non-conformes.

4.7.3 Exécutions Monté-Carlo sur une grille de calcul

L'objectif est de réaliser des simulations pour des domaines 2D et 3D de très grande taille. Pour fixer les idées, il faudra résoudre une cinquantaine de systèmes linéaires ayant chacun une centaine de millions d'inconnues. La résolution se fait en parallèle sur des grappes de processeurs. Actuellement, on peut ainsi résoudre un système avec 16 millions d'inconnues, avec PSPASES (solveur parallèle multifrontal), sur 64 processeurs, en 130 secondes. Il s'agit maintenant d'effectuer simultanément les réalisations aléatoires, en suivant l'approche de type Monte-Carlo. L'architecture visée est un réseau de grappes de processeurs, dans l'infrastructure Grid'5000. L'objectif est de développer un logiciel générique qui effectue les trois étapes (génération, calcul, traitement) pour différentes applications possibles (milieu fracturé, milieu fortement hétérogène, etc.) et de déployer ce logiciel sur la grille de calcul.

4.7.4 Mise en place d'une base de données des résultats synthétiques

La modélisation des milieux hétérogènes nécessite des simulations Monté-Carlo sur un grand nombre de simulations. Après analyse, les résultats de ces simulations sont généralement détruits ou insuffisamment documentés pour être réutilisables. Or les lois proposées reposent sur ces résultats. Il est donc capital qu'ils puissent être repris et ré-analysés soit avec une autre méthode soit par d'autres personnes. C'est pourquoi il est nécessaire de les stocker de façon normalisée et documentée. Une base de données répondant à ces critères de pérennité et de clarté est en train d'être mise en place pour tous les paramètres et résultats de simulations.

4.8 Développement d'une plateforme logicielle pour l'hydrogéologie

L'objectif est de développer dans une plate-forme logicielle, en licence libre, des méthodes et algorithmes de simulation numérique pour modéliser le transport de fluides et de solutés dans des milieux souterrains hétérogènes. Les études de terrain montrent que l'hétérogénéité géologique ne présente pas d'échelle caractéristique pour élaborer une approche d'homogénéisation. A contrario, dans une approche par simulation numérique, toutes les échelles sont représentées.

La discrétisation spatiale pour le transfert de fluides est classiquement une méthode de type éléments finis mixtes ou volumes finis. Notre objectif est de développer ces méthodes, pour des maillages structurés et non structurés, en 2D et en 3D. La discrétisation spatio-temporelle des équations de transport est plus délicate ; les méthodes de type éléments finis discontinus ou volumes finis, sont bien adaptées à la dispersion mais ajoutent à l'advection une diffusion numérique artificielle. Les méthodes telles que le marcheur aléatoire discrétisent bien l'advection mais sont moins efficaces pour la dispersion cinématique. Nous analyserons les deux approches pour le transport 3D. Le traitement des différentes échelles et des hétérogénéités induit des systèmes linéaires creux de très grande taille et très mal conditionnés. Notre objectif est d'analyser et comparer les différentes méthodes de résolution, de les spécialiser pour nos applications et de définir des critères de choix. Le défi de la modélisation stochastique est d'effectuer beaucoup de simulations multiparamétriques de grande taille. Notre objectif est de définir un outil de déploiement sur une grille de calcul et de développer des algorithmes parallèles et distribués exploitant au mieux les ressources informatiques. Pour la réalisation de la plate-forme, l'objectif est d'intégrer dans une structure modulaire, ouverte et extensible des logiciels pouvant traiter différentes modélisations.

Nous répartissons les travaux en trois catégories : modélisation physique et numérique avec analyse des résultats de simulation, simulation numérique et calcul intensif, développement logiciel et intégration dans la plate-forme.

5 Conclusion

La problématique de recherche que j'ai présentée est centrée sur les relations entre l'hétérogénéité géologique et les propriétés hydrauliques des milieux fracturés ou poreux très hétérogènes. La forte hétérogénéité et la faible quantité de données sont un défi à la modélisation prédictive. L'objectif de ma recherche est de contribuer à l'établissement de modèles prédictifs pertinents. La pertinence est double. La pertinence est d'abord la représentativité des modèles par rapport au cas naturel ce qui nécessite des hypothèses de modélisation justifiées par les données de terrain. La pertinence est ensuite la détermination de l'incertitude des modèles induite par la large méconnaissance des sites. Une trop large incertitude peut disqualifier un modèle et son utilité. Une trop faible incertitude peut être le signe d'un manque de connaissance du site.

Mon travail de recherche repose sur l'utilisation de la modélisation numérique qui est à la fois un moyen et un objectif en soi. Les modèles numériques sont un moyen pour simuler les écoulements et le transport que l'on ne peut qu'observer que très partiellement au laboratoire et sur le terrain. Les modèles numériques sont une fin en soi car ils nécessitent le développement de nouvelles méthodes ou l'adaptation de méthodes existantes. De plus la complexité croissante des phénomènes hydrauliques étudiés nécessite le couplage de codes rendant indispensable une organisation logicielle avancée des moyens de simulation.

Je réalise mes recherches dans un laboratoire de géosciences avec une collaboration sur le long terme avec une équipe de numériciens de l'INRIA (équipe SAGE de Jocelyne Erhel). Mes recherches intermédiaires entre les géosciences et la modélisation profitent de l'expertise en géologie de Géosciences Rennes d'une part et en mathématiques appliquées et génie logiciel de l'INRIA d'autre part.

Le point de départ de mes travaux de recherche concerne les écoulements dans les milieux fracturés. Ma recherche s'est diversifiée à la fois en terme de milieu géologique et en terme de phénomène hydraulique. Concernant les milieux géologiques, je m'intéresse maintenant également aux milieux poreux très hétérogènes à la fois comme point de comparaison par rapport aux milieux fracturés et pour leur intérêt en soi. Concernant les phénomènes hydrauliques, ma recherche concerne de plus en plus les transports chimiquement inerte et réactif de solutés.

Les travaux que je mène depuis une dizaine années au départ essentiellement théoriques donnent une place croissante aux modèles de terrain. Depuis mon recrutement au CNRS à Géosciences Rennes, le génie logiciel et le problème inverse prennent une place croissante à travers le développement d'une plateforme numérique et une thèse sur le problème inverse dans les milieux fracturés (thèse de R. Le Goc). Mon objectif est d'utiliser les théories et les outils développés pour mettre en œuvre une approche originale de la modélisation de sites hydrogéologiques très hétérogènes. Mon implication dans l'Observatoire de Recherche en Environnement H² depuis cinq ans sera un moyen d'accéder aux données de terrain et de tester les méthodes développées, ce qui a commencé en 2007 avec les stages de M2 de A. Boisson et K. Bonel sur la modélisation des sites de Ploemeur et Poitiers.

Mon activité de recherche s'intègre dans le contexte de l'équipe d'hydrogéologie de Géosciences Rennes et a profité de discussions constantes avec Philippe Davy. Elle est très

² Réseau national de sites hydrogéologiques

liée aux développements métrologiques et aux études de terrain menées par Olivier Bour et aux expériences en laboratoire menées par Yves Méheust et Jean de Brémond d'Ars. Notre objectif commun est de tirer parti des différentes approches de terrain, expérimentale et numérique pour contribuer au développement de modèles d'écoulement et de transport prédictif dans les milieux géologiques très hétérogènes.

6 Références

- Acuna, J. A., and Y. C. Yortsos (1995), Application of fractal geometry to the study of networks of fractures and their pressure transient, *Water Resources Research*, 31(3), 527-540.
- Andersson, P., J. Byegard, E.-L. Tullborg, T. Doe, J. Hermanson, and A. Winberg (2004), In situ tracer tests to determine retention properties of a block scale fracture network in granitic rock at the Aspo Hard Rock Laboratory, Sweden, *Journal of Contaminant Hydrology*, 70(3-4), 271-297.
- Arbogast, T., L. C. Cowsar, M. F. Wheeler, and I. Yotov (2000), Mixed finite element methods on nonmatching multiblock grids, *Siam Journal on Numerical Analysis*, 37(4), 1295-1315.
- Auradou, H., G. Drazer, J. P. Hulin, and J. Koplik (2005), Permeability anisotropy induced by the shear displacement of rough fracture walls, *Water Resources Research*, 41(9).
- Auradou, H., G. Drazer, A. Boschan, J. P. Hulin, and J. Koplik (2006), Flow channeling in a single fracture induced by shear displacement, *Geothermics*, 35(5-6), 576-588.
- Barenblatt, G. I., I. P. Zheltov, and I. N. Kochina (1960), Basic concept in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks, *J. Appl. Math.*, 24, 1286-1303.
- Barker, J. A. (1988), A Generalized Radial Flow Model For Hydraulic Test in Fractured Rock, *Water Resources Research*, 24(10), 1796-1804.
- Barton, C. C., and P. A. Hsieh (1989), Physical and Hydrologic flow properties of fractures, Field trip Guide., AGU, Washington D.C.
- Bastardie, F., M. Cannavacciuolo, Y. Capowiez, J. R. de Dreuzy, and D. A. Cluzeau (2002), A new simulation for modelling the topology of earthworm burrow systems and their effects on macropore flow in experimental soils., *Biology and Fertility of Soils*, 36(2), 161-169.
- Bastardie, F., Y. Capowiez, J.-R. de Dreuzy, and D. Cluzeau (2003), X-ray tomographic and hydraulic characterization of burrowing by three earthworm species in repacked soil cores, *Applied Soil Ecology*, 24(1), 3-16.
- Beaudoin, A., J. R. de Dreuzy, and J. Erhel (2006), A comparison between a direct and a multigrid sparse linear solvers for highly heterogeneous flux computations, paper presented at European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECCOMAS CFD 2006.
- Becker, M. W., and A. M. Shapiro (2000), Tracer transport in fractured crystalline rock: Evidence of nondiffusive breakthrough tailing, *Water Resources Research*, 36(7), 1677-1686.
- Berkowitz, B., and H. Scher (1997), Anomalous transport in random fracture networks, *Physical Review Letters*, 79(20).
- Besnard, K., J.-R. de Dreuzy, P. Davy, and L. Aquilina (2008a), Double-peak occurrence and consequences for nonlinearly and kinetically sorbing solutes, *in preparation*.
- Besnard, K., J.-R. de Dreuzy, P. Davy, and L. Aquilina (2008b), A modified active-walkers method to simulate nonlinearly and kinetically sorbing solute transport in heterogeneous porous media, *in preparation*.
- Birgersson, L., and I. Neretnieks (1990), Diffusion in the matrix of granitic rock: Field test in the Stripa Mine, *Water Resources Research*, 26(11).
- Bonnet, E., O. Bour, N. Odling, P. Davy, I. Main, P. Cowie, and B. Berkowitz (2001), Scaling of Fracture Systems in Geological Media, *Reviews of Geophysics*, 39(3), 347-383.
- Bour, O., and P. Davy (1997), Connectivity of random fault networks following a power law fault length distribution, *Water Resources Research*, 33(7), 1567-1583.
- Bour, O., and P. Davy (1998), On the connectivity of three dimensional fault networks, *Water Resources Research*, 34(10), 2611-2622.
- Charlaix, E., E. Guyon, and S. Roux (1987), Permeability of a Random Array of Fractures of Widely Varying Apertures, *Transport in Porous Media*, 2, 31-43.
- Clauser, C. (1992), Permeability of crystalline rock, *Eos Trans. AGU*, 73(21), 237-238.
- Darcel, C., O. Bour, and P. Davy (2003a), Cross-correlation between length and position in real fracture networks, *Geophysical Research Letters*, 30(12).

- Darcel, C., O. Bour, P. Davy, and J. R. de Dreuzy (2003b), Connectivity properties of two-dimensional fracture networks with stochastic fractal correlation, *Water Resources Research*, 39(10), 1272.
- Darcel, C., O. Bour, and P. Davy (2004a), Stereological analysis of fractal fracture networks, *Journal of Geophysical Research*, 108.
- Darcel, C., P. Davy, O. Bour, and J.-R. de Dreuzy (2004b), DFN modelling of the Simpevarp site, SKB report.
- Darcel, C., P. Davy, O. Bour, and J.-R. de Dreuzy (2006), Discrete fracture network for the Forsmark site, SKB report.
- Davy, P., C. Darcel, O. Bour, R. Munier, and J. R. de Dreuzy (2006), A note on the angular correction applied to fracture intensity profiles along drill core, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 111(B11).
- de Dreuzy, J.-R., C. Darcel, P. Davy, and O. Bour (2004a), Influence of spatial correlation of fracture centers on the permeability of two-dimensional fracture networks following a power law length distribution, *Water Resources Research*, 40(1).
- de Dreuzy, J.-R., P. Davy, J. Erhel, and J. de Brémond d'Ars (2004b), Anomalous diffusion exponents in continuous 2D multifractal media, *Physical Review E*, 70.
- de Dreuzy, J.-R., J. Bodin, and H. L. Grand (2006), Groundwater database for site and processes studies: Point-like structure based on well, meteorological and hydrological platforms, *Groundwater*, in press.
- de Dreuzy, J.-R., A. Beaudoin, and J. Erhel (2007), Asymptotic dispersion in 2D heterogeneous porous media determined by parallel numerical simulations *Water Resources Research*, W10439.
- de Dreuzy, J.-R., and P. Davy (2007), Relation between fractional flow and fractal or long-range permeability field in 2D, *Water Resources Research*, 43.
- de Dreuzy, J. R., P. Davy, and O. Bour (2000), Percolation threshold of 3D random ellipses with widely-scattered distributions of eccentricity and size, *Physical Review E*, 62(5), 5948-5952.
- de Dreuzy, J. R., P. Davy, and B. Berkowitz (2001a), Advective Transport in the Percolation Backbone in Two Dimensions, *Physical Review E*, 64.
- de Dreuzy, J. R., P. Davy, and O. Bour (2001b), Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following a power law length distribution: 1-Effective connectivity, *Water Resources Research*, 37(8).
- de Dreuzy, J. R., P. Davy, and O. Bour (2001c), Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following a power law length distribution: 2-Permeability of networks based on log-normal distribution of apertures, *Water Resources Research*, 37(8), 2079-2095.
- de Dreuzy, J. R., P. Davy, and O. Bour (2002), Permeability of 2D fracture networks with power-law distributions of length and aperture, *Water Resources Research*, 38(12).
- De Simoni, M., J. Carrera, X. Sanchez-Vila, and A. Guadagnini (2005), A procedure for the solution of multicomponent reactive transport problems, *Water Resources Research*, 41(11).
- De Simoni, M., X. Sanchez-Vila, J. Carrera, and M. W. Saaltink (2007), A mixing ratios-based formulation for multicomponent reactive transport, *Water Resources Research*, 43(7).
- Delay, F., P. Ackerer, and C. Danquigny (2005), Solution of solute transport in porous or fractured formations by random walk particle tracking: a review, *Vadose Zone Journal*, 4, 360-379.
- Dentz, M., H. Kinzelbach, S. Attinger, and W. Kinzelbach (2002), Temporal behavior of a solute cloud in a heterogeneous porous medium: 3. Numerical simulations, *Water Resources Research*, 7.
- Dentz, M., H. Kinzelbach, S. Attinger, and W. Kinzelbach (2003), Numerical studies of the transport behavior of a passive solute in a two-dimensional incompressible random flow field, *Physical Review E*, 67.
- Dershowitz, W., and I. Miller (1995), Dual Porosity fracture flow and transport, *Geophysical Research Letters*, 22(11), 1441-1444.
- Halvin, S., and D. Ben-Avraham (1987), Diffusion in disordered media, *Advances in Physics*, 36(6), 695-798.
- Hermann, H. J., and H. E. Stanley (1984), Building blocks of Percolation Clusters: Volatile Fractals, *Phys. Rev. Lett.*, 53, 1121-1124.
- Hsu, K. C., D. Zhang, and S. P. Neuman (1996), Higher-order effects on flow and transport in randomly heterogeneous porous media, *Water Resources Research*, 32(3), 571-582.
- Hunt, A. G. (2003), Some comments on the scale dependence of the hydraulic conductivity in the presence of nested heterogeneity, *Advances in Water Resources*, 26(1), 71-77.
- Jardine, P. M., W. E. Sanford, J. P. Gwo, O. C. Reedy, D. S. Hicks, J. S. Riggs, and W. B. Bailey (1999), Quantifying diffusive mass transfer in fractured shale bedrock, *Water Resources Research*, 35(7), 2015-2030.

- Kfoury, M. (2004), Changement d'échelle séquentiel pour les milieux poreux et fracturés.
- Kfoury, M., R. Ababou, B. Noetinger, and M. Quintard (2004), Matrix-fracture exchange in a fractured porous medium: stochastic upscaling, *Comptes Rendus Mecanique*, 332(8), 679-686.
- LaBolle, E. M., J. Quastel, and G. E. Fogg (1998), Diffusion theory for transport in porous media: Transition-probability densities of diffusion processes corresponding to advection-dispersion equations, *Water Resources Research*, 34(7), 1685-1693.
- Le Borgne, T., O. Bour, J.-R. de Dreuzy, P. Davy, and F. Touchard (2004), Equivalent mean flow models for fractured aquifers: Insights from a pumping tests scaling interpretation, *Water Resources Research*, 10.1029/2003WR002436.
- Le Borgne, T., J.-R. de Dreuzy, P. Davy, and O. Bour (2007), Characterization of the velocity field organization in heterogeneous media by conditional correlations, *Water Resources Research*, 43(W02419).
- Lundgren, T. S., and Y. B. Pointin (1976), Turbulent self-diffusion, *Physics of Fluids*, 19(3), 355-358.
- Mattisson, C., M. A. Knackstedt, and T. J. Senden (1997), Transport in fractured porous solids, *Geophysical Research Letters*, 24(5).
- Méheust, Y., and J. Schmittbuhl (2000), Flow enhancement of a rough fracture, *Geophysical Research Letters*, 27(18).
- Méheust, Y., and J. Schmittbuhl (2001), Geometrical heterogeneities and permeability anisotropy of rough fractures, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 106(B2), 2089-2102.
- Méheust, Y., and J. Schmittbuhl (2003), Scale effects related to flow in rough fractures, *Pure and Applied Geophysics*, 160(5-6), 1023-1050.
- Neretnieks, I. (1980), Diffusion in the Rock Matrix: An Important Factor in Radionuclide Retardation?, *Journal of Geophysical Research*, 85(B8), 4379-4397.
- Neretnieks, I. (2002), A stochastic multi-channel model for solute transport--analysis of tracer tests in fractured rock, *Journal of Contaminant Hydrology*, 55(3-4), 175-211.
- Neuman, S. P., and Y.-K. Zhang (1990), A Quasi-Linear Theory of Non-Fickian and Fickian Subsurface dispersion 1. Theoretical Analysis With Application to Isotropic Media, *Water Resources Research*, 26(5), 887-902.
- Neuman, S. P. (2005), Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks, *Hydrogeology Journal*, 13(1), 124-147.
- Noetinger, B., T. Estebenet, and P. Landreau (2001), A Direct Determination of the Transient Exchange Term of Fractured Media Using a Continuous Time Random Walk Method, *Transport in Porous Media*, 44(3).
- Paillet, F. L. (1998), Flow modeling and permeability estimations using borehole flow logs in heterogeneous fractured formations, *Water Resources Research*, 34(5), 997-1010.
- Sambridge, M. (1999), Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm- I. Searching a parameter space, *Geophys J Int*, 138(2).
- Schmittbuhl, J., S. Gentier, and S. Roux (1993), Field-Measurements of the Roughness of Fault Surfaces, *Geophysical Research Letters*, 20(8).
- Semra, K., P. Ackerer, and R. Mosé (1993), Three dimensional groundwater quality modeling in heterogeneous media, in *Water pollution II: Modeling, measuring and prediction*, edited by W. a. C. A. Brebbia, pp. 3-11, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK.
- Sonnenborg, T. O., M. B. Butts, and K. J. Jensen (1999), Aqueous flow and transport in analog systems of fractures embedded in permeable matrix, *Water Resources Research*, 35(3), 719-729.
- Stauffer, D., and A. Aharony (1992), *Introduction to percolation theory, second edition*, Taylor and Francis, Bristol.
- Tarentola, A. (1987), *Inverse Problem Theory: methods for data fitting and model parameter estimation*, Elsevier, New York.
- Theis, C. V. (1935), The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Eos Trans AGU*, 16, 519-524.
- Tidwell, V. C., R. J. Glass, and W. Peplinski (1995), Laboratory investigation of matrix imbibition from a flowing fracture, *Geophysical Research Letters*, 22(11).
- Trefry, M. G., F. P. Ruan, and D. McLaughlin (2003), Numerical simulations of preasymptotic transport in heterogeneous porous media: Departures from the Gaussian limit, *Water Resources Research*, 39(3).

- Tsang, C.-F., and I. Neretnieks (1998), Flow Channeling in Heterogeneous Fractured Rocks, *Reviews of Geophysics*, 36(2), 257-298.
- Wallach, R., and J.-Y. Parlange (2000), Applying the boundary layer concept to model transport of dissolved chemical in preferential flow paths, *Water Resources Research*, 36(10).
- Warren, J. E., P. J. Root, and M. Aime (1963), The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs, *Society of Petroleum Engineers Journal*, September, 245-255.
- Werth, C. J., O. A. Cirpka, and P. Grathwohl (2006), Enhanced mixing and reaction through flow focusing in heterogeneous porous media, *Water Resources Research*, 42(12).

7 Activités annexes

7.1 Enseignements

1. *Hydrogéologie fondamentale*, 2003: module ENVAM avec L. Aquilina et K. Besnard³.
2. *Spatialisation de l'information et géostatistique*, 2006, module ENVAM avec S. Corgne, C. Walter et D. Causeur.
3. *Modélisation hydrogéologique*, 2008, module ENVAM avec T. Le Borgne, D. Roubinet et E. Bresciani.
4. *Analyse Statistique et prédiction des risques naturels*, 2005-2006 (M1 : 15 heures)
5. *Modélisation en hydrogéologie*, 2001-2004, (M2 : 24 heures/an).
6. *Hydrogéologie*, 2002-2004, (M1 : 10 heures/an).
7. *Risque de stockage des déchets nucléaires*, 2002-2005, à l'ENSAR (Agro Rennes).

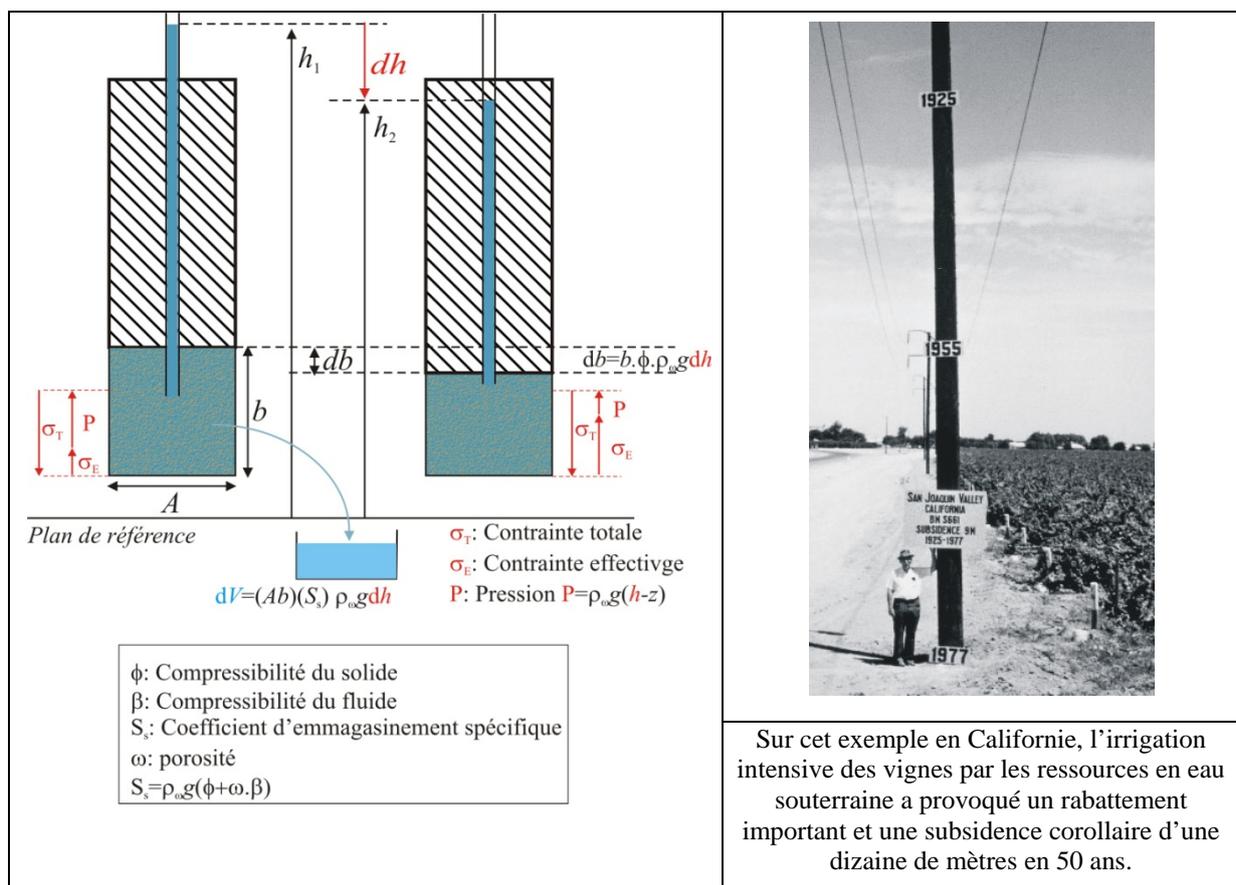


Illustration du cours ENVAM expliquant à gauche l'emmagasinement de l'eau dans les aquifères captifs par compressibilité du milieu. Un pompage intensif provoque une compression du sol et une subsidence telle que celle montrée par la photo de droite.

³ Campus numérique ENvironnement et Aménagement, <http://www.envam.org/>

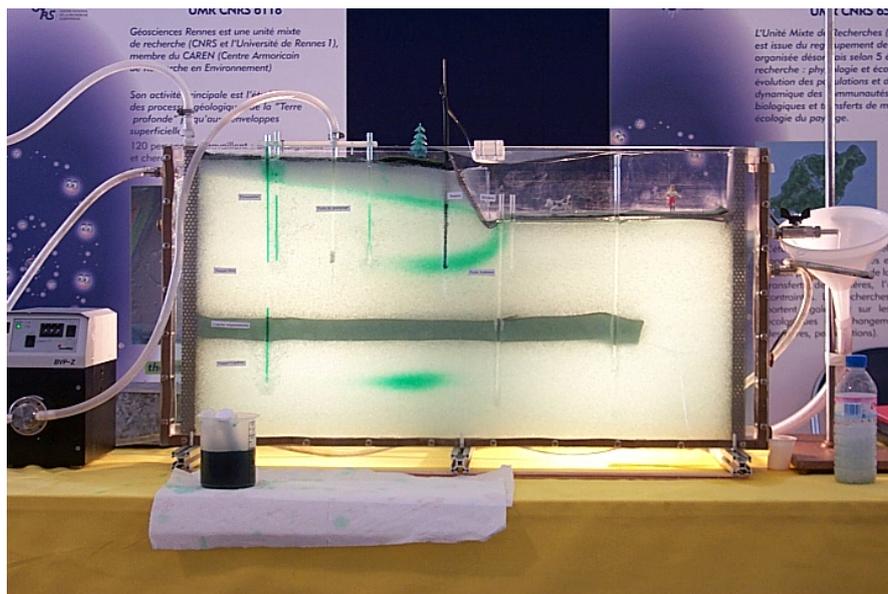
7.2 Diffusion de la culture scientifique

Modèle analogique montrant le fonctionnement des aquifères

Cette maquette a été mise au point en 2002 avec J. de Brémond d'Ars et J.-P. Caudal. Elle a été présentée en 2002 et 2003 à la fête de la science et est régulièrement utilisée dans les journées portes ouvertes du laboratoire et de l'Université. Le palais de la découverte intéressé par cette expérience en a réalisé deux copies pour leur collection permanente et des expositions itinérantes. La maquette est décrite page suivante.

La maquette présente la coupe d'un aquifère pour introduire aux écoulements dans les milieux souterrains et à la problématique du transport de polluants. C'est **une occasion unique de voir ce qui se passe dans le sol**. La coupe se compose de trois couches simulant typiquement un milieu sédimentaire multicouche, contenant **plusieurs nappes d'eau souterraine** (photo ci-après). A partir de la surface, la première couche contient une "nappe libre" et la troisième couche contient une "nappe captive". La couche intermédiaire (la plus foncée sur la photo) est imperméable et dissocie les deux nappes.

- ❑ *La nappe libre* est caractérisée par l'existence d'une surface libre matérialisable par l'écoulement d'un traceur à partir de la surface.
- ❑ *La nappe captive* est caractérisée par l'existence de puits artésiens (puits dans lesquels le niveau d'eau est supérieur à la surface).



L'expérience permet d'aborder les le **fonctionnement des écoulements souterrains** ainsi que l'influence des activités humaines :

- ❑ *La relation entre l'eau de surface et l'eau souterraine* : est-ce que ce sont les nappes qui alimentent les rivières ou inversement ?
- ❑ *La pollution des eaux souterraines* : des injections de traceurs dans les puits permettent de visualiser les lignes d'écoulement ainsi que le devenir des polluants dans une nappe.
- ❑ *Le pompage dans les nappes* : Un pompage actionné à volonté montre le rabattement de la nappe ainsi que la disparition de la rivière en aval.
- ❑ *Les transferts entre les aquifères* : on remarque les changements occasionnés par le pompage dans la nappe libre ne se transmettent pas à la nappe captive.

8 Production scientifique

8.1 Liste des articles publiés dans des revues à comité de lecture

- J.-R. de Dreuzy**, A. Beaudoin, and J. Erhel (2008), Reply to comment by A. Fiori et al. on “Asymptotic dispersion in 2D heterogeneous porous media determined by parallel numerical simulations”, *Water Resour. Res.*, 44, W06604.
- J.-R. de Dreuzy**, A. Beaudoin and J. Erhel, Transport in 2D highly heterogeneous porous media : pre-asymptotic and asymptotic behaviours determined by large-scale numerical simulations, *Water Resources Research*, (43), W10439.
- J.-R. de Dreuzy**, P. Davy, Relation between fractional flow and fractal or long-range 2-D permeability field, *Water Resources Research* (43), W04431.
- T. Le Borgne, **J.-R. de Dreuzy**, P. Davy and O. Bour, Describing the velocity field organization in heterogeneous media by conditional correlations, *Water Resources Research*, 2007, 43, W02419.
- R. Le Goc and **J.-R. de Dreuzy**, Adjoint-state method for diffusion equation in the finite-difference and finite-volume frameworks, *Computers and Geosciences*, 2007, 33(2), 291-293.
- Bodin, J., G. Porel, F. Delay, F. Ubertosi, S. Bernard, and **J.-R. de Dreuzy** Simulation and analysis of solute transport in 2D fracture/pipe networks : The SOLFRAC program, *Journal of Contaminant Hydrology*, 2007, 89(1-2), 1-28.
- J.-R. de Dreuzy**, J. Bodin, H. Le Grand et al. Groundwater database for site and processes studies : Point-like structure based on well, meteorological and hydrological platforms, *Ground Water*, 2006, 44, 743.
- P. Davy, C. Darcel, O. Bour, R. Munier, and **J.-R. de Dreuzy**, Note on the Terzaghi angular correction applied to fracture intensity profile along core, *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, B11408.
- P. Davy, O. Bour, **J.-R. de Dreuzy**, C. Darcel, Flow in multiscale fracture networks, in *Fractal analysis for natural hazards* edited by G. Cello and B.D. Malamud, Geological Society Special Publication 261, 2006
- J.-R. de Dreuzy**, C. Darcel, P. Davy, and O. Bour, Influence of spatial correlation of fracture centers on the permeability of two-dimensional fracture networks following a power law length distribution, *Water Resources Research*, 40 (1), 2004.
- Le Borgne , T., O. Bour, **J.-R. de Dreuzy**, P. Davy, and F. Touchard, Equivalent mean flow models for fractured aquifers : Insights from a pumping tests scaling interpretation, *Water Resources Research*, 10.1029/2003WR002436, 2004.
- J.-R. de Dreuzy**, P. Davy, J. Erhel, and J. de Brémond d’Ars, Anomalous diffusion exponents in continuous 2D multifractal media, *Physical Review E*, 70, 016306, 2004.
- Aquilina L., **J.-R. de Dreuzy**, O. Bour and P. Davy Porosity and fluid velocities in the upper continental crust (2 to 4 km) inferred from injection tests at the Soultz-sous-Forêts geothermal site, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 68, Issue 11, 1 June 2004, Pages 2405-2415
- Davy, P., O. Bour, **J.-R. de Dreuzy** and C. Darcel, Permeability of multiscale fracture networks, In KOLYMBAS, D. (ed.) *Fractals in Geotechnical engineering*, Vol. 9 of *Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling*, Balkema, pp. 169-174, 2004.
- Darcel, C., O. Bour, P. Davy, and **J.R. de Dreuzy**, Connectivity properties of two-dimensional fracture networks with stochastic fractal correlation, *Water Resources Research*, 39 (10), 1272, 2003.
- Bastardie, F., Y. Capowiez, **J.-R. de Dreuzy**, and D. Cluzeau, X-ray tomographic and hydraulic characterization of burrowing by three earthworm species in repacked soil cores, *Applied Soil Ecology*, 24 (1), 3-16, 2003.
- J.-R. de Dreuzy**, P. Davy, and O. Bour, Permeability of 2D fracture networks with power-law distributions of length and aperture, *Water Resources Research*, 38 (12), 2002.
- J.-R. de Dreuzy**, and J. Erhel, Efficient algorithms for the determination of the connected fracture network and the solution of the steady-state flow equation in fracture networks, *Computers and Geosciences*, 29 (107-111), 2002.

- Bastardie, F., M. Cannavacciuolo, Y. Capowiez, **J.-R. de Dreuzy**, and D.A. Cluzeau, A new simulation for modelling the topology of earthworm burrow systems and their effects on macropore flow in experimental soils., *Biology and Fertility of Soils*, 36 (2), 161-169, 2002.
- J.-R. de Dreuzy**, P. Davy, and B. Berkowitz, Advective Transport in the Percolation Backbone in Two Dimensions, *Physical Review E*, 64, 2001a.
- J.-R. de Dreuzy**, P. Davy, and O. Bour, Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following a power law length distribution : 1-Effective connectivity, *Water Resources Research*, 37 (8), 2001.
- J.-R. de Dreuzy**, P. Davy, and O. Bour, Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following a power law length distribution : 2-Permeability of networks based on log-normal distribution of apertures, *Water Resources Research*, 37 (8), 2079-2095, 2001.
- Park, Y.-J., **J.-R. de Dreuzy**, K.-K. Lee, and B. Berkowitz, Transport and intersection mixing in random fracture networks with power law length distributions, *Water Resources Research*, 37 (10), 2493-2501, 2001.
- J.-R. de Dreuzy**, P. Davy, and O. Bour, Percolation threshold of 3D random ellipses with widely-scattered distributions of eccentricity and size, *Physical Review E*, 62 (5), 5948-5952, 2000.

8.2 Conférences invitees

- J.-R. de Dreuzy**, Upscaling in hydrogeology : bridging the gap between laboratory-scale experiments and groundwater-scale management, 9e Colloque Africain sur la Recherche en Informatique et en Mathématiques Appliquées, 27-30 Octobre 2008, Rabat (Maroc).
- J.-R. de Dreuzy**, Quelles ressources en eau pour le XXIème siècle, Ecole CIMPA, UNESCO-TLEMEN ALGERIE, Mathématiques pour l'écoulement et l'épuration de l'eau, 10-22 mai 2008, Tlemcen (Algérie).
- J.-R. de Dreuzy**, Modélisation physique des écoulements et du transport souterrains, Ecole CIMPA, UNESCO-TLEMEN ALGERIE, Mathématiques pour l'écoulement et l'épuration de l'eau, 10-22 mai 2008, Tlemcen (Algérie).
- J.-R. de Dreuzy** and Philippe Davy, Steady and transient flow in multifractal porous and fractured fields, Cargèse Summer School on "Flow and Transport in Porous and Fractured Media" For development, protection, management and sequestration of subsurface fluids, July 25 to August 6, 2005.
- J.-R. de Dreuzy**, Philippe Davy, Olivier Bour, C. Darcel, Caractérisation géométrique des milieux fracturés naturels et conséquences sur le choix des modèles hydrauliques, CEA, Ecole sur problème inverse et changement d'échelle en hydrogéologie, 13-15 Mars 2002.

8.3 Conférences avec proceedings

- G. Pichot, J. Erhel, **J.-R. de Dreuzy**, Adaptation of a Mortar method to model flow in large-scale fractured media , Scaling Up and Modeling for Transport and Flow in Porous Media, Dubrovnik, Croatia, 13-16 October 2008
- A. Beaudoin, **J.-R. de Dreuzy** and J. Erhel, An efficient parallel particle tracker for advection-diffusion simulations in heterogeneous porous media, The 13th International Euro-Par Conference, European Conference on Parallel and Distributed Computing, August 28-31, 2007, IRISA, Rennes, France.
- A. Beaudoin, **J.-R. de Dreuzy** and J. Erhel, A comparison between a direct and a multigrid sparse linear solvers for highly heterogeneous flux computations, European Conference on Computational Fluid Dynamics, *ECCOMAS CFD 2006*, P. Wesseling, E. Onate and J. Périaux (Eds).
- A. Beaudoin, **J.-R. de Dreuzy**, J. Erhel and H. Mustapha, Parallel Simulations of Underground Flow in Porous and Fractured Media, Parallel Computing 2005, 13-16 September 2005, Avignon.
- K.F. Kouamé, A.G. Akaffou, **J.-R. de Dreuzy**, T. Lasm, P. Davy et O. Bour, Simulation des écoulements dans les réservoirs fracturés : application au socle archéen de Touba (Nord Ouest de la Côte d'Ivoire). Conférence internationale SITIS 05, Yaoundé (Cameroun), 30 Nov.-1er Déc. 2005, pp. 39-46.

8.4 Autres conférences

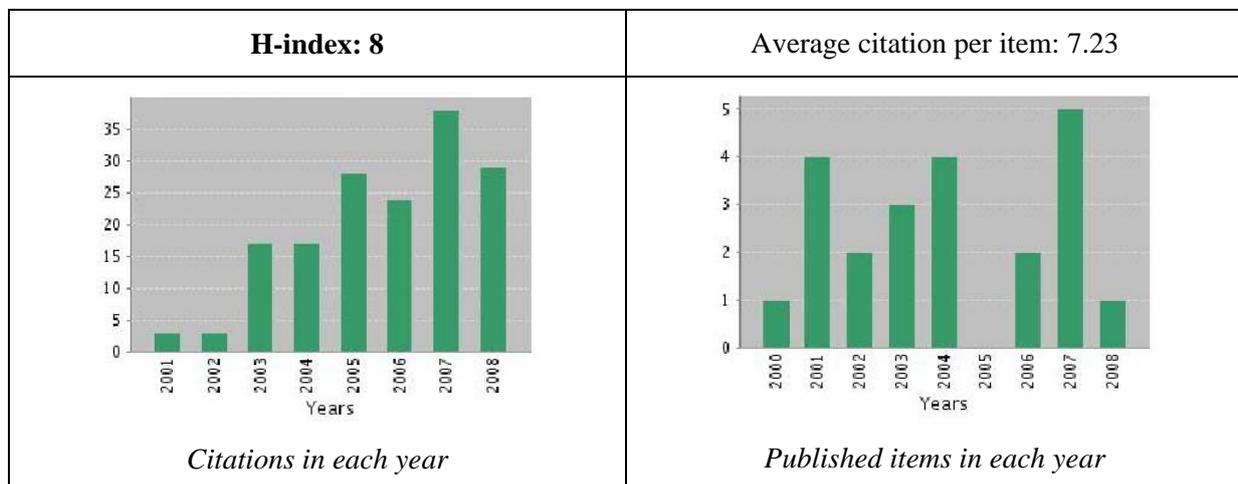
- J.-R. de Dreuzy**, Ph. Davy, Hydraulic tomography implemented by n-pole testing , Gordon conference on flow and transport in permeable media, July 13-18, 2008, Magdalen College, Oxford, United Kingdom.
- D. Roubinet, **J.-R. de Dreuzy**, Ph. Davy, A discrete dual-porosity fracture network for modeling flow in heterogeneous porous fractured media , Gordon conference on flow and transport in permeable media, July 13-18, 2008, Magdalen College, Oxford, United Kingdom
- A. Beaudoin, **J.-R. de Dreuzy**, J. Erhel, Dispersion dans les milieux hétérogènes, AUGC, XXVIème rencontres universitaires de génie civil, Nancy, 4-6 juin 2008
- J.-R. de Dreuzy**, Transient flow and particle transport in highly heterogeneous porous and fractured media, Barçona, 8 mai 2008.
- J.-R. de Dreuzy**, Davy Ph., Bour O., Le Goc R., Le Borgne T. - Relations entre propriétés géométriques et hydrauliques dans les milieux, RST Nancy, 21-24 avril 2008.
- Michel L., Méheust Y., Bouquain J., Caudal J.-P., de Bremond d'Ars J., **de Dreuzy J.-R.**, Davy P. - Echange de solutés entre une fracture et la matrice poreuse adjacente : une expérience analogique, RST Nancy, 21-24 avril 2008.
- L. Michel, Y. Méheust, J. Bouquain, J.-P. Caudal, J. de Bremond d'Ars, **J.-R. de Dreuzy**, P. Davy, Solute exchange between a fracture and the surrounding porous matrix - an analog experiment, EGU General Assembly 2008
- T. Le Borgne, M. Dentz, J. Carrera, **J.-R. de Dreuzy**, P. Davy, Lagrangian velocity correlation and effective transport models for highly heterogeneous permeability fields, EGU General Assembly 2008
- J.-R. de Dreuzy**, A. Beaudoin, J. Erhel, Asymptotic dispersion in 2D heterogeneous porous media, EGU General Assembly 2008.
- R. Le Goc, **J.-R. de Dreuzy** and P. Davy, Identification of main flow structures for highly channeled flow in fractured media by solving the inverse problem, EGU2008-A-02501, EGU General Assembly 2008
- Le Goc, R., Darcel, C., Davy P., Bour O., **de Dreuzy, J.-R.**, Uncertainty, variability and determinism in DFN models : appraisal of a strategy for the fracture generation process, EGU2008-A-06745, 2008, EGU General Assembly 2008.
- J.-R. de Dreuzy**, K. Besnard, P. Davy, A modified Lagrangian-volumes method to simulate nonlinearly and kinetically sorbing solute transport in heterogeneous porous media, International Workshop "Modelling Reactive Transport in Porous Media", Strasbourg, January 21-24, 2008.
- T. Le Borgne, M. Dentz, J. Carrera, **J.-R. de Dreuzy**, Ph. Davy, Quantifying the impact of the velocity field organization on the solute transport properties, AGU General Assembly 2006, San-Francisco, 10-14 December 2007.
- L. Michel, Y. Meheust, J.-P. Caudal, J. de Brémond d'Ars, **J.-R. de Dreuzy**, Ph. Davy, Solute transport in a synthetic fracture with one porous wall : fracture-matrix interaction, AGU General Assembly 2006, San-Francisco, 10-14 December 2007.
- Anthony Beaudoin, **J.-R. de Dreuzy**, Jocelyne Erhel ,Utilisation du calcul parallèle pour étudier numériquement la macro-dispersion dans les aquifères, CFM 2007 (Congrès Français de Mécanique), Grenoble, 27-31 août 2007.
- J. Erhel, **J.-R. de Dreuzy**, High performance flow simulation in discrete fracture networks, SIAM Conference on Computational Geosciences, Santa Fe, USA, March 2007.
- J. Erhel, **J.-R. de Dreuzy**, A. Beaudoin, E. Bresciani, D. Tromeur-Dervout, A parallel scientific software for heterogeneous hydrogeology, International Conference on Parallel CFD, Antalya, Turkey, May 2007.
- Bour, O., P. Davy, C. Darcel, and **J.-R. de Dreuzy**, Reconstructing the 3D fracture distribution model from core (10 cm) to outcrop (10 m) and lineament (10 km) scales, IUTAM Symposium on Scaling in Solid Mechanics, Cardiff, June 25-29, 2007

- J.-R. de Dreuzy**, J. Bodin, H. Le Grand, O. Bour and Ph. Davy, A groundwater database for site and process studies in heterogeneous aquifers, Gestion Intégrée des Ressources en Eaux et Défis du Développement Durable (GIRE3D), Marrakech, 23-25 mai 2006.
- P. Davy, C. Darcel, O. Bour, R. Munier, **J.-R. de Dreuzy**, Reconstructing the 3D fracture distribution model from core -10 cm- to lineament -10 km- scales, EGU General Assembly 2006, Vienna, 2-7 April 2006.
- J.-R. de Dreuzy**, P. Davy, Well-test flow responses of highly heterogeneous porous and fractured media, EGU General Assembly 2006, Vienna, 2-7 April 2006
- J.-R. de Dreuzy**, P. Davy, O. Bour, Well-test flow responses of highly heterogeneous porous and fractured media, AGU General Assembly 2006, San-Francisco, 8-11 December 2006
- A. Beaudoin, **J.-R. de Dreuzy**, J. Erhel., Numerical simulation of solute transport in heterogeneous porous media, Workshop on High Performance Computing at LAMSIN, Tunisia, November 2006.
- Mustapha, H., . Beaudoin, J. Erhel, J.R. de Dreuzy, Parallel simulation of underground flow in porous and fractured media, Parallel Computing 2005, Malaga, Spain, 13 - 16 September 2005.
- A. Beaudoin, **J.-R. de Dreuzy** et J. Erhel, Transport dans les milieux poreux hétérogènes : détermination des lois macroscopiques, Rencontres Universitaires de Génie Civil (AUGC), Grenoble, 26-27 Mai 2005.
- H. Mustapha, **J.-R. de Dreuzy**, J. Erhel, Flow simulation in heterogeneous three-dimensional fractures networks, SIAM Conference on Mathematical and Computational Issues in the Geosciences, June 7-10 2005, Avignon, France.
- K.F. Kouamé, A.G. Akaffou, **J.-R. de Dreuzy**, T. Lasm, P. Davy et O. Bour, Simulation des écoulements dans les réservoirs fracturés : application au socle archéen de Touba (Nord Ouest de la Côte d'Ivoire). Conférence internationale SITIS 05, Yaoundé (Cameroun), 30 Nov.-1er Déc. 2005, pp. 39-46.
- A. Beaudoin, **J.-R. de Dreuzy**, J. Erhel, H. Mustapha. Sparse linear solvers applied to parallel simulations of underground flow in porous and fractured media, Matrix Computations and Scientific Computing Seminar, Berkeley (CA), October 2005
- P. Davy, **J.-R. de Dreuzy**, O. Bour, C. Darcel, Prise en compte de l'organisation multi-échelle des réseaux de fractures dans les modèles de transfert. Journées du Programme de Recherches en Hydrologie, Bordeaux, France, 20-21 janvier 2004.
- J. Erhel, **J.-R. de Dreuzy**, H. Hoteit, A compact scheme for numerical simulation of flow circulation in highly heterogeneous porous media, ICIAM 2003, The 5th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, Sydney, Australia - 2003
- J. Erhel, **J.-R. de Dreuzy**, Modelling flow and transport in subsurface heterogeneous fractured media, SIAM Conference on Mathematical and Computational Issues in the Geosciences(GS03), being held March 17-20, 2003, Austin, Texas.
- Besnard, K., **J.-R. de Dreuzy**, Davy, P. and Aquilina, L.. Double peak formation in reactive solute transport. Poster. Joint Meeting AGU-EGS-AUG, Nice, Avril 2003.
- O. Bour, C. Darcel, P. Davy, **J.-R. de Dreuzy**, Geometrical properties of multi-scale fracture networks. IAHS international conference on groundwater in fractured rocks, Prague, 15-19 September 2003, 2 p.
- P. Davy, O. Bour, **J.-R. de Dreuzy**. Scaling properties of fracture networks and consequences on permeability models. Exploratory Workshop on fractals and geotechnical engineering, Innsbruck, December 15-17, 2003.
- O. Bour, **J.-R. de Dreuzy**, Ph. Davy, T. Le Borgne : Stochastic models of fracture networks based on the broad-range fracture length distribution and the long-range fracture, AGU Fall meeting 2003, 8-12 December 2003.
- J.-R. de Dreuzy**, C. Darcel, Ph. Davy, O. Bour : Influence of correlation on the permeability and on well-test interpretation of two-dimensional fractal porous and fractured media, AGU Fall meeting 2003, 8-12 December 2003.
- T. Le Borgne, O. Bour, **J.-R. de Dreuzy** and P. Davy : Flow model relevant to fractured crystalline aquifers : insights from a scaling interpretation of pumping tests, International conference on Groundwater in Fractured Rocks, Prague, 15-19 septembre 2003. (Conference with proceedings).

- Besnard, K., **J.-R. de Dreuzy**, Davy, P. and Aquilina, L. Transport of non-linearly and kinetically sorbing solutes in heterogeneous porous media. Poster. American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San Francisco, Déc. 2002.
- Besnard, K., **J.-R. de Dreuzy**, Davy, P. and Aquilina, L. Transport of non-linearly and kinetically sorbing solutes in heterogeneous porous media. European Geophysical Society (EGS) Meeting, Nice, Avril 2002.
- Besnard, K., **J.-R. de Dreuzy**, Davy, P. and Aquilina, L. Transport de contaminants réactifs, s'adsorbant non-linéairement et sous contrôle cinétique, dans les aquifères hétérogènes. Réunion des Sciences de la Terre, Nantes, Avril 2002.
- O. Bour, P. Davy, **J.-R. de Dreuzy**, . Diffusion within the matrix in heterogeneous fracture media. AGU Fall Meeting, San Francisco, 6-10 december 2002.
- P. Davy, O. Bour, C. Darcel, **J.-R. de Dreuzy**, Permeability of 2D Multiscale Fracture Networks. AGU Fall Meeting, San Francisco, 6-10 december, 2002.
- O. Bour, Davy P., **J.-R. de Dreuzy**, Darcel C.- Permeability of multiscale fracture networks. In : Petrophysical properties of crystalline rocks, Geol. Soc. London, London, September 10-11, 2001, 2001
- de Dreuzy, J.-R.**, P. Davy and O. Bour, Differences between permeability of 2D and 3D models of fracture networks, European Geophys. Soc., XXV General Assembly, Nice, France, 25 - 29 April 2000.
- de Dreuzy, J.-R.**, P. Davy and O. Bour, Upscaling permeability in 2D model of fracture networks, with widely-scattered length and aperture distributions, European Geophys. Soc., XXV General Assembly, Nice, France, 25 - 29 April 2000.
- de Dreuzy, J.-R.**, Philippe Davy, Brian Berkowitz : The influence of the geological characteristics of fractured media on hydraulic properties Modeling of Flow in Permeable Media, Gordon conference, Proctor Academy, Andover, New Hampshire, August 6-11, 2000.

8.5 Indices bibliographiques

Ci-après sont reproduits les caractéristiques bibliographiques données par la base de données Web of Knowledge au 5 septembre 2008.



9 Articles

The articles have been organized by thematic rather than by publication dates. The sections are separated by color pages and are organized around the following topics:

9.1 Fractured media

9.2 Non-classical transient tests interpretation

9.3 Transport and dispersion

9.4 Numerical methods

9.5 Others (groundwater database and earthworm studies)